



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

Análisis del impacto de El Niño/Oscilación del Sur,
en la precipitación del monzón de Norteamérica, y
estudio de los principales transportes de humedad
asociados.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

Licenciada en Ciencias de la Tierra

PRESENTA:

Ana Elena Martínez Melgarejo

TUTOR

Dra. Paulina Ordóñez Pérez



Ciudad Universitaria, CDMX, 2017



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 está 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.

Agradecimientos

Quiero agradecer:

Obviamente y antes que nada, a mi familia, mis papás que no dudaron de mí, que me dieron la libertad de escoger lo que me apasionara, que aguantaron mis dramas, que me enseñaron a aprender de mis errores, a seguir adelante, y a creer en mí. A mi hermano (don Inge), mi profe particular de matemáticas, de juegos, de música, de todo. Por la paciencia, el apoyo, la compañía, las jaladas de orejas. A mis tíos, mis primos, mis abuelos. A Guille, a Lulú, que siempre las llevo en el corazón. No importa el tiempo que pase yo siempre seré su “chula chaparra”. Estoy tan feliz y orgullosa de tenerlos, y los amo, como no tienen idea.

A dos muchachas que, después de 5 años (y contando) seguimos juntas. Dalia y Moni. En las buenas, en las malas, en las tristes y las felices (aunque nuestras facultades sean las más alejadas de la vida jaja). Siempre han estado ahí con un abrazo, un helado, un mojito, un elote o todo junto. Con ustedes aprendí el verdadero valor de la amistad, del apoyo, de ir creciendo pero en el fondo ser las mismas niñas que se sentaban en las jardineras a reír, soy muy afortunada de tenerlas y de poder compartir mi vida con ustedes. Las amo!

A Cyn, que desde el primer día de la carrera estuvimos juntas, perdidas en el Prome pero juntas, por tenerme la confianza de compartir sueños, victorias, fallas, enoormes caminatas, estrés (sobretudo ja). Que el futuro nos depare muchas más historias. Ustedes son otra razón por la que el 607 fue el grupo más bonito de la prepa.

Zu Nem, sieben Jahre und Zählen. Vielen Dank für alles, für immer zusammen. Ich fehle Worte zu sagen, wie sehr ich dich liebe. Wir sind Kartoffeln!!!

A mis pestíferos y asociados, que en pocos meses me he encariñado con los cuatro: Gustavo, Charlie, Josele y Yoel. Cientos de kilómetros de distancia y como $30^{\circ}C$ de diferencia, y fuimos a terminar en el cubículo más frío del CCA, pero con café. Gracias por siempre hacerme reír.

A mis chicas y chicos atmosféricos, las palabras sobran, compartimos tanto, un taller, un tornamesa, una casa, incluso una asesora. Ríense siempre chicos.

A Paulina, por toda la paciencia, el apoyo, la enseñanza, por estar siempre pendiente de nosotros y brindarnos todas las herramientas posibles. Por abrirme los ojos a un mundo nuevo e increíble que nunca creí querer tanto, y la confianza para desarrollar éste trabajo. Me faltan palabras para agradecer todo lo que me ha brindado en éste año.

A Claudia, Giovanni, Harry y Arturo. Muchas muchas gracias, todos me han dejado una enseñanza en diferentes puntos de la carrera y me llevo mucho aprendizaje de ustedes, el que hayan estado en esta última etapa me llena de mucha felicidad. También gracias por el apoyo constante durante las revisiones.

A mi tutor de orientación, ese que se esconde cuando me ve, que ni se acuerda de mi nombre y se salvó de ser mi sinodal. No pero en serio, muchas gracias por todo, el apoyo, los consejos, las cartas de recomendación, las pláticas, las risas, la enseñanza (ya vimos que ya trascendió especies) ojalá ya me quiera. Sepa que las nubes siempre tendrán un lugar especial en mí.

Al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT), por apoyar el proyecto IA103116 “Principales fuentes de humedad de la República Mexicana y su variabilidad climática”, a partir del cual se pudo realizar ésta tesis.

A la Dra. Raquel Nieto y el Dr. Luis Gimeno, por los datos de las trayectorias.

A un olvidado grupo 513, que cuando los veo es como si el tiempo no hubiera pasado. Sepan que siempre los recuerdo y que estoy tan feliz por lo mucho que han logrado y por esos buenos tiempos que pasamos. Los quiero.

Al Centro de Ciencias de la Atmósfera, en donde encontré mi pasión, donde mi mundo se expandió y me enamoré tanto de la carrera.

A la facultad de Ciencias, para mí, la mejor facultad de todas, no puedo imaginarme en otro lugar ni ser tan feliz como lo fui aquí. Gracias a ella conocí a excelentes profesores cuyos cursos siempre los tendré presentes cuando tenga que programar, cuando vea ecuaciones enormes y ya no me espante (tanto), cuando vea el nombre de 2,4-dinitrofenilhidrazina y recuerde galletas y café, cuando vea piedras... Perdón, rocas, cuando vea el efecto magneto calórico gigante... Nunca terminaré de agradecerles todo lo que me han enseñado.

DEDICATORIA

A mis papás y mi hermano. Los amo.

” Every form of art is another way of seeing the world. Another perspective, another window. And science that’s de most spectacular window of all. You can see the entire universe from there. ”
-Claudia Gray

Acrónimos

Acrónimo	Significado en Inglés	Traducción al español
BEST	Bivariate EnSo Time Series	Serie de Tiempo Bivariada de El Niño/Oscilación del Sur
CHIRPS	Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data	Grupo de Peligros Climáticos de Precipitación por Infrarrojo con datos de Estaciones
CMAP	(Climate Prediction Center CPC) Merged Analysis of Precipitation	(Centro de Predicción Climática) Análisis Combinado de Precipitación
ENSO	El Niño-Southern Oscillation	El Niño-Oscilación del Sur
GPCC	Global Precipitation Climatology Centre	Centro Climatológico Global de Precipitación
GPCP	Global Precipitation Climatology Project	Proyecto Climatológico Global de Precipitación
NAM	North American Monsoon	Monzón de Norteamérica
ONI	Oceanic Niño Index	Índice Oceánico de El Niño
SOI	Southern Oscillation Index	Índice de la Oscilación del Sur

A lo largo de la tesis se optó por utilizar los acrónimos en inglés.

Índice general

Índice de figuras	IX
Índice de cuadros	XIII
1. Introducción	1
1.1. Marco Teórico	1
1.1.1. El Monzón de Norteamérica (NAM)	1
1.1.2. El Niño-Oscilación del Sur (ENSO)	3
1.2. Antecedentes	6
1.2.1. Fuentes de Humedad en la región del NAM	6
1.2.2. Efectos de ENSO en la región del Monzón de Norteamérica	8
1.3. Objetivos de la Tesis	12
2. Metodología y Datos	13
2.1. Datos	13
2.2. Metodología	16
3. Resultados	19
3.1. Efecto de eventos ENSO en la Precipitación del NAM	19
3.2. Flujos de Humedad Asociados a las Anomalías de Precipitación	32
4. Resumen y Conclusiones	37
Apéndices	39
A. Eventos El Niño y La Niña para los periodos de tiempo de 1981-2013 y 1981-2014 (33 y 34 años respectivamente)	41
B. Anomalías de precipitación para eventos El Niño y La Niña	43
Bibliografía	61

Índice de figuras

1.1.	Promedio de la precipitación de junio a septiembre de 1948-2010. a) muestra el promedio de precipitación (mm) y b) el porcentaje de contribución a la precipitación total anual. Tomada de: de Carvalho (2016).	2
1.2.	Esquema de las condiciones Normales, y las condiciones de El Niño y La Niña. Modificado de: McPhaden (2015).	3
1.3.	Esquema de la Circulación de Walker en a) condiciones normales, b) El Niño y c) la Niña. Modificado de: Di Liberto (2014).	5
1.4.	Promedio de precipitación para Arizona y Nuevo Mexico de enero a diciembre del 2010. Tomado de Lindsey (2011).	6
1.5.	Flujo promedio y masas de aire húmedo para a) invierno y b) verano. Tomado de Crimmins (2006).	6
1.6.	Comportamiento del sistema de alta presión a 500 hPa, a lo largo de a) mayo, b) junio, c) julio y c) agosto. Para el periodo de 1968-1996. Tomada de: NWS (2011).	7
1.7.	Esquema de circulación a 700 hPa de las surgencias del Golfo de California. Si una surgencia es “húmeda” o “seca” depende de la posición del anticiclón monzónico de niveles mayores al momento de que ocurra la surgencia. Si el eje de la dorsal está en el este, la situación es más húmeda de lo normal en el norte del NAM; si la dorsal se encuentra hacia el oeste entonces la situación es más seca de lo normal en la región. Tomado de Chang et al. (2005).	8
1.8.	Esquema de los efectos de eventos El Niño en el mundo. Tomado de: NOAA (2011).	9
1.9.	Esquema de los efectos de eventos La Niña en el mundo. Tomado de: NOAA (2011).	10
1.10.	Esquema del comportamiento de la corriente en chorro en eventos El Niño (superior) y La Niña (inferior). Tomado de: Adamec (2010).	12
2.1.	Esquema de una partícula que realiza un ciclo de evaporación - precipitación. La línea gruesa representa la superficie y el eje vertical la altura sobre la misma. La partícula se encuentra encerrada en un círculo y su trayectoria es marcada con una flecha. La variación de humedad de la partícula está representada por la línea marcada con una q . La humedad de la partícula aumenta en la primera mitad en donde $\frac{dq}{dt} > 0$, es decir, hay evaporación. Posteriormente conforme la partícula se eleva la “ q ” de la partícula disminuye $\frac{dq}{dt} < 0$ es decir, hay precipitación. Modificado de: Stohl and James (2004).	15
2.2.	Zona de estudio, el área sombreada representa los límites del NAM que fueron utilizado en este trabajo.	16

3.1.	Anomalías de precipitación para la primavera en eventos El Niño, utilizando el índice BEST con cuatro bases de precipitación.	22
3.2.	Anomalías de precipitación para el verano en eventos El Niño, utilizando el índice BEST con cuatro bases de precipitación.	23
3.3.	Anomalías de precipitación para el otoño en eventos El Niño, utilizando el índice BEST con cuatro bases de precipitación.	24
3.4.	Anomalías de precipitación para el invierno en eventos El Niño, utilizando el índice BEST con cuatro bases de precipitación.	25
3.5.	Anomalías de precipitación para la primavera con eventos La Niña, utilizando el índice BEST con cuatro bases de precipitación.	28
3.6.	Anomalías de precipitación para el verano para eventos La Niña, utilizando el índice BEST con cuatro bases de precipitación.	29
3.7.	Anomalías de precipitación para el otoño para eventos La Niña, utilizando el índice BEST con cuatro bases de precipitación.	30
3.8.	Anomalías de precipitación para el invierno para eventos La Niña, utilizando el índice BEST con cuatro bases de precipitación.	31
3.9.	Promedio mensual del agregado de E-P durante los diez días anteriores a la llegada de las partículas a la región del NAM durante a) diciembre, b) enero y c) febrero. Periodo de estudio 1981-2014 . . .	32
3.10.	Flujos de humedad asociados a las anomalías de precipitación encontradas, para el invierno con eventos El Niño. a) Diciembre, b) Enero, c) Febrero Velocidad de vientos cada $5m/s$	34
3.11.	Flujos de humedad asociados a las anomalías de precipitación encontradas, para el invierno con eventos La Niña-El Niño. a) Diciembre, b) Enero, c) Febrero	35
B.1.	Anomalías de precipitación para primavera con eventos El Niño, utilizando el índice SOI con cuatro bases de precipitación.	44
B.2.	Anomalías de precipitación para verano con eventos El Niño, utilizando el índice SOI con cuatro bases de precipitación.	45
B.3.	Anomalías de precipitación para otoño con eventos El Niño, utilizando el índice SOI con cuatro bases de precipitación.	46
B.4.	Anomalías de precipitación para invierno con eventos El Niño, utilizando el índice SOI con cuatro bases de precipitación.	47
B.5.	Anomalías de precipitación para primavera con eventos El Niño, utilizando el índice ONI con cuatro bases de precipitación.	48
B.6.	Anomalías de precipitación para verano con eventos El Niño, utilizando el índice ONI con cuatro bases de precipitación.	49
B.7.	Anomalías de precipitación para otoño con eventos El Niño, utilizando el índice ONI con cuatro bases de precipitación.	50
B.8.	Anomalías de precipitación para invierno con eventos El Niño, utilizando el índice ONI con cuatro bases de precipitación.	51
B.9.	Anomalías de precipitación para primavera con eventos La Niña, utilizando el índice SOI con cuatro bases de precipitación.	52
B.10.	Anomalías de precipitación para verano con eventos La Niña, utilizando el índice SOI con cuatro bases de precipitación.	53
B.11.	Anomalías de precipitación para otoño con eventos La Niña, utilizando el índice SOI con cuatro bases de precipitación.	54
B.12.	Anomalías de precipitación para invierno con eventos La Niña, utilizando el índice SOI con cuatro bases de precipitación.	55

B.13. Anomalías de precipitación para primavera con eventos La Niña, utilizando el índice ONI con cuatro bases de precipitación.	56
B.14. Anomalías de precipitación para verano con eventos La Niña, utilizando el índice ONI con cuatro bases de precipitación.	57
B.15. Anomalías de precipitación para otoño con eventos La Niña, utilizando el índice ONI con cuatro bases de precipitación.	58
B.16. Anomalías de precipitación para invierno con eventos La Niña, utilizando el índice ONI con cuatro bases de precipitación.	59

Índice de cuadros

3.1. Eventos El Niño mayores a una desviación estándar entre 1981-2015	19
3.2. Eventos La Niña mayores a una desviación estándar entre 1981-2015	26
A.1. Eventos El Niño mayores a una desviación estándar entre 1981-2014	41
A.2. Eventos El Niño mayores a una desviación estándar entre 1981-2013	41
A.3. Eventos La Niña mayores a una desviación estándar entre 1981-2014	41
A.4. Eventos La Niña mayores a una desviación estándar entre 1981-2013	42

Capítulo 1

Introducción

En este capítulo se exponen los conceptos claves alrededor de los cuales se desarrolla el trabajo, así como los antecedentes sobre los cuales se plantean los objetivos a cumplir.

1.1. Marco Teórico

1.1.1. El Monzón de Norteamérica (NAM)

La palabra monzón proviene del árabe "mausim" que significa estación, haciendo referencia al cambio estacional de los vientos dominantes en una región, influyendo así en la precipitación.

Al noroeste de México y suroeste de Estados Unidos, se presenta un fenómeno llamado: El monzón de Norteamérica (NAM por sus siglas en inglés). En el pasado también era llamado "Monzón de Arizona", o "Monzón Mexicano" según el área geográfica pero hoy en día se utiliza una terminología estándar. El NAM se manifiesta produciendo un aumento en la precipitación, pasando de una temporada seca (junio) a una temporada lluviosa (julio), que persiste hasta mediados de septiembre (Adams and Comrie, 1997).

En la Figura 1.1, se muestra el promedio de la precipitación de junio a septiembre para el periodo de tiempo de 1948-2010. En las figuras se presenta dicho promedio en a) milímetros y b) en porcentaje de contribución a la precipitación total anual.

Douglas et al. (1993) utilizando lo que llamaron el índice monzónico (IM), definido como la proporción de lluvia que cae durante el período de tres meses de julio a septiembre (normalmente los tres meses más lluviosos) con respecto a la precipitación media anual, encontraron que la región que rodea el sur del Golfo de California poseía el mayor IM con valores entre 70 % y 80 %. Dichos valores se extienden a lo largo del eje de la Sierra Madre Occidental (SMO) hacia el sureste de Arizona en donde los valores no exceden el 60 % como se observa en la Figura 1.1.b. Usualmente la región del monzón se define en las zonas en donde se recibe aproximadamente el 50 % de la precipitación total anual en los meses de julio, agosto y septiembre Figura 1.1.b (Adams, 1997).

En cuanto al promedio total de precipitación, en México, durante los meses de junio a septiembre el promedio es de 550 mm (Figura 1.1a), a lo largo de la SMO, extendiéndose entre Nayarit y Sonora. Una menor cantidad de precipitación de aproximadamente 200 a 350 mm, caen al noroeste de México, sur de Arizona y Utah (Wallén, 1955; de Carvalho, 2016).

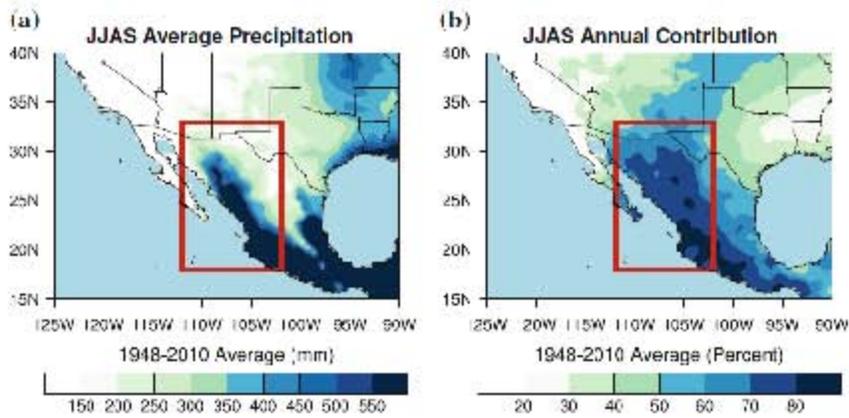


Figura 1.1: Promedio de la precipitación de junio a septiembre de 1948-2010. a) muestra el promedio de precipitación (mm) y b) el porcentaje de contribución a la precipitación total anual. Tomada de: de Carvalho (2016).

Es decir que a pesar de que el NAM afecta grandes áreas del suroeste de Estados Unidos como Arizona, Nuevo México y Colorado, la precipitación está centrada sobre el noroeste de México sobre la SMO, Sinaloa, Durango, Sonora y Chihuahua (Adams, 1997; Douglas et al., 1993). El comienzo del monzón varía como función de la latitud. En México el comienzo es a finales de mayo y principios de junio; mientras que en el suroeste de Estados Unidos, comienza a principios de julio (Vera et al., 2006). En general el máximo de precipitación ocurre de julio a agosto y terminando en septiembre; primero en el suroeste de Estados Unidos y posteriormente el noroeste de México.

El NWS (2016) menciona que hasta finales de la década de los setenta, existía un gran debate acerca de si el NAM, era un monzón verdadero puesto que no cumple con todos los requisitos propuestos por Ramage (1971) para definir un monzón. Sin embargo gracias a investigaciones como el Southwest Area Monsoon Project (SWAMP) (Meitin et al., 1991), se estableció que sí había la presencia de un auténtico monzón en parte de México y Estados Unidos; caracterizado por un cambio de viento y precipitación. Adicionalmente en el 2004, se realizó el North American Monsoon Experiment (NAME) (Gochis et al., 2004; Higgins and Gochis, 2007), cuyo objetivo era mejorar la descripción del NAM para así poder mejorar la habilidad de predicción a diferentes escalas temporales, apoyando también la idea de que el NAM es un monzón verdadero, aunque no tan fuerte como el que se presenta en la India. Este experimento confirmó la ocurrencia de un cambio de vientos estacional sobre el Golfo de California, el cual influye en la precipitación de las zonas ya mencionadas.

A continuación se describirá el fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur, en base al cual, éste trabajo buscará describir su impacto en la precipitación de la región del NAM.

1.1.2. El Niño-Oscilación del Sur (ENSO)

ENSO, es el fenómeno climático a escala global más importante, que tiene un efecto en la precipitación de varias zonas del mundo (Ropelewski and Halpert, 1987). Este fenómeno, afecta ecosistemas, agricultura, ciclones tropicales, sequías, inundaciones entre otros (Cai et al., 2014). Se considera que El Niño y La Niña son fenómenos que ocurren de manera natural cuando el Océano Pacífico y la atmósfera suprayacente cambian de su estado normal debido a una interacción océano atmósfera, sin embargo ha habido una mayor ocurrencia de eventos El Niño en las últimas décadas (Timmermann et al., 1999). Fue Bjerknes (1968) quien notó que había una relación entre los vientos alisios y los gradientes de temperatura del mar en el Pacífico.

Para comprender a El Niño y La Niña, es necesario conocer las condiciones normales en el Pacífico, las cuales se manifiestan cuando los vientos alisios cerca del ecuador acumulan agua cálida en el Pacífico Oeste, provocando un afloramiento de agua fría que mantiene el Pacífico Centro y Este relativamente frío como se muestra en la Figura 1.2.b. Debido a esto, hay más eventos de tormentas en el Pacífico Oeste y menos en el Este (NWS, 2005).

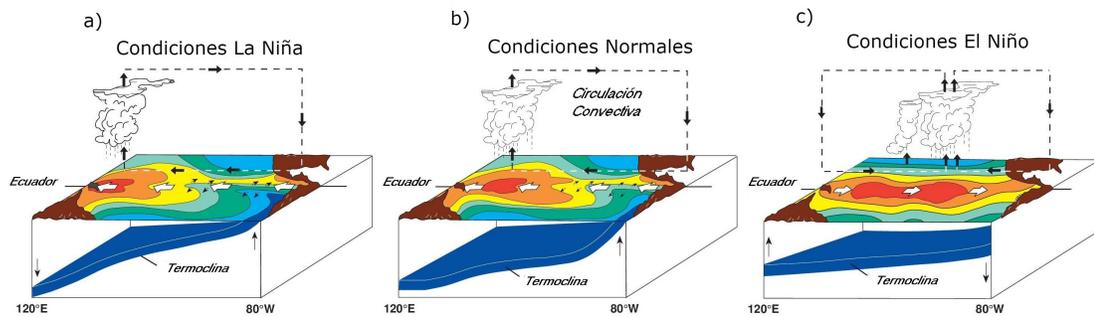


Figura 1.2: Esquema de las condiciones Normales, y las condiciones de El Niño y La Niña. Modificado de: McPhaden (2015).

Estos patrones reflejan un movimiento de este a oeste en bajos niveles. Posteriormente, por procesos de convección ocurre un ascenso de aire cálido y después se genera un movimiento de oeste a este en niveles más altos para terminar con un descenso de aire frío en el Pacífico Este (Lau and Yang, 2003). En general este movimiento refleja la Circulación de Walker (Walker and Bliss, 1932) que se muestra en la Figura 1.3.a.

En la Figura 1.2.b se aprecia que debajo de la superficie del mar, existe una capa profunda de agua cálida en el Pacífico Oeste, separada del agua fría por la termoclina, la cual es más profunda en el oeste y más superficial en el este.

Los eventos El Niño, están asociados a patrones en donde la temperatura superficial del mar en el Pacífico Este y Centro es más cálida (Figura 1.3.c). El Niño se corresponde con la fase de la Oscilación del Sur en donde los vientos alisios se debilitan o incluso cambian de sentido, y la presión es menor sobre la región

del Pacífico Este y mayor en el oeste, alterando la Circulación de Walker como se muestra en la Figura 1.3.b. Las aguas anormalmente cálidas del Pacífico central están asociadas a una menor inclinación de la termoclina. A pesar de que no todos los eventos El Niño son iguales, de acuerdo con Ropelewski and Halpert (1986), existen patrones de precipitación ligados a ENSO. En específico, para los meses de octubre a marzo se presenta precipitación por encima de lo normal asociada a ENSO para el sureste de Estados Unidos y norte de México.

En los eventos La Niña, se presentan patrones de temperatura superficial del mar más fría en el Pacífico Este y Centro. La Niña se corresponde con la fase de la Oscilación del Sur, en donde los vientos alisios se intensifican y hay una mayor presión en el Pacífico Este y menor en el Pacífico Oeste. En éste caso la Circulación de Walker se intensifica, generando así una mayor convección en el Pacífico Oeste (Figura 1.3.c).

Conforme los vientos alisios se intensifican, el agua cálida es confinada al Pacífico Oeste, provocando que la temperatura superficial del mar sea más fría a lo largo del Pacífico Centro y Este. (Figura 1.2.a). En el caso de la termoclina, ésta se mueve hacia la superficie en el oeste (Holton et al., 1989).

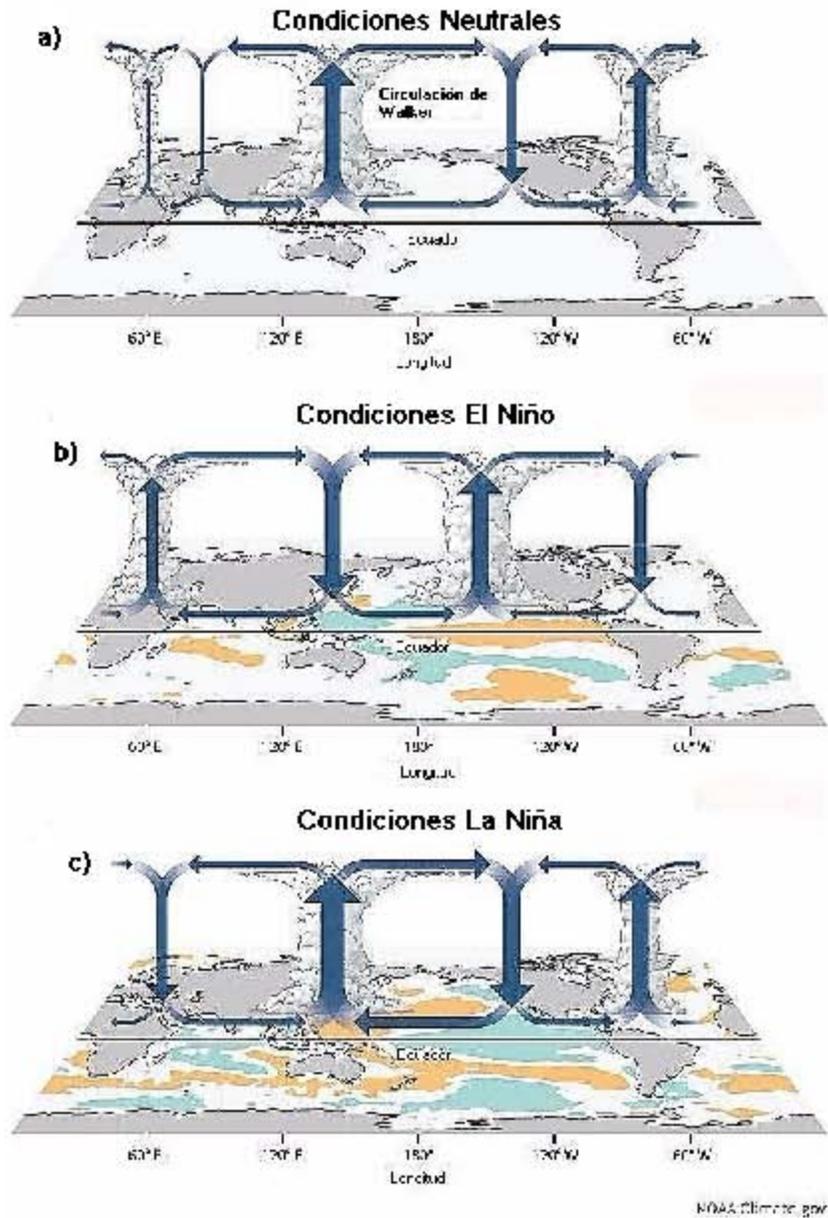


Figura 1.3: Esquema de la Circulación de Walker en a) condiciones normales, b) El Niño y c) la Niña. Modificado de: Di Liberto (2014).

Vernon (2003) Señala que usualmente las anomalías de precipitación provocadas por La Niña, aunque suelen durar más (entre uno a tres años), son menos fuertes comparadas con las de El Niño que duran de nueve a quince meses. Típicamente las transiciones de El Niño a La Niña son más rápidas que de La Niña a El Niño. En general los eventos tanto de El Niño y La Niña son más intensos en el invierno boreal, puesto que es un momento en donde las temperaturas superficiales del mar están en su máximo global. El aumento de calidez oceánica promueve la convección, la cual altera la corriente en chorro, aumentando la precipitación al sur de Estados Unidos (NCSU, 2017).

1.2. Antecedentes

1.2.1. Fuentes de Humedad en la región del NAM

En la Figura 1.4 se muestra que la región del NAM recibe la mayoría de su precipitación anual durante dos estaciones, verano (especialmente al sur del NAM) e invierno (el norte de la región del NAM, que también recibe una importante cantidad de precipitación en invierno).

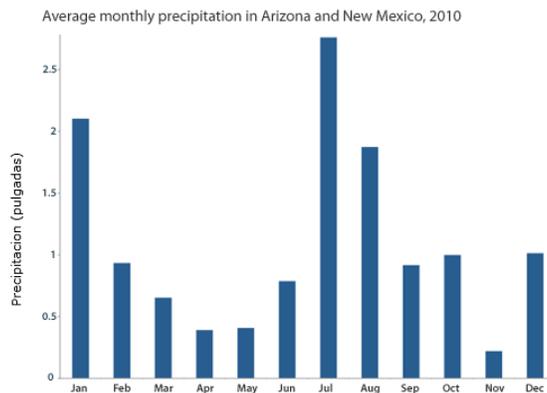


Figura 1.4: Promedio de precipitación para Arizona y Nuevo Mexico de enero a diciembre del 2010. Tomado de Lindsey (2011).

Crimmins (2006) menciona que la precipitación de invierno es producida por sistemas de baja presión que advectan humedad desde el Océano Pacífico produciendo lluvia y nieve, siendo estos provocados por la corriente en chorro subtropical (Figura 1.5.a). La precipitación del verano es producida por la presencia de un sistema de alta presión en el Pacífico Este, procesos de convección, la alta incidencia de radiación solar y el transporte de vapor de agua del Pacífico Este (Figura 1.5.b).

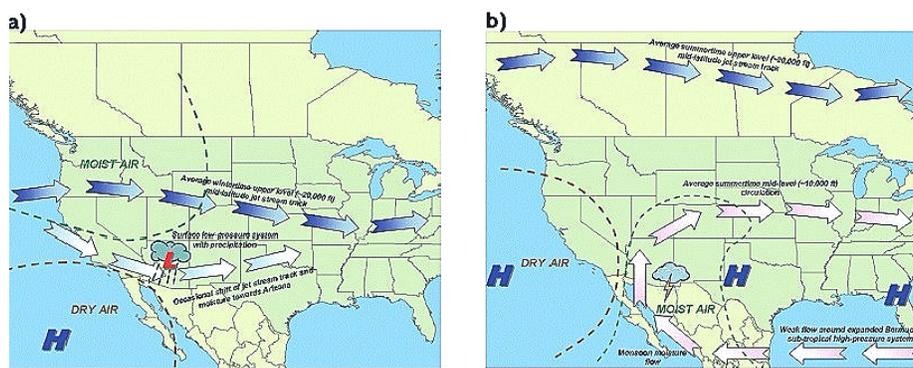


Figura 1.5: Flujo promedio y masas de aire húmedo para a) invierno y b) verano. Tomado de Crimmins (2006).

Determinar dónde se origina el vapor de agua que produce la precipitación en una región es un problema complicado. Sin embargo, es de vital importancia para entender la dinámica de la precipitación en dicha región.

En la Figura 1.6 se expone la altura geopotencial a 500 milibares de: mayo, junio, julio y agosto para el periodo de 1968-1996.

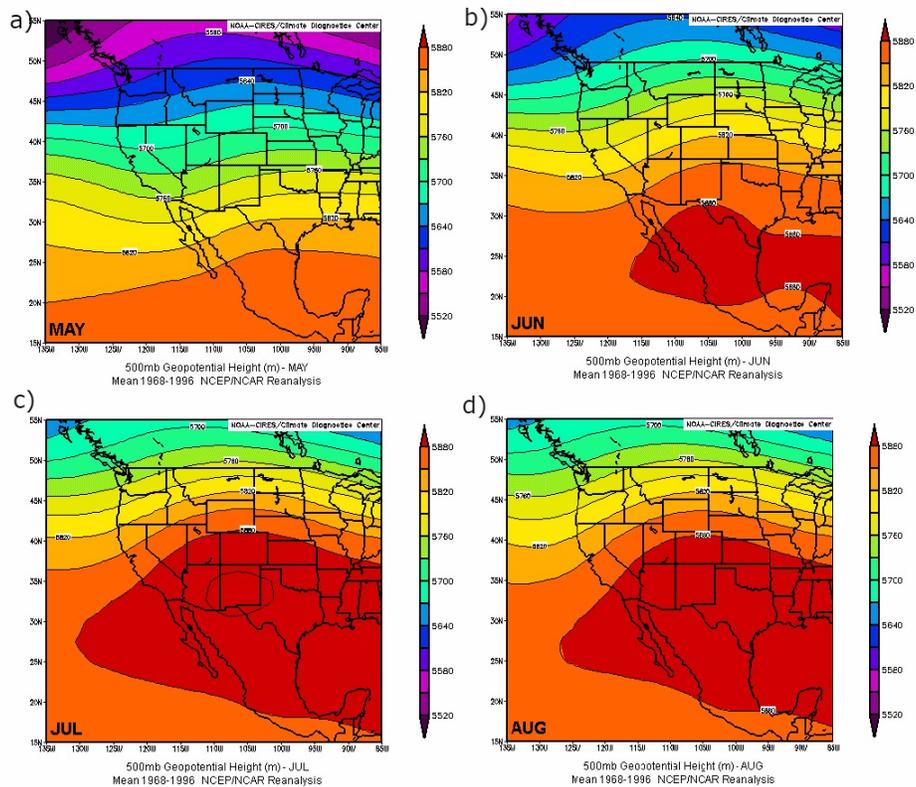


Figura 1.6: Comportamiento del sistema de alta presión a 500 hPa, a lo largo de a) mayo, b) junio, c) julio y c) agosto. Para el periodo de 1968-1996. Tomada de: NWS (2011).

En mayo, el flujo de vientos en niveles medios se dirige de oeste a este, en Nuevo México, sur de Arizona y en el norte de México (Figura 1.5.a).

Durante junio conforme el sistema de alta presión de Bermuda (usualmente centrado en el Atlántico este) se expande y desplaza hacia el noroeste de México, se desarrolla una baja térmica debido al contraste de temperatura entre océano y continente. Ambas características desencadenan el inicio del NAM (Figura 1.6.b), llevando la banda de lluvias hacia el norte sobre la SMO.

En julio la dorsal migra hacia el norte provocando que los vientos cambian de dirección (oeste-este) al norte de la dorsal (Figura 1.6.c), permitiendo que haya un flujo de aire húmedo desde el Pacífico Este, el Golfo de California y el Golfo de México hacia el continente (Adams and Comrie, 1997; Crimmins, 2006).

Estudios de Grantz et al. (2007) muestran que el movimiento hacia el norte de la dorsal, está asociado a un monzón más húmedo sobre el suroeste de los Estados Unidos. En años donde la dorsal se encuentra más al sur, el transporte de humedad se inhibe. Las fuentes de humedad del NAM han sido ampliamente estudiadas, sin embargo hay debates sobre qué tanta humedad aporta el Golfo de México al monzón, debido a que la SMO actúa como una barrera que impide que la humedad de bajos niveles llegue a la región (Douglas et al., 1993).

Con ayuda de modelos Schmitz and Mullen (1996) han mostrado que el Golfo de México puede aportar humedad en niveles altos (arriba de 700 milibares) procedentes del Caribbean Low Level Jet (CLLJ por sus siglas en inglés), mientras que la humedad en niveles bajos (debajo de 700 milibares) proviene del Golfo de California debido a las surgencias, las cuales son ondas atrapadas en la costa que inicialmente fueron ondas del este y que se propagan al noreste a lo largo del Golfo de California. En la Figura 1.7, se expone un esquema que explica las surgencias en Arizona, así como el comportamiento que tendrán dependiendo de la posición del eje de la dorsal.

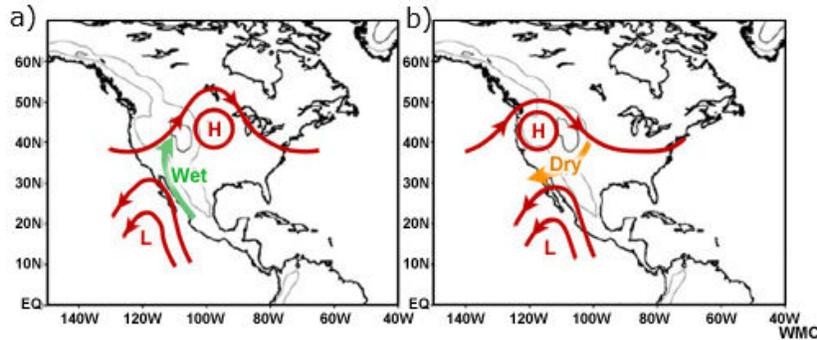


Figura 1.7: Esquema de circulación a 700 hPa de las surgencias del Golfo de California. Si una surgencia es “húmeda” o “seca” depende de la posición del anticiclón monzónico de niveles mayores al momento de que ocurra la surgencia. Si el eje de la dorsal está en el este, la situación es más húmeda de lo normal en el norte del NAM; si la dorsal se encuentra hacia el oeste entonces la situación es más seca de lo normal en la región. Tomado de Chang et al. (2005).

El Golfo de California aporta humedad al continente mediante brisas marinas, circulación alrededor de la SMO y las surgencias del golfo (Douglas et al., 1993; Adams and Comrie, 1997; Vera et al., 2006) caracterizadas por tener fuertes vientos del sur-sureste (Figura 1.7), una disminución de temperatura y un aumento de humedad al sur de Arizona (Higgins et al., 2004; Douglas et al., 1993). En resumen; se puede decir que las fuentes de humedad del NAM son: El Golfo de California y el Pacífico Este tropical a niveles bajos, menores a 850 mb y el Golfo de México junto con el Mar Caribe en niveles altos (Adams and Comrie, 1997; Hu and Dominguez, 2015).

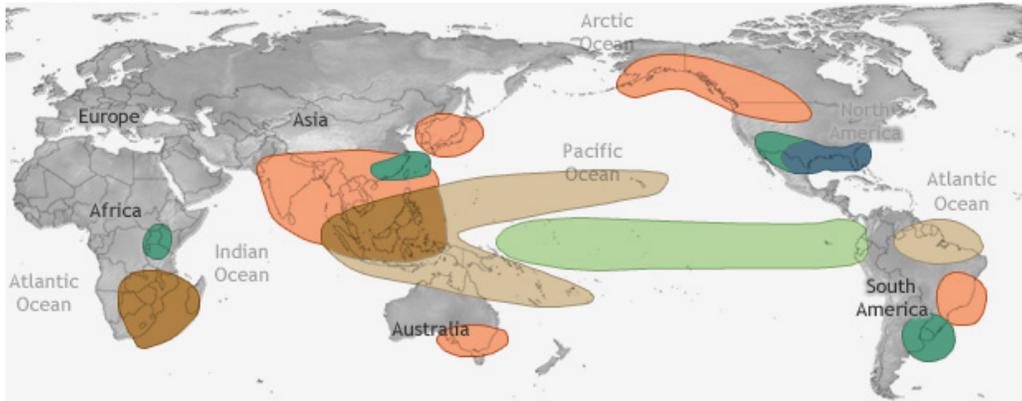
1.2.2. Efectos de ENSO en la región del Monzón de Norteamérica

Se tiene una idea general del efecto que tienen los eventos ENSO en la precipitación global. En las Figuras 1.8 y 1.9, se observan los patrones que ocurren con eventos El Niño y La Niña respectivamente, para el invierno y el verano. Los efectos de El Niño y La Niña se muestran más fuertes, como ya se mencionó, en el invierno boreal.

En la región del NAM, en general la fase de El Niño está asociada a precipitación por arriba del promedio en el suroeste de Estados Unidos a lo largo de los meses de invierno, y en verano parece no tener influencia. En cambio La Niña se relaciona con precipitaciones por debajo de lo normal en el invierno y tampoco se muestra ninguna señal durante el verano en la zona.

EL NIÑO CLIMATE IMPACTS

December-February



June-August

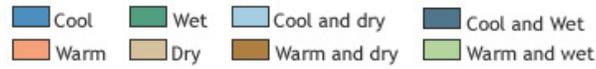
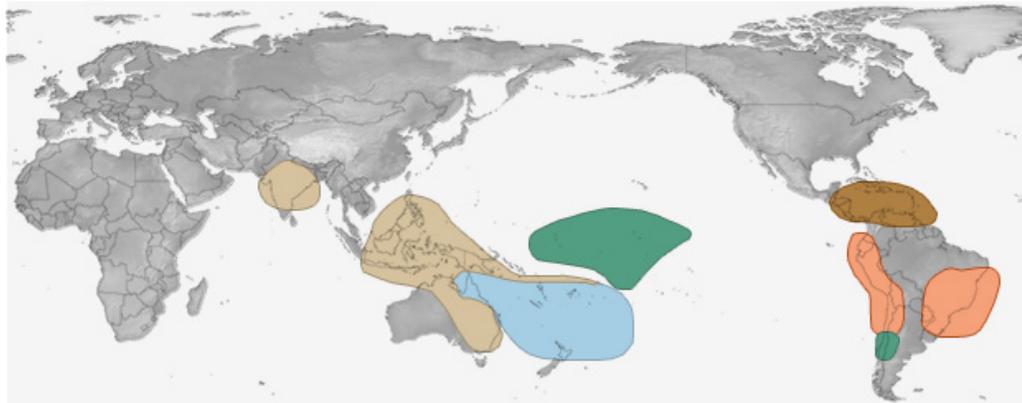
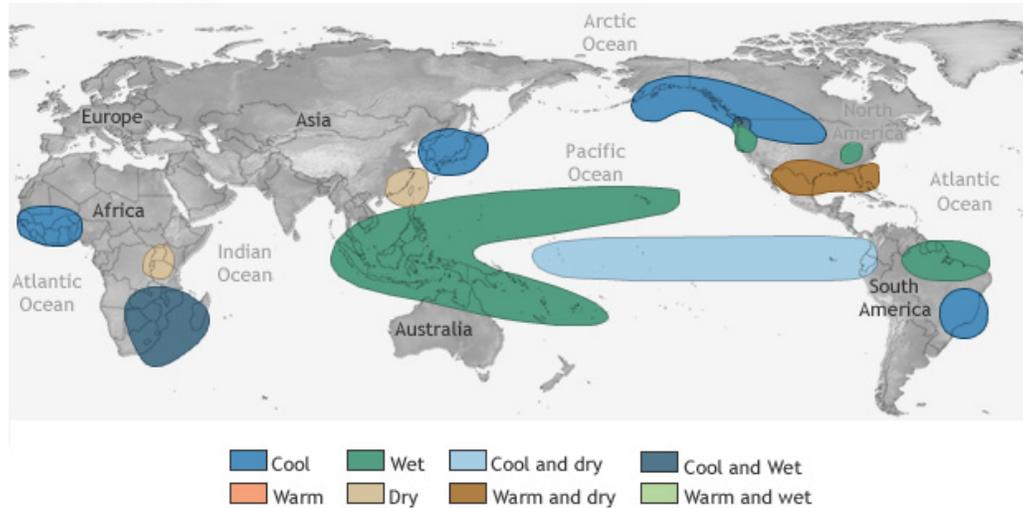


Figura 1.8: Esquema de los efectos de eventos El Niño en el mundo. Tomado de: NOAA (2011).

LA NIÑA CLIMATE IMPACTS

December-February



June-August

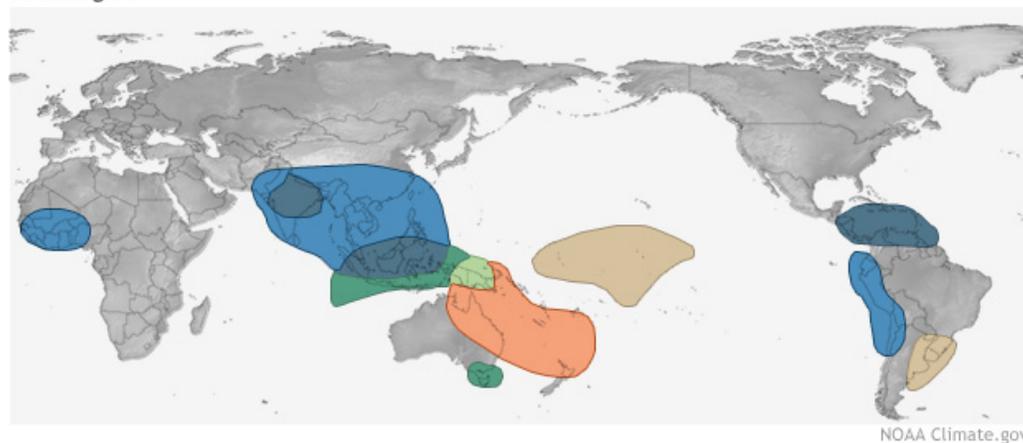


Figura 1.9: Esquema de los efectos de eventos La Niña en el mundo. Tomado de: NOAA (2011).

Como se ha mencionado, una parte importante de la precipitación del al norte de la región del NAM ocurre durante el invierno cuando los eventos ENSO suelen afectar el comportamiento de las corrientes en chorro. Las corrientes en chorro son corrientes de aire que se extienden miles de kilómetros, y se encuentran cerca del nivel de la tropopausa, y son parte importante de los sistemas dinámicos de la tropósfera puesto que tienen un papel importante en la formación de ciclones (Holton and Hakim, 2012). Conforme las aguas del Pacífico se calientan en un evento El Niño, el aire cerca de la superficie también se caliente y se eleva, formando tormentas. Éste aire cálido aunado a los vientos alisios débiles, ayudan a intensificar la corriente en chorro subtropical del oeste, el cual obtiene su fuerza debido a las diferencias de temperatura norte-sur (McLamb and Davis, 2015).

ENSO, puede llevar cambios en el inicio o disparo del NAM. Grantz et al. (2007) teorizan que condiciones océano-atmósfera de gran escala, en particular El Niño, es responsable del retraso del NAM, causando mayor precipitación en el invierno a lo largo del suroeste de Estados Unidos, resultando en mayor humedad del

suelo en primavera y verano. Una mayor cantidad de nieve en el invierno, necesita de mayor energía para derretirse y posteriormente evaporar para el verano. Esto retrasa el calentamiento de la superficie y la formación de un contraste de temperaturas entre el continente y el océano necesarios para el desarrollo de patrones de circulación monzónicos, provocando así, el retraso de la aparición del NAM, dicho retraso cambia la temporalidad de la precipitación, causando una precipitación menor de lo normal en julio y por encima de lo normal en septiembre.

Magaña et al. (2003) finalmente menciona que no se conoce con exactitud el impacto que tiene ENSO sobre la región del NAM, aunque el aumento de estos eventos durante la década de los noventa parece que dieron lugar a reducción en la disponibilidad de agua, en particular en el norte de México, produciendo pérdidas en varias actividades económicas. Cabe mencionar que los efectos de La Niña, al no ser tan fuertes como los de su contraparte, generan patrones menos claros, y su efecto no ha sido tan estudiado.

En la Figura 1.10 se muestra la modificación de las corrientes en chorro subtropical y polar durante un evento El Niño y La Niña. Durante El Niño, se observa que la entrada de la corriente en chorro subtropical se encuentra en la parte norte de México (Figura 1.10.a). Dicha modificación hace que los sistemas de baja presión sean más intensos de lo normal a lo largo del este del Pacífico Norte, generando como consecuencia, inviernos con mayor precipitación.

Para los eventos de La Niña, la corriente en chorro subtropical se encuentra desplazada más al norte que en eventos El Niño, sobre el este del Pacífico Norte. Y la entrada de éste ocurre al noroeste de Estados Unidos/ sureste de Canadá (Figura 1.10.b). Esta configuración desviaría los sistemas de bajas presiones hacia el norte de manera que sobre la región del NAM llovería menos de lo normal.

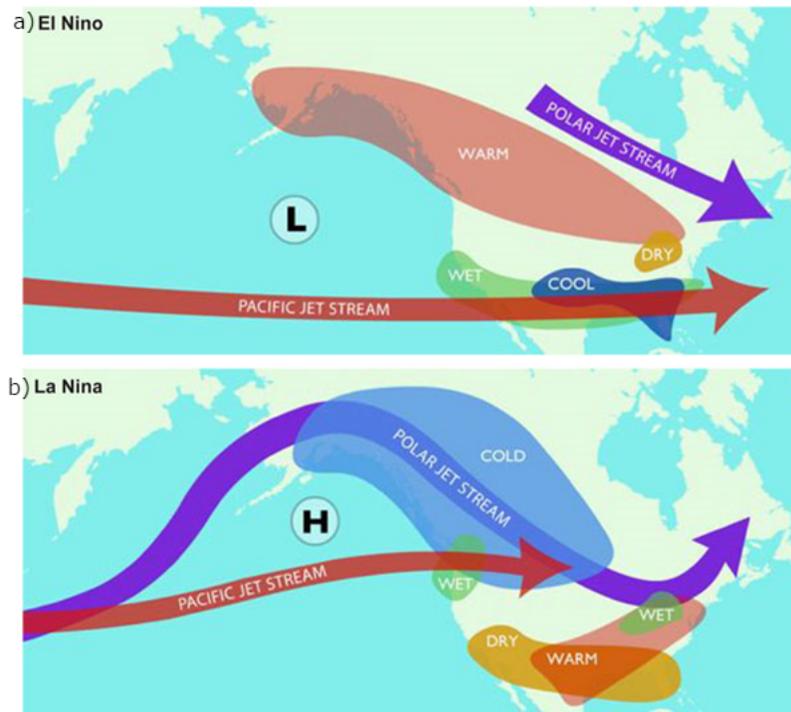


Figura 1.10: Esquema del comportamiento de la corriente en chorro en eventos El Niño (superior) y La Niña (inferior). Tomado de: Adamec (2010).

1.3. Objetivos de la Tesis

Ante la importancia que tiene la precipitación en la zona desértica y cálida del monzón de Norteamérica; se planteó como objetivo principal, el determinar la influencia de ENSO en la precipitación de la región del NAM. Éste objetivo principal, se divide en una serie de objetivos específicos:

- Estudiar las anomalías de precipitación relacionadas a eventos ENSO fuertes en la zona del NAM
- Determinar cuáles de ellas son estadísticamente significativas
- Analizar los transportes de humedad relacionados con las anomalías significativas encontradas, para poder dilucidar posibles mecanismos físicos implicados.

Capítulo 2

Metodología y Datos

En éste capítulo se describen los datos utilizados para alcanzar los objetivos mencionados anteriormente. Así como la descripción de la metodología utilizada.

2.1. Datos

(a) Precipitación

Se han utilizado un total de cuatro bases de precipitación con datos de promedios mensuales: CHIRPS, CMAP, GPCC y GPCP, las cuales poseen las siguientes características.¹

El CMAP (Climate Prediction Center (CPC) Merged Analysis of Precipitation), es una base de datos con una malla de $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ de latitud y longitud, con un periodo temporal disponible de 1979-2015. Se trata de una base de datos que fue construida a partir de mediciones en superficie, barcos, boyas y de satélites. Posee una cobertura global, aunque la calidad de los datos es mejor en los trópicos y disminuye hacia las zonas polares. En estudios realizados para ENSO, el comportamiento obtenido es similar al encontrado en otros estudios pero con un mayor detalle, particularmente sobre los océanos (Xie and Arkin, 1997). La base es recomendada para identificar y cuantificar la variabilidad espacial y temporal de la precipitación en los trópicos (Arkin et al., 2016).

El GPCP (Global Precipitation Climatology Project), forma parte del Global Energy and Water Cycle Experiment (GEWEX), que a su vez es una de las componentes del World Climate Research Program (WCRP), cuyo objetivo es proveer una serie larga de tiempo y una resolución fina para el análisis de precipitación global (Adler et al., 2003). Los datos proceden de estaciones de precipitación, satélites y sondeos que se unieron para estimar una precipitación mensual con cobertura global en una malla de $2,5^\circ \times 2,5^\circ$, con una serie de tiempo de 1979-octubre 2015 (Pendergrass and NCAR, 2016). Entre las bases de datos que combinan mediciones en tierra y satelitales CMAP y GPCP son de las más reconocidas dentro de la comunidad meteorológica (Wang et al., 2016).

¹Los datos de CMAP, GPCC y GPCP fueron provistos por la NOAA/OAR/ESRL PSD, Boulder, Colorado, USA, del sitio <http://www.esrl.noaa.gov/psd/>
Los datos CHIRPS fueron provistos del sitio <ftp://ftp.chg.ucsb.edu/pub/org/chg/products/CHIRPS-2.0/global.daily/netcdf/p25/>

El GPCC (Global Precipitation Climatology Center), brinda un análisis de observaciones en tierra, cuyo número de observatorios ha ido creciendo hasta poseer más de 85,000 estaciones alrededor del mundo. Su tarea principal es el análisis de precipitación mensual en tierra a partir de medidas in situ (Schneider et al., 2014). Le serie de tiempo disponible es de 1901-2013 en una malla de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$. GPCC se ha recomendado para estudios globales y regionales de balance de agua (Schneider et al., 2016; NCAR, 2015).

La base de datos CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed with Station data), posee información de satélites y estaciones que cubren una buena porción de masa continental así como una alta resolución. Es una base con datos de más de 30 años, de 1981-presente; con una cobertura cuasi-global. El producto utilizado para éste trabajo posee una malla $0,25^\circ \times 0,25^\circ$. CHIRPS fue creado para tener una base confiable, completa y actualizada para análisis tales como monitoreo estacional (Funk et al., 2015).

(b) **Viento en Altura**

Para determinar las anomalías de la corriente en chorro subtropical asociadas a eventos ENSO, se utilizaron los datos con el promedio mensual del viento zonal y meridional a 300 milibares de altura en un periodo de tiempo de 1981-2014, con una malla de $1^\circ \times 1^\circ$, obtenido del reanálisis global ERA-Interim (Dee et al., 2011).

(c) **Flujo de Vapor de Agua**

Para determinar los aportes de humedad para la región del NAM, se utilizaron las salidas cada tres horas del modelo Lagrangiano FLEXPART (Stohl et al., 1998) en el tiempo disponible desde 1981 a 2014. Aunque el modelo fue diseñado para el estudio de dispersión de contaminantes, también ha sido adaptado para diagnosticar de dónde proviene la humedad que provoca la precipitación en ciertos lugares (Stohl and James, 2004, 2005). Éste modelo ha sido utilizado con éxito para diagnosticar de donde procede la humedad de regiones como: Centroamérica (Durán-Quesada et al., 2010), el Sahel (Nieto et al., 2006) o la India (Ordóñez et al., 2012).

El algoritmo de FLEXPART, se basa en la división homogénea de la atmósfera en un número de N "partículas" de masa igual y constante, las cuales se mueven con el viento. Para poder determinar las fuentes de humedad, dichas partículas ofrecen parámetros tales como la localización exacta de cada una en el tiempo y la humedad específica que presentan. Los únicos cambios posibles en la humedad de la partícula son por medio de la evaporación e y la precipitación p . En la ecuación 2.1, $e - p$, representa la tasa neta de cambio de vapor de agua en la partícula a lo largo de su trayectoria, m_p es la masa de la partícula y q es la humedad específica.

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

En la Figura 2.1, se muestra un esquema de la trayectoria de una partícula en un ciclo de evaporación ($e - p > 0$)-precipitación ($e - p < 0$). A partir de esta idea general, para obtener una caracterización climática de las fuentes de humedad de cierta región, se localizan todas las partículas que se dirigen a dicha región hacia atrás en el tiempo. Para éste trabajo se utilizaron las

salidas con 10 días hacia atrás en el tiempo puesto que Numaguti (1999) menciona que es el tiempo de residencia de vapor de agua en la atmósfera. En donde se calculan los incrementos o decrementos de humedad específica de cada partícula, sumando los cambios de cada partícula, se puede determinar las áreas en donde las partículas ganan o pierden humedad.

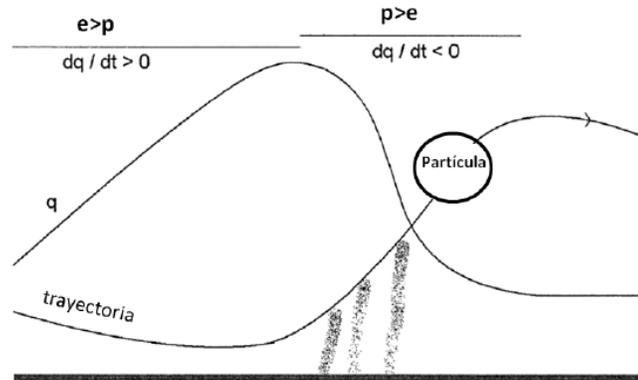


Figura 2.1: Esquema de una partícula que realiza un ciclo de evaporación - precipitación. La línea gruesa representa la superficie y el eje vertical la altura sobre la misma. La partícula se encuentra encerrada en un círculo y su trayectoria es marcada con una flecha. La variación de humedad de la partícula está representada por la línea marcada con una q . La humedad de la partícula aumenta en la primera mitad en donde $\frac{dq}{dt} > 0$, es decir, hay evaporación. Posteriormente conforme la partícula se eleva la " q " de la partícula disminuye $\frac{dq}{dt} < 0$ es decir, hay precipitación. Modificado de: Stohl and James (2004).

(d) Índices ENSO

Para éste trabajo, se utilizaron 3 índices de ENSO: SOI, ONI y BEST, los cuáles se describen a continuación.

El índice SOI (Southern Oscillation Index) ², es una medida de fluctuaciones a gran escala en la presión del aire entre el Pacífico Este y Oeste; para ello utiliza las diferencias de presión a nivel del mar observadas entre Tahití y la ciudad de Darwin (Australia). En éste índice las fases negativas están asociadas a presiones por debajo de lo normal en Tahití, y por encima de lo normal en Darwin. Esto indica que las fases negativas del índice SOI, coinciden con aguas oceánicas más cálidas en el Pacífico Este y por lo tanto corresponde a eventos El Niño y viceversa para eventos La Niña (NOAA, 2005b).

²El índice fue obtenido de: www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/soi

El índice ONI (Ocean Niño Index) ³, se define como el promedio móvil de tres meses de las anomalías de temperatura superficial del mar en base al periodo de 1971-2000 en la región de El Niño 3.4 (Compagnucci and Agosta, 2008). En donde los eventos El Niño se caracterizan por valores positivos mayores o iguales a $+0,5^{\circ}C$ durante un trimestre. Para el caso de La Niña el valor es de $-0,5^{\circ}C$. Finalmente en el índice existe una fase neutra que presenta valores entre $-0,5^{\circ}C$ y $+0,5^{\circ}C$. (Ramírez and Jaramillo, 2009)

El índice BEST (Bivariate EnSo Timeseries) ⁴, está basado en un valor combinado entre la temperatura superficial del mar y el índice SOI, de manera tal que el resultado obtenido es un ensamble entre las componentes oceánica (SST en la región El Niño 3.4) y atmosférica respectivamente (Smith et al., 2000).

2.2. Metodología

En primer lugar, se seleccionó la región de estudio correspondiente al NAM. La región seleccionada coincide con la empleada por Hu and Dominguez (2015) utilizando una resolución espacial de $1^{\circ}x1^{\circ}$ que coincide con la resolución de las trayectorias obtenidas con FLEXPART.

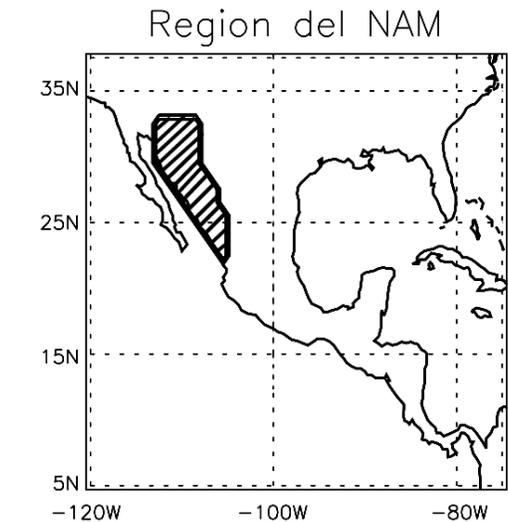


Figura 2.2: Zona de estudio, el área sombreada representa los límites del NAM que fueron utilizado en este trabajo.

Para realizar las anomalías de precipitación con las cuatro bases de datos y los tres índices, el intervalo de tiempo utilizado fue desde 1981 (el mínimo año en común) hasta el máximo posible para cada base. Quedando de la siguiente manera: CHIRPS (1981-2015), CMAP (1981-2015), GPCC (1981-2013) y GPCP (1981-2014). Seguidamente se determinaron los años Niño y Niña, en donde, de acuerdo a los índices estandarizados, fueran mayores (menores para eventos Niña)

³El índice fue obtenido de: www.esrl.noaa.gov/psd/data/correlation/oni.data

⁴El índice fue obtenido de: www.esrl.noaa.gov/psd/data/correlation/censo.data

a una desviación estándar. Una vez obtenidos, para obtener las anomalías, se restaron a los valores de precipitación para años Niño/Niña los valores de los demás años. Una anomalía positiva, representada (tonos azules) está asociada a precipitación por encima de lo normal del promedio y una anomalía negativa (tonos rojizos) está asociada a precipitación por debajo de lo normal del promedio.

Para determinar la significancia de las anomalías calculadas, se ha empleado el método de Bootstrap, que prueba la significancia estadística de una diferencia de compuestos (Efron and Tibshirani, 1993). Aplicado para este caso significa que, mediante permutaciones aleatorias de la serie original completa (todos los años disponibles), se obtienen compuestos con el mismo número de elementos que los compuestos de El Niño (o La Niña), posteriormente, se calculan las diferencias con el compuesto original correspondiente al resto de los años. Este proceso se repite hasta mil veces, que es la mínima cantidad de repeticiones necesarias que se considera en el método. Si la anomalía original en valor absoluto sobre un punto es mayor que la diferencia simulada en un 95 % de los casos, entonces la anomalía calculada en ese punto es estadísticamente significativa a un nivel del 95 %.

Para determinar los transportes de humedad asociados a eventos El Niño y La Niña, se utilizó el índice BEST, por ser este un índice que junta ambas componentes oceánica y atmosférica. De la misma manera que para determinar las anomalías de precipitación, se tomaron los valores de E-P en los que BEST es mayor (o menor) a una desviación estándar. De esta forma se restaron los valores de E-P con $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ de resolución procedentes del modelo FLEXPART (Stohl et al., 1998; Stohl and James, 2004, 2005), de los años Niño/Niña los valores de los demás años. Al igual que en el caso de la precipitación, las anomalías significativas se determinaron por el método Bootstrap con mil repeticiones. Como se mencionó anteriormente, también se obtuvieron anomalías de los años El Niño/La Niña para el viento a 300 milibares; siguiendo el mismo proceso que para la precipitación y humedad.

Capítulo 3

Resultados

A continuación se presentan los resultados obtenidos tanto para las anomalías de precipitación con eventos El Niño y La Niña, como para los flujos de humedad asociados a las anomalías encontradas.

3.1. Efecto de eventos ENSO en la Precipitación del NAM

En el Cuadro 3.1, se muestran el número de eventos El Niño seleccionados para el periodo 1981-2015 (35 años), que son mayores a una desviación estándar. En el apéndice A se muestra el número de eventos seleccionados para los casos en que se estudian 34 y 33 años.

El número de eventos seleccionados con los índices ONI y SOI son similares, sin embargo el BEST muestra un mayor número de eventos a lo largo de los meses de abril a agosto. No obstante al combinar las componentes oceánica y atmosférica, el BEST se consideró el índice más completo por lo que se muestra en la presente sección. En el apéndice B, se muestran las anomalías para los índices ONI y SOI, donde se puede observar que las anomalías de precipitación son consistentes para las distintas bases de datos, aunque se usen diferentes índices de ENSO.

Número de eventos El Niño (35 años)												
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
BEST	4	8	5	6	9	6	6	8	7	9	8	8
ONI	5	5	4	2	1	3	3	4	5	5	7	9
SOI	5	6	5	4	2	2	4	4	5	8	3	5

Cuadro 3.1: Eventos El Niño mayores a una desviación estándar entre 1981-2015

En las siguientes Figuras 3.1 a 3.4, se muestran las anomalías encontradas durante las 4 estaciones del año para El Niño, utilizando el índice BEST y las cuatro bases de precipitación mencionadas en el capítulo anterior.

- **Primavera.** A lo largo del mes de marzo (Figura 3.1), se perciben anomalías significativas en casi toda la región del NAM, y una zona de anomalías positivas en la Florida (EE.UU.) y Cuba. Para abril, no aparecen anomalías significativas en el NAM ni en alguna región aledaña. Finalmente en el mes de mayo, se vuelve a presentar una amplia zona con anomalías positivas que abarca parte de la zona norte de México y una porción del centro. También

se observan anomalías negativas sobre Oaxaca/Chiapas pero no llegan a ser significativas en las cuatro bases de datos. En general la primavera, está caracterizada por tener anomalías positivas de precipitación en los meses de marzo y mayo, pero no se observa ninguna señal en el mes de abril.

- **Verano.** Para el verano (Figura 3.2) en el mes de junio no se presentan anomalías significativas en el NAM, salvo ciertas zonas localizadas con anomalías negativas, que se observan en las bases CHIRPS, GPCC y GPCP Figuras 3.2 a), c) y d) respectivamente. Prosiguiendo en julio nuevamente estas tres bases logran captar una anomalía negativa en la zona norte del NAM. Finalmente en agosto en el NAM sólo se observan zonas muy localizadas con anomalías negativas en las bases de CHIRPS y GPCC Figuras 3.2 a) y c) respectivamente. En la estación de verano, cabe destacar que a pesar de que en el NAM no se presentan anomalías de una forma tan compacta, en todo el sur de México se presentan consistentemente anomalías negativas de precipitación, especialmente en julio y agosto. Lo que quiere decir que en éstas zonas llueve por debajo de lo normal en eventos El Niño. Este resultado es de gran interés puesto que en esta zona se ubica la Ciudad de México, un núcleo que concentra una gran proporción de los habitantes de la República Mexicana. Sin duda esta región será examinada en estudios posteriores.
- **Otoño.** Durante el mes de septiembre (Figura 3.3), no se presentan anomalías significativas en la zona del NAM, sin embargo se observa una anomalía negativa en la costa suroeste del país. Para el mes de octubre, comienzan a presentarse anomalías positivas al noreste de México y sureste de Estados Unidos, así como una anomalía negativa en el sureste del país y Centroamérica. Cabe mencionar que el índice ONI con la base GPCC y GPCP Figuras B.7 c) y d), respectivamente se presenta una anomalía negativa en la zona centro del NAM. En noviembre, hay presencia de anomalías positivas de precipitación en la región del NAM, específicamente al noroeste de la misma. De la misma manera se presentan anomalías positivas desde el Golfo de México hasta el Pacífico.
- **Invierno.** Durante el mes de diciembre (Figura 3.4), está la presencia de una anomalía positiva importante en toda la parte norte de México, incluyendo al NAM, llegando a Florida. En enero, aunque la anomalía sigue siendo positiva en la zona del NAM, la significatividad se ubica ligeramente más al sur del país incluyendo una pequeña parte del sur del NAM. Para febrero la anomalía vuelve a ser significativa en todo el NAM, así como todo el norte de México y sur de Estados Unidos.

A grandes rasgos, se puede decir que durante las primaveras en fase de El Niño se observan anomalías positivas de precipitación sobre el NAM durante marzo y mayo, para las cuatro bases de datos de precipitación el resultado es similar al obtenido con los índices SOI y ONI. En verano para las cuatro bases de datos y los tres índices ENSO, en general no se encuentran anomalías significativas para la región de estudio de forma sistemática. Durante el otoño a lo largo de los meses de septiembre y octubre no se presentan anomalías significativas en el NAM, sin embargo, consistentemente en noviembre, los índices BEST y SOI, presentan zonas con anomalías positivas dentro del NAM. Los inviernos en fase El Niño, muestran una mayor precipitación. En donde, los meses de diciembre las anomalías negativas se localizan al norte de México, teniendo efectos en toda la región del NAM

y sus alrededores. En enero, las anomalías se desplazan hacia el sur del país, en donde éstas son poco significativas en el NAM. Finalmente en febrero, la anomalía vuelve a estar presente en el norte de México, afectando al NAM aunque de manera menos importante que en diciembre, presentando anomalías localizadas en el norte y sur del NAM, así como zonas de la costa oeste de México.

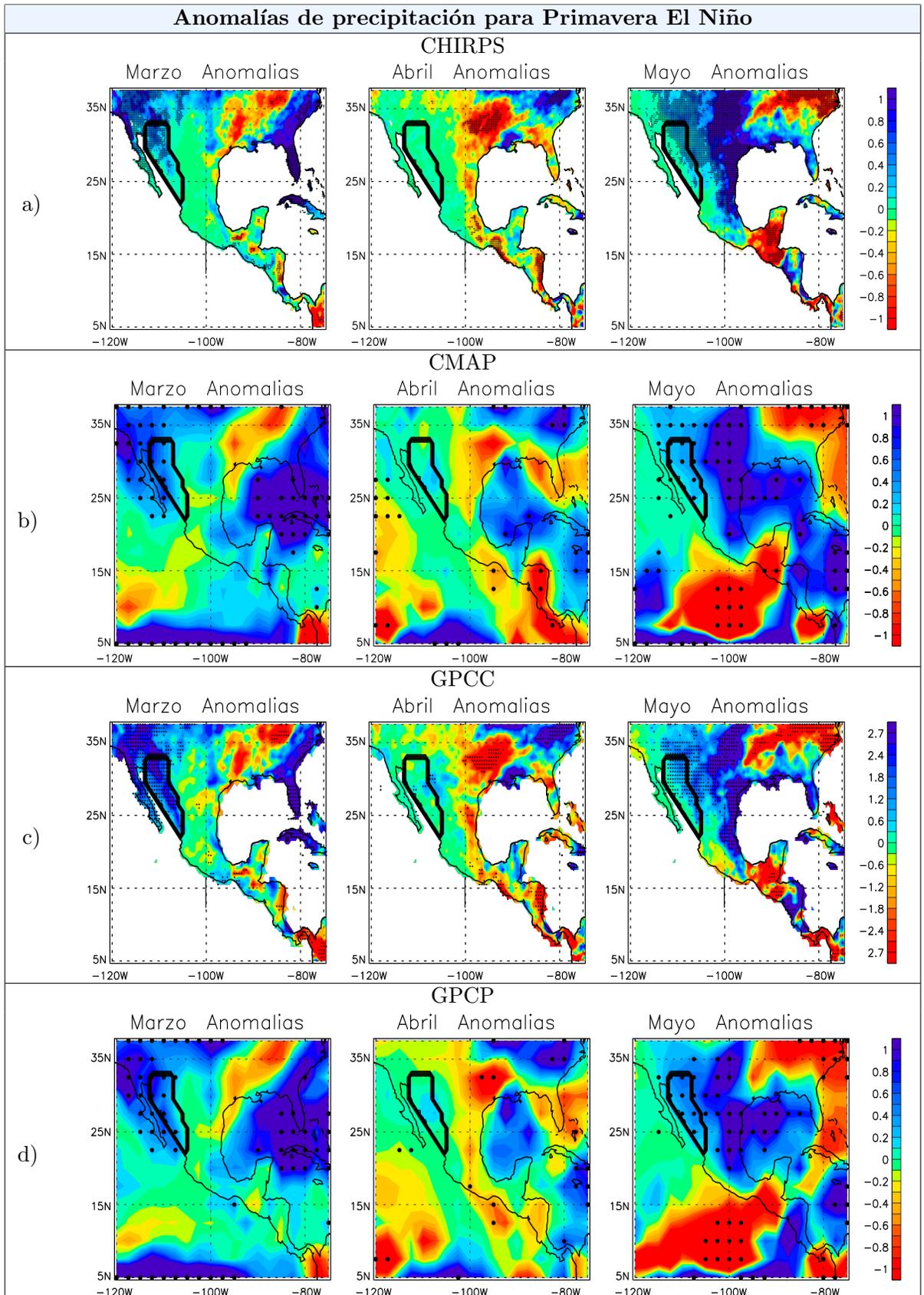


Figura 3.1: Anomalías de precipitación para la primavera en eventos El Niño, utilizando el índice BEST con cuatro bases de precipitación.

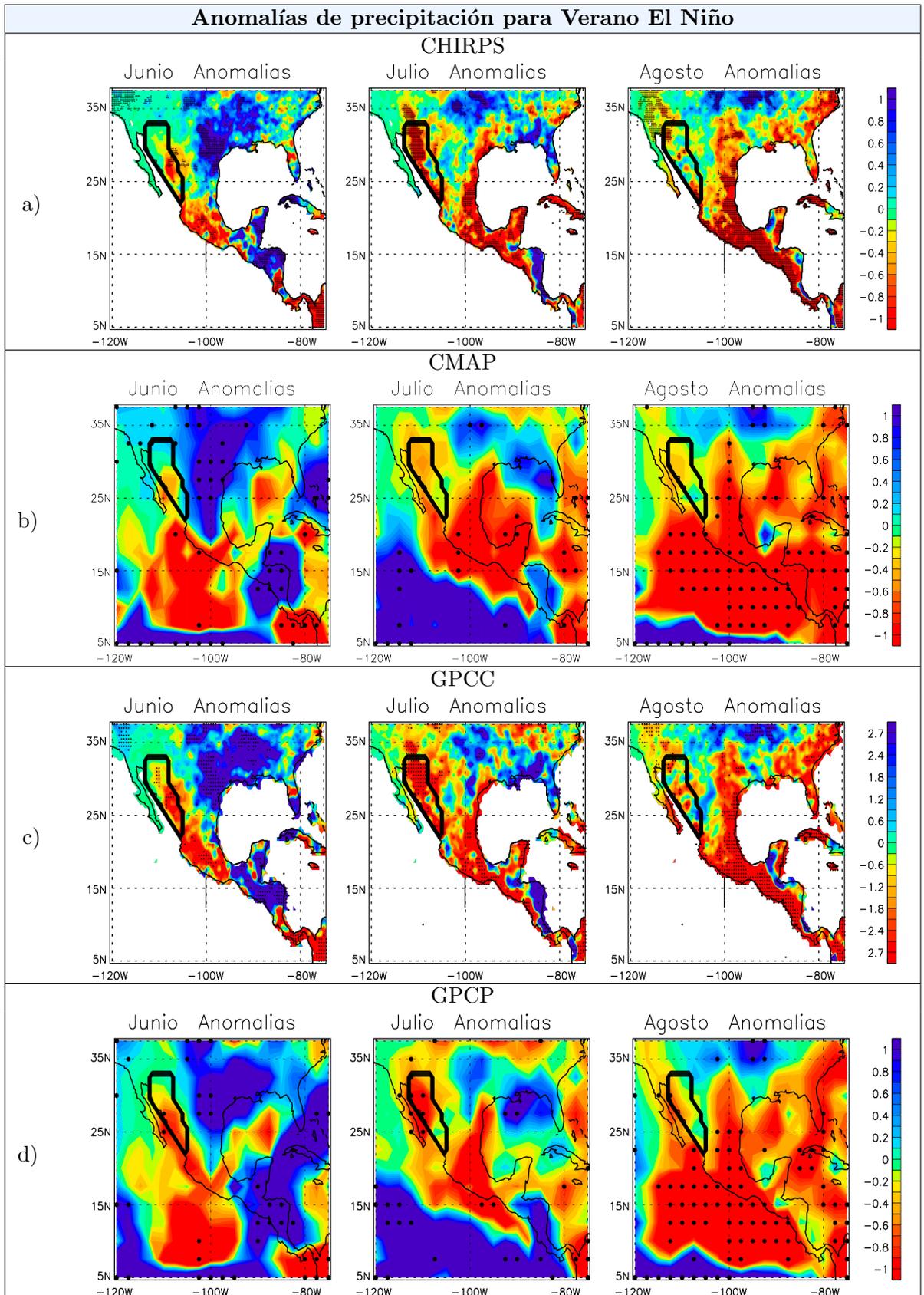


Figura 3.2: Anomalías de precipitación para el verano en eventos El Niño, utilizando el índice BEST con cuatro bases de precipitación.

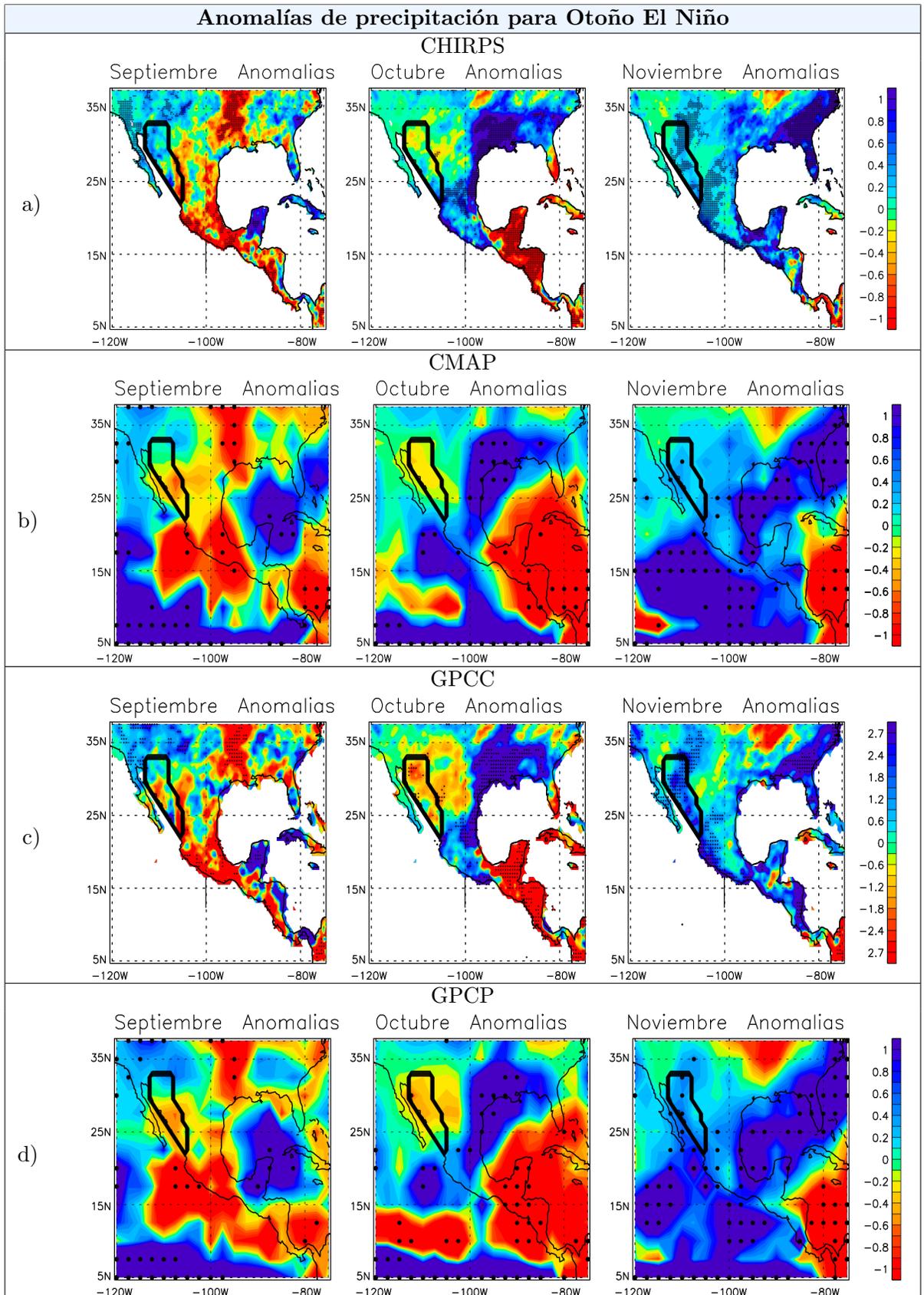


Figura 3.3: Anomalías de precipitación para el otoño en eventos El Niño, utilizando el índice BEST con cuatro bases de precipitación.

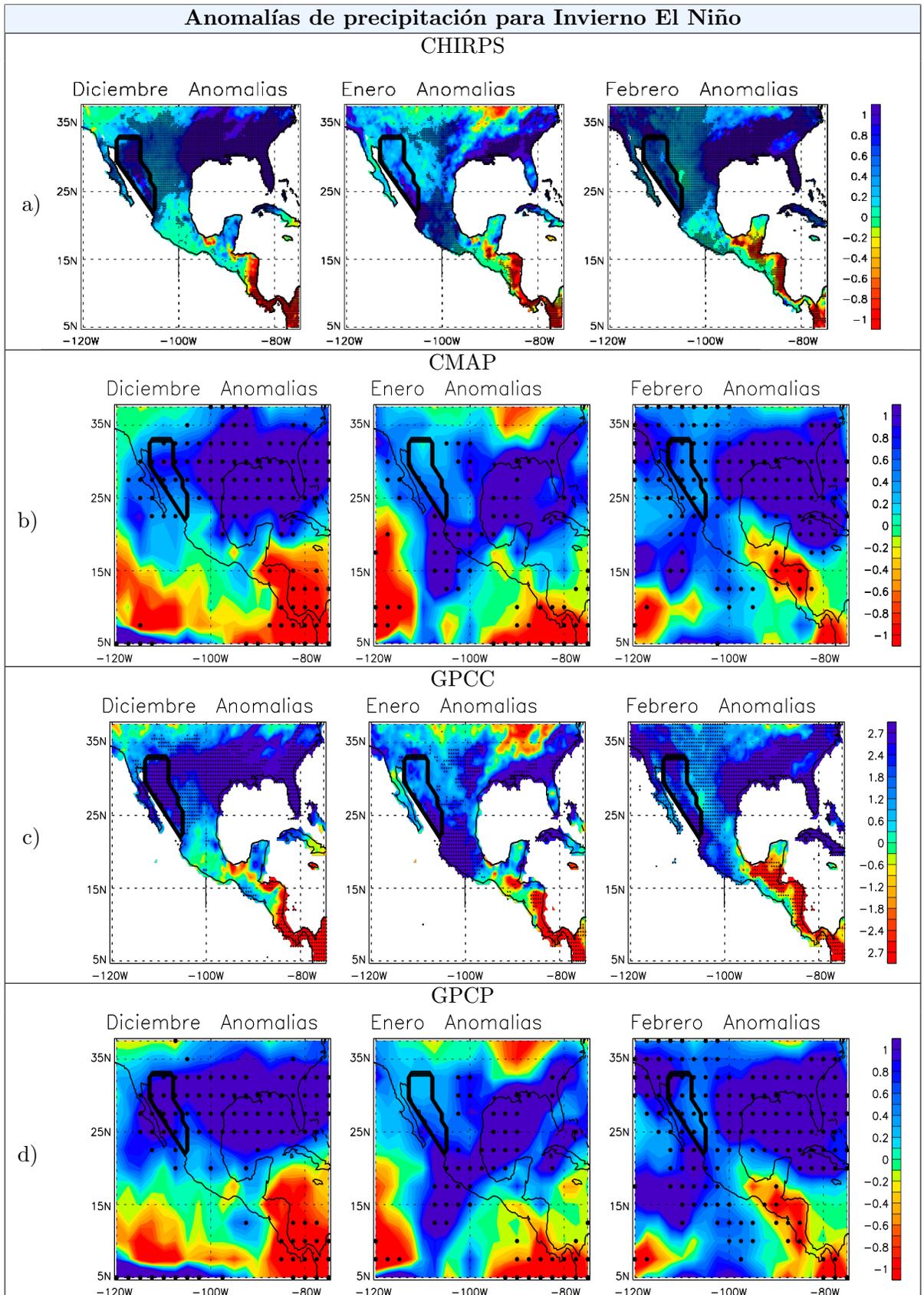


Figura 3.4: Anomalías de precipitación para el invierno en eventos El Niño, utilizando el índice BEST con cuatro bases de precipitación.

A continuación se realizó el análisis de las anomalías de precipitación con eventos La Niña para todo el año. De la misma manera que con los eventos El Niño, en el Cuadro 3.2 se presenta el número de eventos en el periodo de 1981-2015 (35 años), tales que fueran menores a una desviación estándar para cada índice estandarizado.

En el apéndice A se muestra el número de eventos seleccionados para los casos en que se estudian 34 y 33 años.

Número de eventos La Niña (35 años)												
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
BEST	9	7	6	5	2	1	3	3	4	6	7	7
ONI	5	5	3	0	0	1	2	3	4	5	5	6
SOI	9	10	8	7	2	3	2	3	3	6	5	8

Cuadro 3.2: Eventos La Niña mayores a una desviación estándar entre 1981-2015

- **Primavera.** En la primavera La Niña (Figura 3.5), hay pocas anomalías significativas. Comenzando en marzo, se observan anomalías negativas en la zona norte del NAM siendo mayores éstas en la base CHIRPS y CMAP (Figuras 3.5 a) y b) respectivamente). Durante el mes de abril, no se presentan anomalías significativas en el NAM, y sólo se logra observar una anomalía negativa al norte del Golfo de México. Finalmente en mayo, la mayor cantidad de anomalías negativas se presentan en la zona centro del país, sin embargo la zona del NAM tampoco presenta ninguna.
- **Verano.** Al comienzo del verano (Figura 3.6), durante el mes de junio, en la zona del NAM no hay presencia de anomalías significativas. Al sur de México se encuentran anomalías positivas significativas de precipitación, mientras que al sureste de Estados Unidos hay anomalías negativas. A lo largo del mes de julio aparecen anomalías positivas de precipitación sobre toda la República Mexicana pero no en todas las regiones (como en el caso del NAM) se alcanza el nivel de significatividad estadística (Figura 3.6). Durante agosto en las bases CMAP y GPCP (Figuras 3.6 b) y d) respectivamente), se observan anomalías positivas a lo largo del sur de México y Océano Pacífico. En la zona del NAM, se observan zonas con anomalías negativas en las bases CMAP y GPCC (Figuras 3.6 b) y c) respectivamente).
- **Otoño.** En el otoño Figura 3.7, durante septiembre, se observan anomalías positivas en el Golfo de México y sus alrededores. Mientras que en la zona oeste, hay anomalías negativas en el Océano Pacífico y puntos localizados en el NAM como se observa en las bases CHIRPS y CMAP Figuras 3.7 a) y b) respectivamente. Posteriormente en octubre, una anomalía negativa a lo largo del centro y norte de México predomina, afectando al NAM en la zona sur. Al sur del país, se observan anomalías positivas en los alrededores de la península de Yucatán. Finalizando en noviembre, se perciben anomalías negativas dispersas en la zona centro del País. Dejando al NAM sin anomalías significativas.
- **Invierno.** Al comienzo del invierno (Figura 3.8) en diciembre, se observa una anomalía negativa que cubre casi todo el territorio mexicano abarcando parte del Golfo de México y Océano Pacífico, afectando de igual manera la

zona del NAM, particularmente al sur. Continuando en enero, la anomalía negativa persiste aunque ahora más localizada en la parte centro del país, y en donde toda la zona del NAM queda afectada por la misma. Por último en enero, la anomalía se vuelve más pequeña y localizada. La parte afectada del NAM durante éste mes es la zona norte. Así como el norte del Golfo de México.

En resumen, en la primavera con eventos La Niña, la mayor cantidad de anomalías que se presentan son negativas. En marzo las anomalías estadísticamente significativas se presentan principalmente al norte del NAM y en mayo, dichas anomalías se localizan en la zona centro de la República Mexicana. Para el verano, las anomalías no son concluyentes para la región del NAM, sin embargo durante julio y agosto, se presentan anomalías positivas significativas en la zona centro y sur del país respectivamente. Durante otoño, en el NAM se presentan anomalías negativas significativas durante el mes de octubre, en particular en la zona sur. La zona centro del país, presenta algunas zonas con anomalías negativas, durante el mes de noviembre. Finalmente en invierno, se presenta una gran cantidad de anomalías negativas significativas en los tres meses, afectando gran parte del país (incluyendo al NAM), así como el sur de Estados Unidos. Es en el mes de febrero cuando a pesar de que las anomalías disminuyen siguen presentes al norte del NAM.

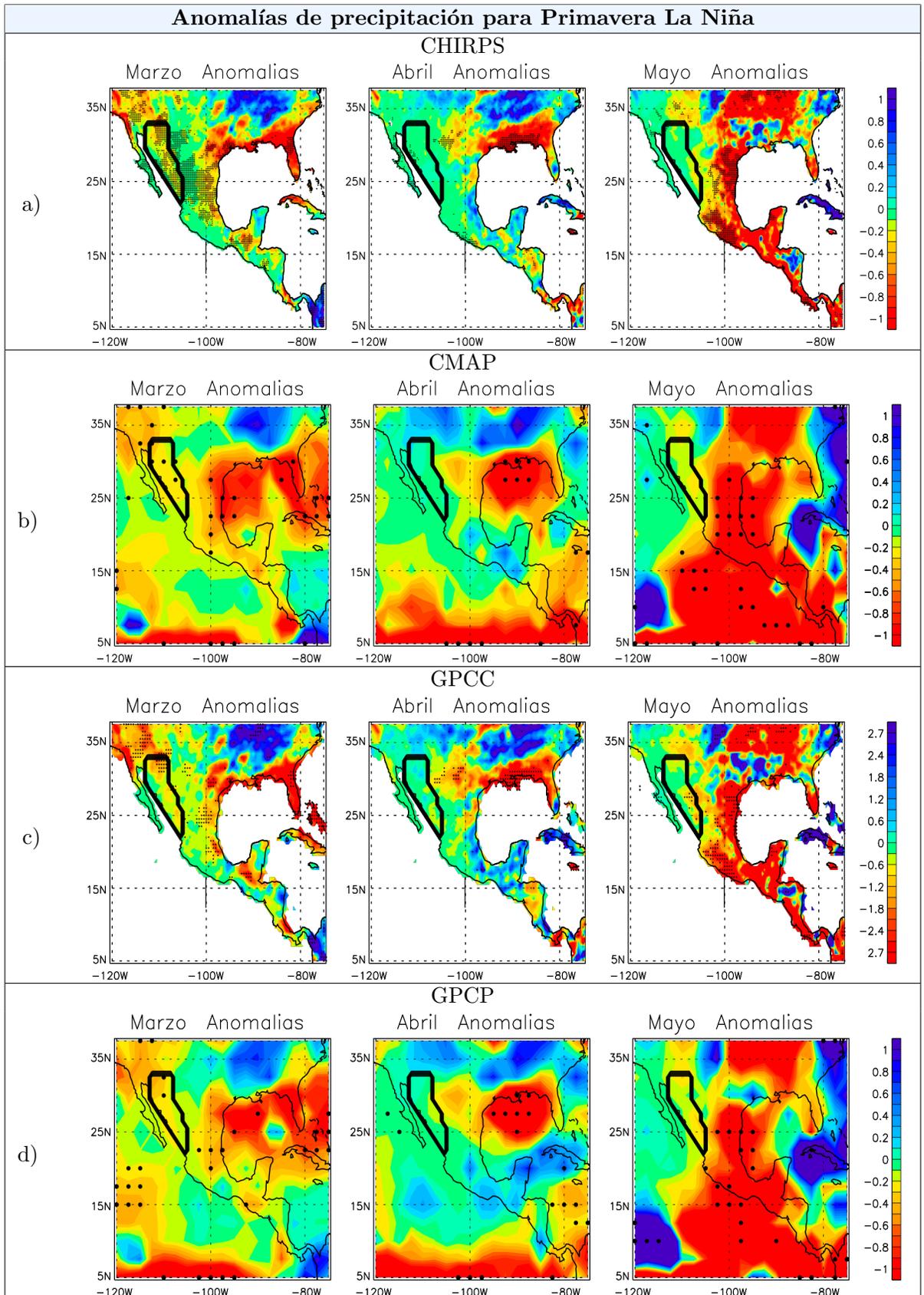


Figura 3.5: Anomalías de precipitación para la primavera con eventos La Niña, utilizando el índice BEST con cuatro bases de precipitación.

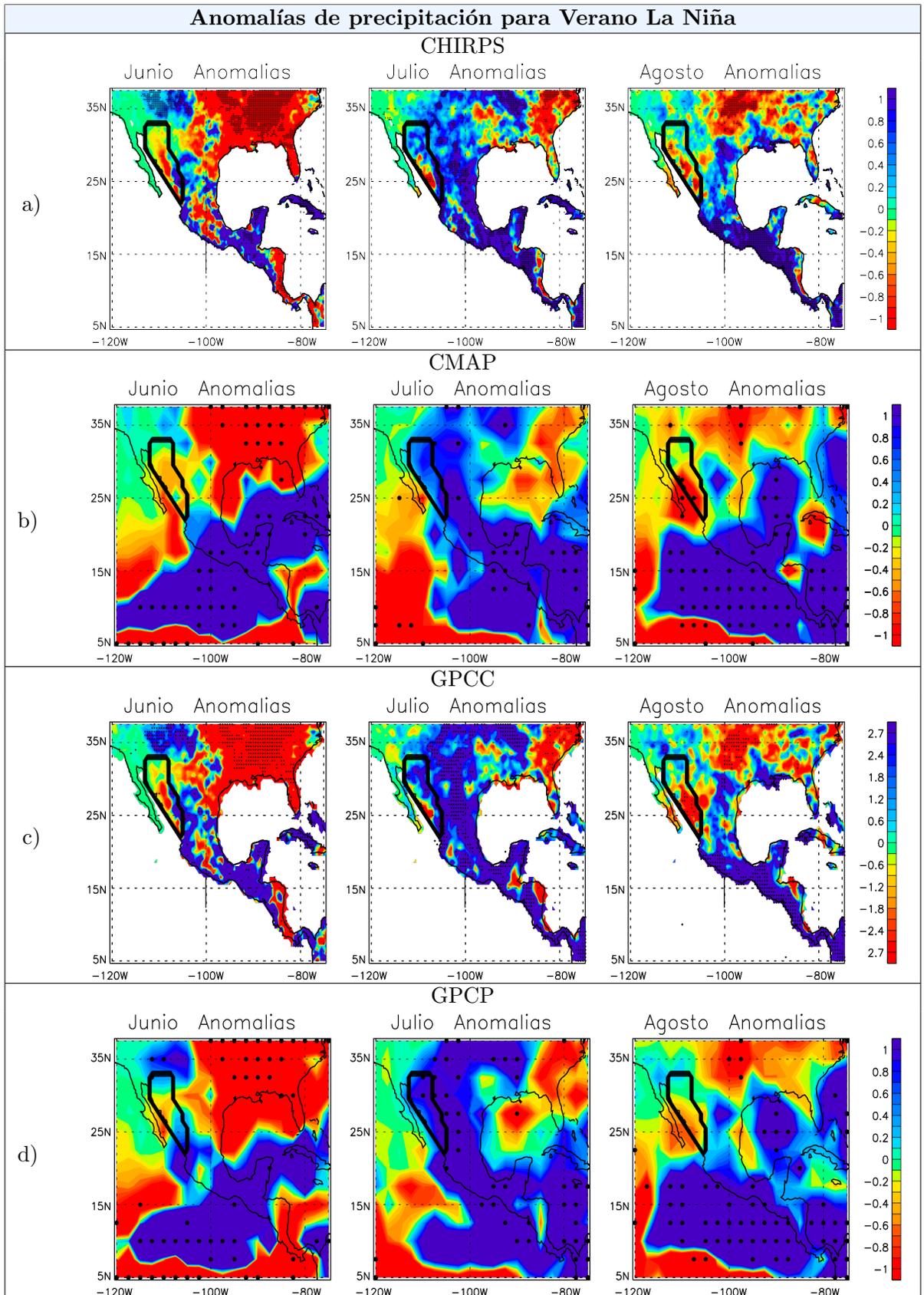


Figura 3.6: Anomalías de precipitación para el verano para eventos La Niña, utilizando el índice BEST con cuatro bases de precipitación.

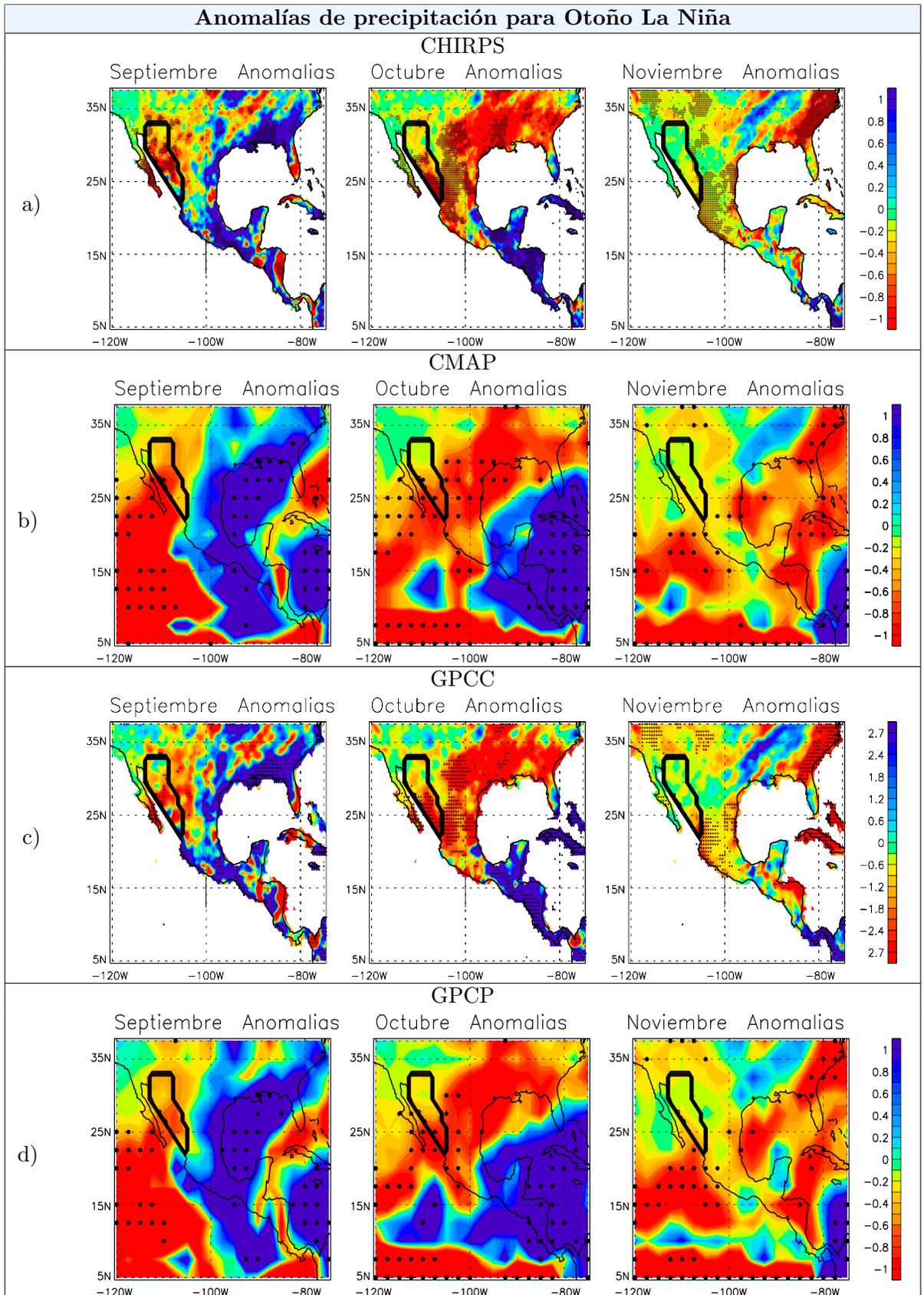


Figura 3.7: Anomalías de precipitación para el otoño para eventos La Niña, utilizando el índice BEST con cuatro bases de precipitación.

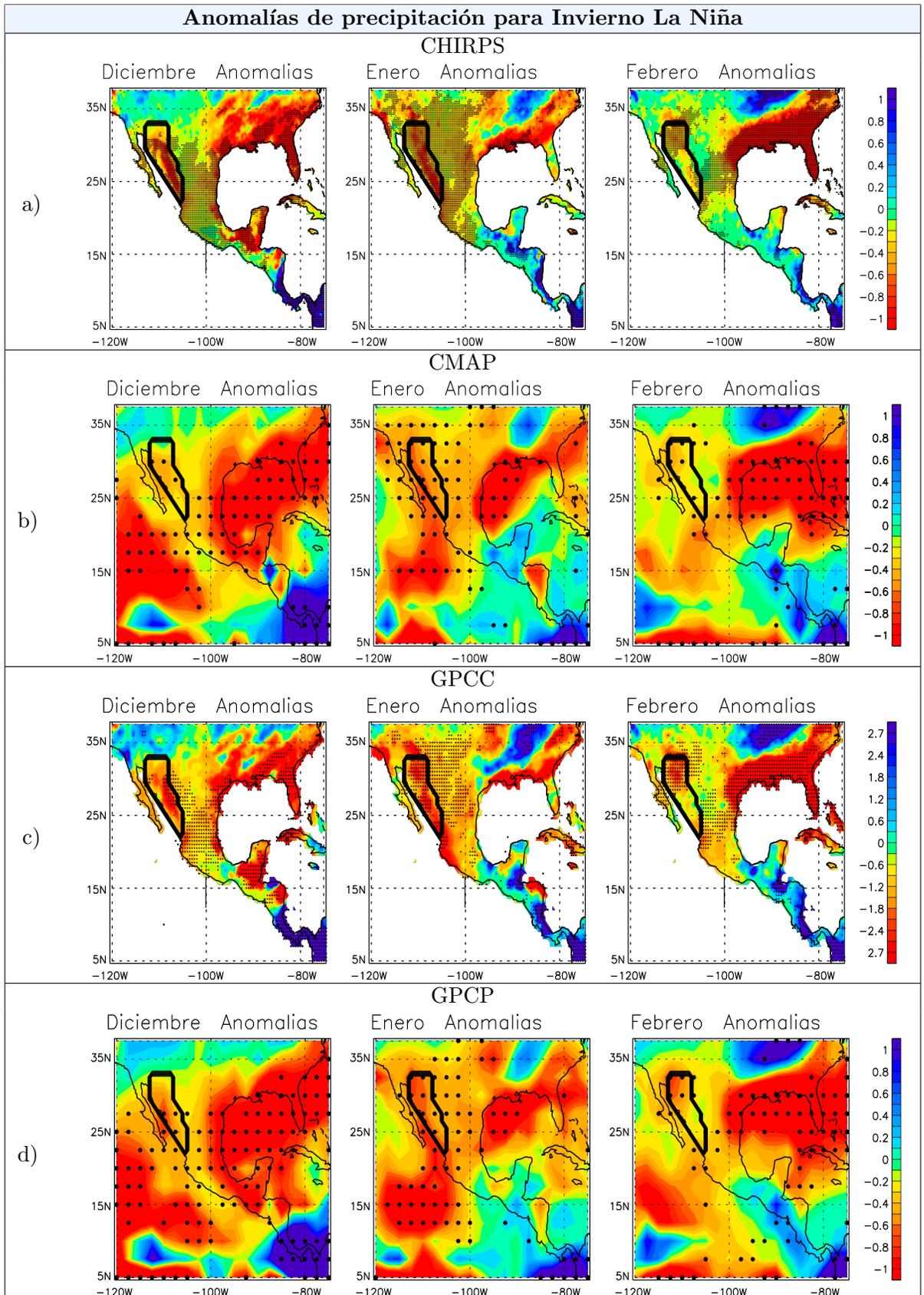


Figura 3.8: Anomalías de precipitación para el invierno para eventos La Niña, utilizando el índice BEST con cuatro bases de precipitación.

3.2. Flujos de Humedad Asociados a las Anomalías de Precipitación

En esta sección se muestran los flujos de humedad asociados a las anomalías de precipitación encontradas, utilizando el índice BEST, para los años El Niño y La Niña mencionados anteriormente. En los mapas se observan las fuentes de humedad de la precipitación, así como la posición relativa de la corriente en chorro. Puesto que en la sección anterior se ha demostrado que los eventos ENSO están asociados con anomalías de precipitación significativas estadísticamente sobre el área del NAM a lo largo del invierno, en la presente sección se analiza el transporte de vapor de agua dirigido hacia la región del NAM durante esta estación del año.

Climatología de las Fuentes de Humedad durante el Invierno

La Figura 3.9 muestra el flujo de agua dulce promedio (1981-2014) del agregado de los diez días anteriores a que las masas de aire alcancen la zona del NAM durante los meses de invierno. El color de las trayectorias muestra si una determinada región es fuente de humedad (colores rojizos) o sumidero (colores azulados) de acuerdo con el signo de $\frac{dq}{dt}$.

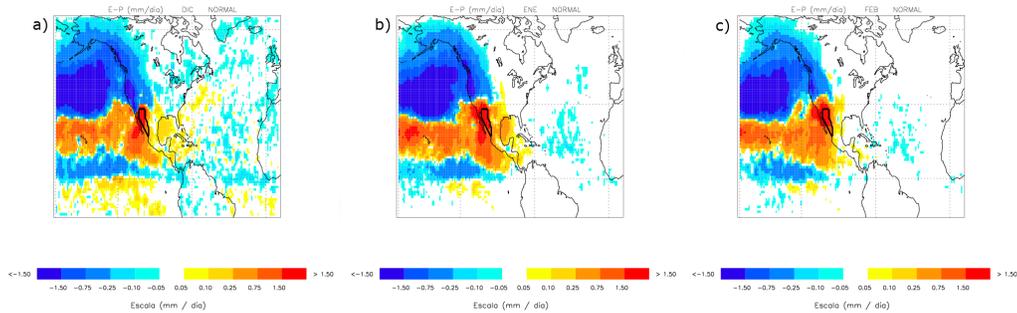


Figura 3.9: Promedio mensual del agregado de E-P durante los diez días anteriores a la llegada de las partículas a la región del NAM durante a) diciembre, b) enero y c) febrero. Periodo de estudio 1981-2014

Se observa que durante el invierno, la humedad proviene primordialmente del Pacífico, sin embargo hay ligeros aportes por parte del Atlántico (mar Caribe y Golfo de México) durante los meses de diciembre y enero. El resto de la cuenca del Pacífico Norte es un sumidero neto de humedad para las partículas que se dirigen hacia la región del NAM. También, se aprecian dos fuentes terrestres de vapor de agua. La propia región del NAM es una fuente de humedad para sí misma debido al reciclado de humedad. La zona más oriental de México también aporta humedad, especialmente en el mes de enero.

Anomalías Asociadas a Eventos El Niño

En la Figura 3.10 a), se observa que a lo largo del mes de diciembre, proviene más humedad de lo normal por parte del Pacífico en las latitudes de la región del NAM, coincidiendo con una mayor velocidad de la corriente en chorro ubicada sobre el área del NAM, así como un ligero aporte por parte del Golfo de México.

Para enero, (Figura 3.10b), hay un mayor aporte de humedad por parte del Pacífico en las latitudes de la región del NAM, sin embargo estos aportes son incluso mayores que en diciembre. Estas anomalías están acompañadas de anomalías positivas de la corriente en chorro que presenta velocidades de hasta $20m/s$, sobre el norte de México y sur de Estados Unidos.

Finalmente para febrero (Figura 3.10c), las anomalías positivas son menores a comparación de los demás meses. Sin embargo las anomalías que se presentan, ocurren en el Pacífico en las latitudes de la región del NAM. De la misma manera se presentan anomalías positivas de la corriente en chorro sobre el país.

En general los inviernos El Niño, presentan anomalías positivas de humedad principalmente del océano Pacífico. Dicha anomalía es advectada por la corriente en chorro. Las anomalías obtenidas de la corriente en chorro concuerdan con la literatura al tener un comportamiento más aplanado de lo normal, encontrándose encima del país, en la mayoría de los meses invernales.

Comparación de eventos La Niña con eventos El Niño

Para una visualización más clara entre las anomalías con eventos El Niño y La Niña se restaron a los valores de los años La Niña los valores de los años El Niño, dichos mapas son los que se presentan a continuación en la Figura 3.11 Para el mes de diciembre (Figura 3.11), hay un menor aporte de humedad hacia la región del NAM con eventos La Niña por parte del Pacífico, mientras que en la zona del Golfo de México hay un ligero aumento. El comportamiento de la corriente en chorro se muestra prácticamente sin cambios. A lo largo de enero (Figura 3.11b), al igual que en diciembre, hay un menor aporte de humedad del Pacífico, sin embargo, el Golfo de México también presenta una anomalía negativa con respecto a El Niño. Para este mes, la corriente en chorro es menos intensa en el Pacífico sobre las latitudes de la región del NAM. Finalmente en febrero (Figura 3.11c), se mantiene la anomalía negativa de humedad en la región del NAM pero ahora más localizada, a diferencia de diciembre y enero, ya que está rodeada por una zona de mayor aporte de humedad. En este mes, la anomalía negativa en el Golfo de México disminuye a comparación del mes anterior. La corriente en chorro se vuelve más lenta sobre todo el país.

En general, durante los inviernos La Niña, hay un menor aporte de humedad por parte del Pacífico hacia la región del NAM a comparación de los años El Niño. Por otra parte, el Golfo de México presenta un menor aporte de humedad para enero y febrero, mientras que en diciembre hay un ligero aumento de humedad. La corriente en chorro presenta principalmente anomalías negativas durante los tres meses en comparación con los años El Niño.

Flujos de Humedad asociados a Anomalías de Precipitación, Invierno El Niño

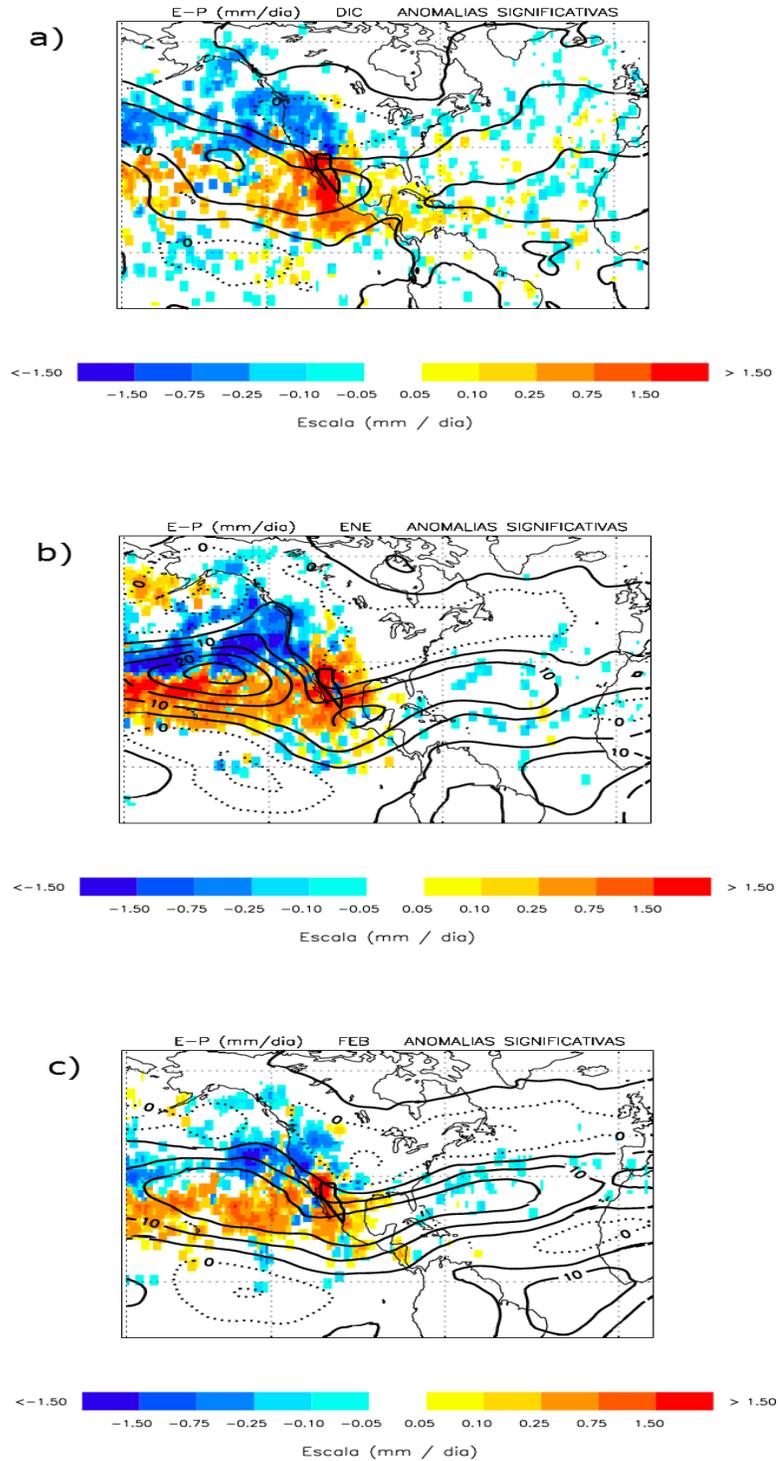


Figura 3.10: Flujos de humedad asociados a las anomalías de precipitación encontradas, para el invierno con eventos El Niño. a) Diciembre, b) Enero, c) Febrero. Velocidad de vientos cada 5m/s

Flujos de Humedad asociados a Anomalías de Precipitación, Invierno La Niña-El Niño

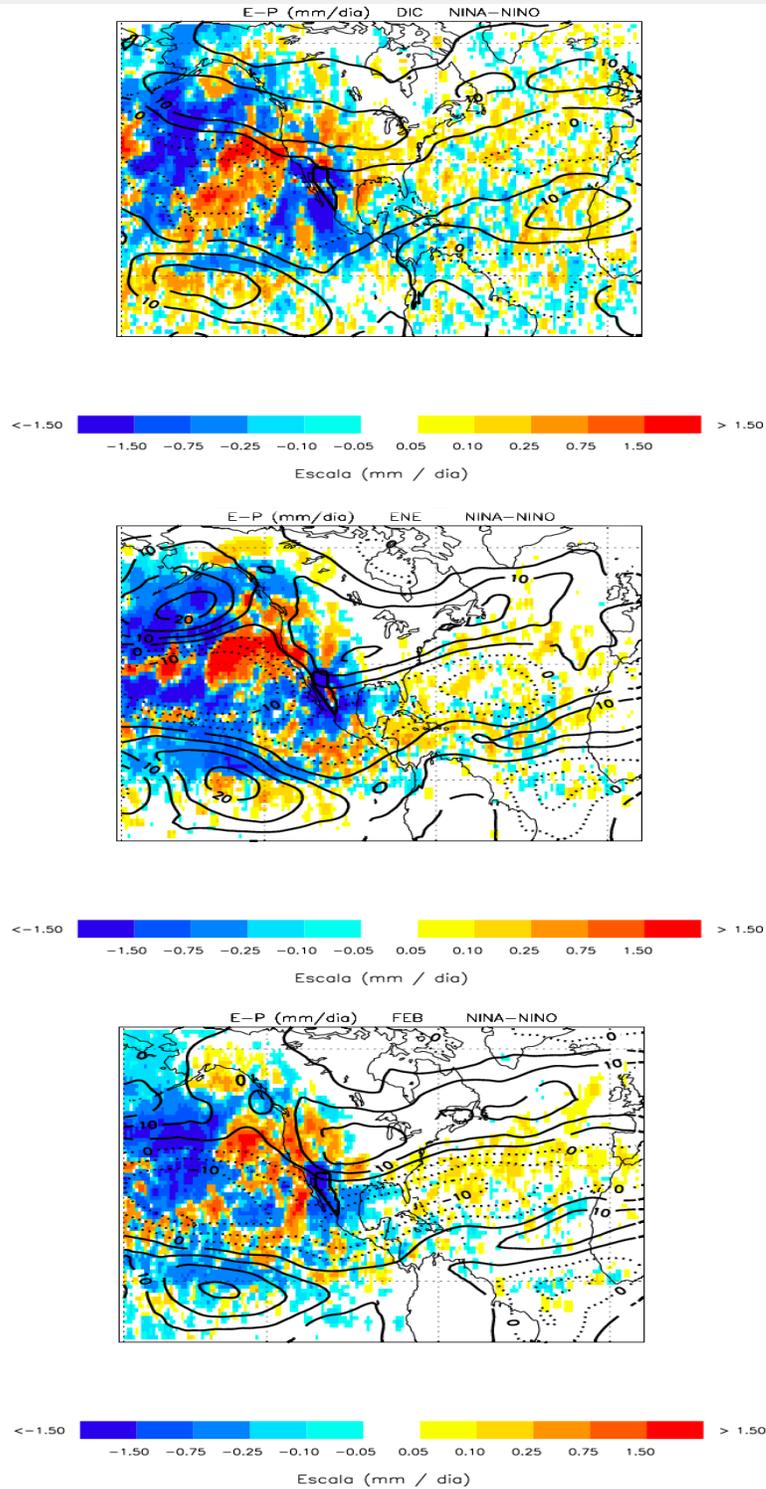


Figura 3.11: Flujos de humedad asociados a las anomalías de precipitación encontradas, para el invierno con eventos La Niña-El Niño. a) Diciembre, b) Enero, c) Febrero

Capítulo 4

Resumen y Conclusiones

En la presente tesis, se ha estudiado el efecto que tiene el fenómeno climático ENSO en la precipitación de la región del monzón de Norteamérica. Para ello, se han analizado las anomalías de precipitación durante los años El Niño y La Niña en el periodo 1981-2014 (34 años). Con el objetivo de obtener robustez en los resultados, se han analizado cuatro bases de datos de precipitación (CHIRPS, CMAP, GPPC y GPCP) y tres índices ENSO (BEST, ONI y SOI).

No se han encontrado anomalías significativamente estadísticas sobre el NAM en el verano, que es la época con mayor precipitación. Sin embargo, se han encontrado durante ésta estación del año, anomalías estadísticamente significativas sobre la zona centro y sur de México, de forma que los años El Niño/La Niña, corresponden con años secos/húmedos, particularmente el mes de agosto. El entendimiento de este resultado genera gran interés, pero queda fuera del alcance de esta tesis.

Durante el invierno (diciembre, enero y febrero) se presentan anomalías significativamente estadísticas sobre la región del NAM. En donde los años El Niño/La Niña se asocian a inviernos húmedos/secos. Este resultado es consistente con las distintas bases de datos de precipitación y los índices ENSO empleados. Dicho resultado es relevante en sí mismo al tratarse de una zona de clima desértico. No obstante, aunque en la parte del sur de la región del NAM las lluvias invernales no son tan abundantes, en la zona norte (Arizona y Nuevo México), algunas localidades llegan a presentar una distribución de precipitación casi bimodal. Por lo que las lluvias en esta estación cobran mayor importancia.

Con el objetivo de inferir algún mecanismo que explique las anomalías de precipitación asociadas a eventos ENSO en el invierno, se han analizado las diferencias en el transporte de vapor de agua en la atmósfera dirigido hacia la zona del NAM entre años El Niño y La Niña. Para ello se han utilizado las trayectorias obtenidas del modelo lagrangiano de dispersión de partículas FLEXPART. Durante los eventos El Niño, se observan anomalías positivas del flujo de agua en la atmósfera al oeste de la región del NAM, sobre el océano Pacífico. De la misma manera, se ha determinado que estas anomalías positivas coinciden con anomalías positivas en la velocidad del viento en 300 hPa. Por lo tanto, se puede deducir que, durante los años El Niño, la corriente en chorro subtropical se desplaza más hacia el sur que durante las condiciones normales, lo que favorece que las tormentas generadas penetren más hacia el sur, alcanzando latitudes más bajas cercanas a la República Mexicana. Al comparar las anomalías del transporte de humedad de los años La

Niña con los años El Niño, se aprecia que se transporta menos humedad hacia la región del NAM sobre las latitudes del norte de México en los inviernos La Niña. La corriente en chorro presenta anomalías negativas en estas latitudes y positivas más al norte. De la misma manera, es el cambio de la posición media de la corriente en chorro la responsable de los inviernos más húmedos de lo normal sobre la zona del NAM.

Los resultados presentados son de gran importancia para la predicción estacional de las lluvias invernales en la región desértica del NAM. Quedan varias cuestiones por estudiar, sin embargo, probablemente la línea futura más inmediata de este trabajo será analizar los mecanismos físicos asociados con la sequía de verano en el centro y sur de México.

Apéndices

Apéndice A

Eventos El Niño y La Niña para los periodos de tiempo de 1981-2013 y 1981-2014 (33 y 34 años respectivamente)

Número de eventos El Niño (34 años)												
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
BEST	4	8	5	6	8	5	5	7	6	8	7	7
ONI	5	5	4	2	1	2	2	3	4	4	6	8
SOI	5	6	5	4	2	2	3	3	4	7	3	5

Cuadro A.1: Eventos El Niño mayores a una desviación estándar entre 1981-2014

Número de eventos El Niño (33 años)												
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
BEST	4	8	5	6	8	5	5	7	6	8	6	7
ONI	5	5	4	2	1	2	2	3	4	4	6	8
SOI	5	6	5	4	2	2	3	3	4	7	3	5

Cuadro A.2: Eventos El Niño mayores a una desviación estándar entre 1981-2013

Número de eventos La Niña (34 años)												
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
BEST	9	7	6	5	2	1	3	3	4	6	7	7
ONI	5	5	3	0	0	1	2	3	4	5	5	6
SOI	9	10	8	7	2	3	2	3	3	6	5	8

Cuadro A.3: Eventos La Niña mayores a una desviación estándar entre 1981-2014

Número de eventos La Niña (33 años)												
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
BEST	8	7	6	5	2	1	3	3	4	6	7	7
ONI	5	5	3	0	0	1	2	3	4	5	5	6
SOI	8	10	8	7	2	3	2	3	3	6	5	8

Cuadro A.4: Eventos La Niña mayores a una desviación estándar entre 1981-2013

Apéndice B

Anomalías de precipitación para eventos El Niño y La Niña

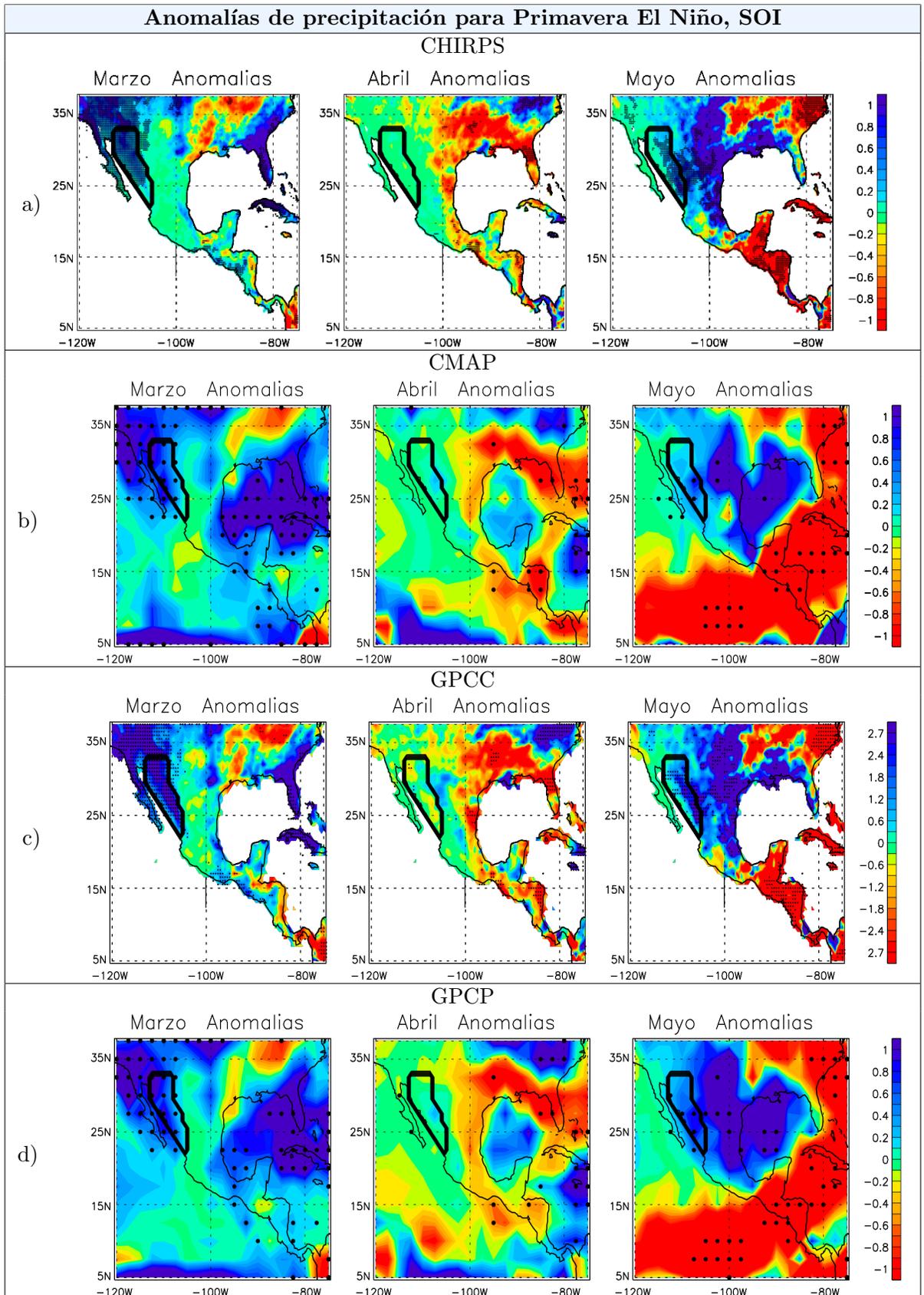


Figura B.1: Anomalías de precipitación para primavera con eventos El Niño, utilizando el índice SOI con cuatro bases de precipitación.

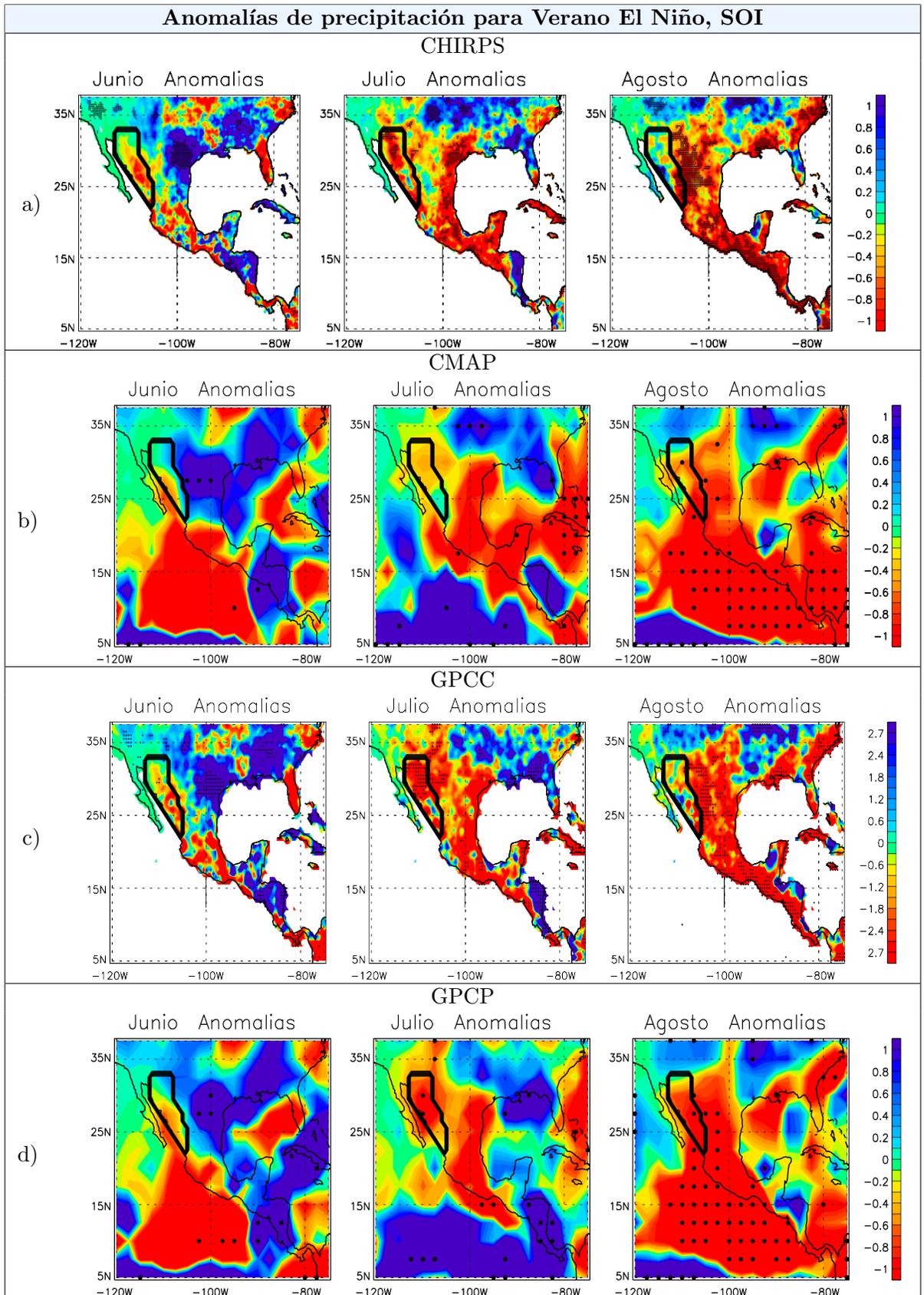


Figura B.2: Anomalías de precipitación para verano con eventos El Niño, utilizando el índice SOI con cuatro bases de precipitación.

Anomalías de precipitación para Otoño El Niño, SOI

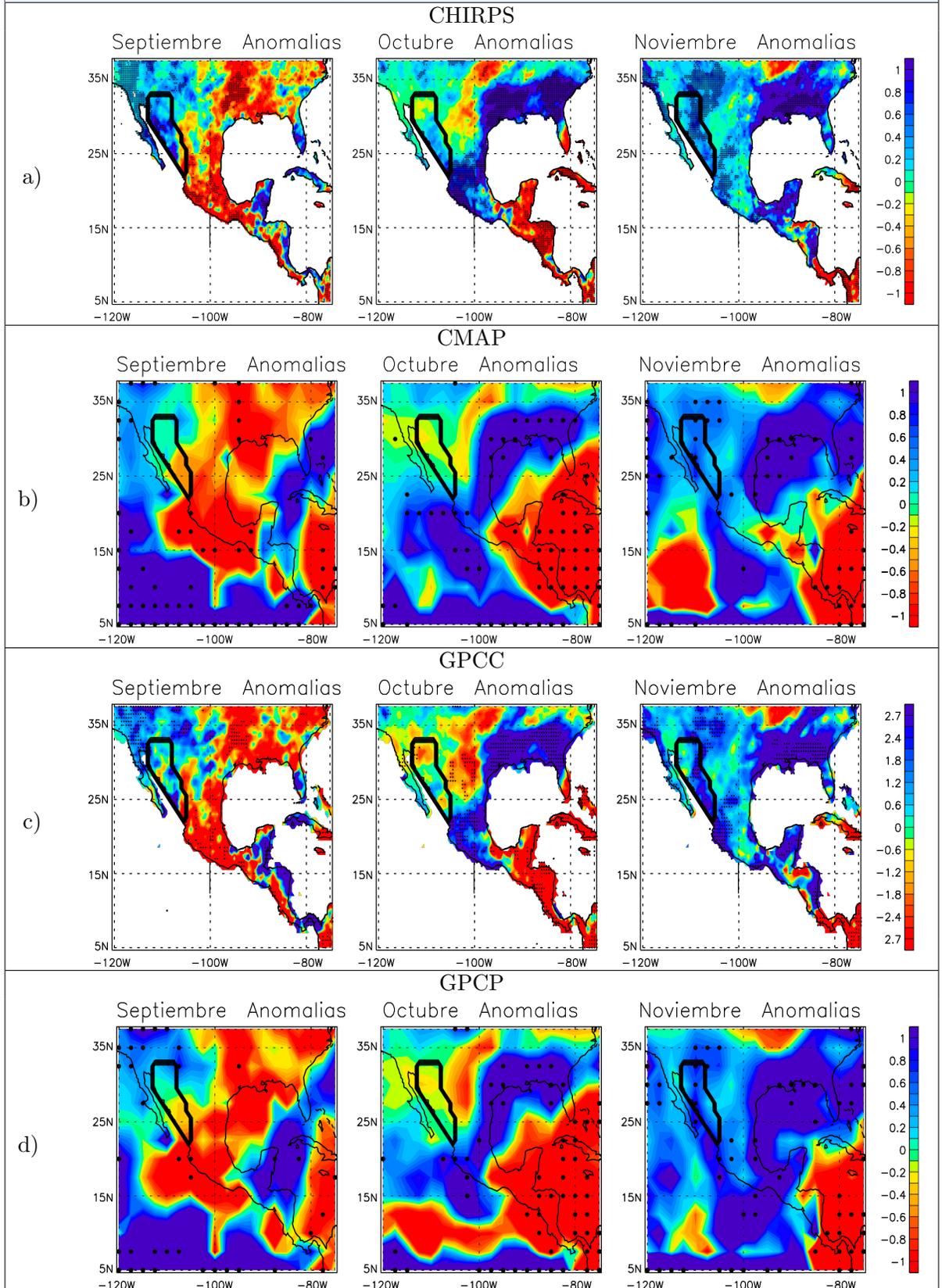


Figura B.3: Anomalías de precipitación para otoño con eventos El Niño, utilizando el índice SOI con cuatro bases de precipitación.

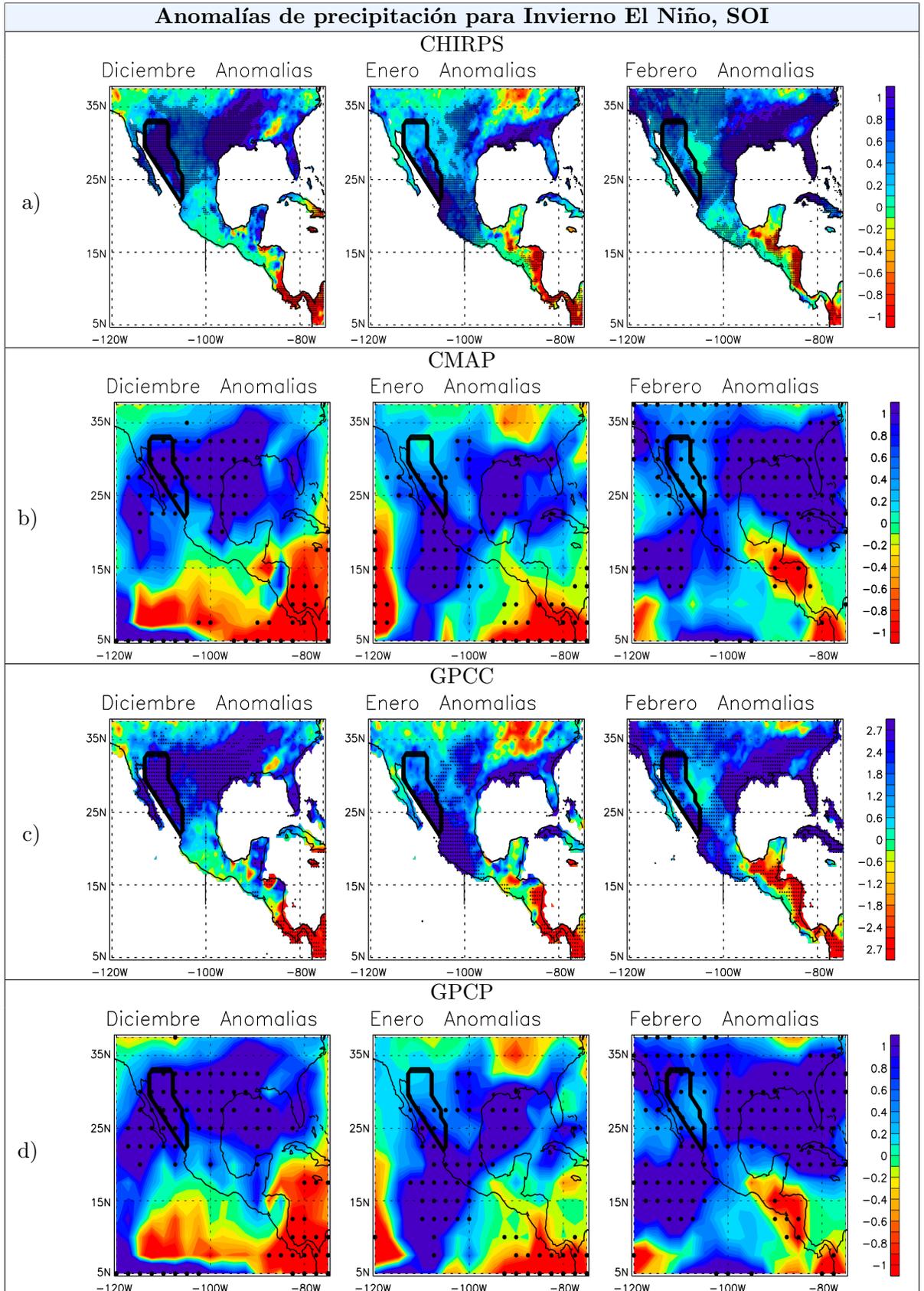


Figura B.4: Anomalías de precipitación para invierno con eventos El Niño, utilizando el índice SOI con cuatro bases de precipitación.

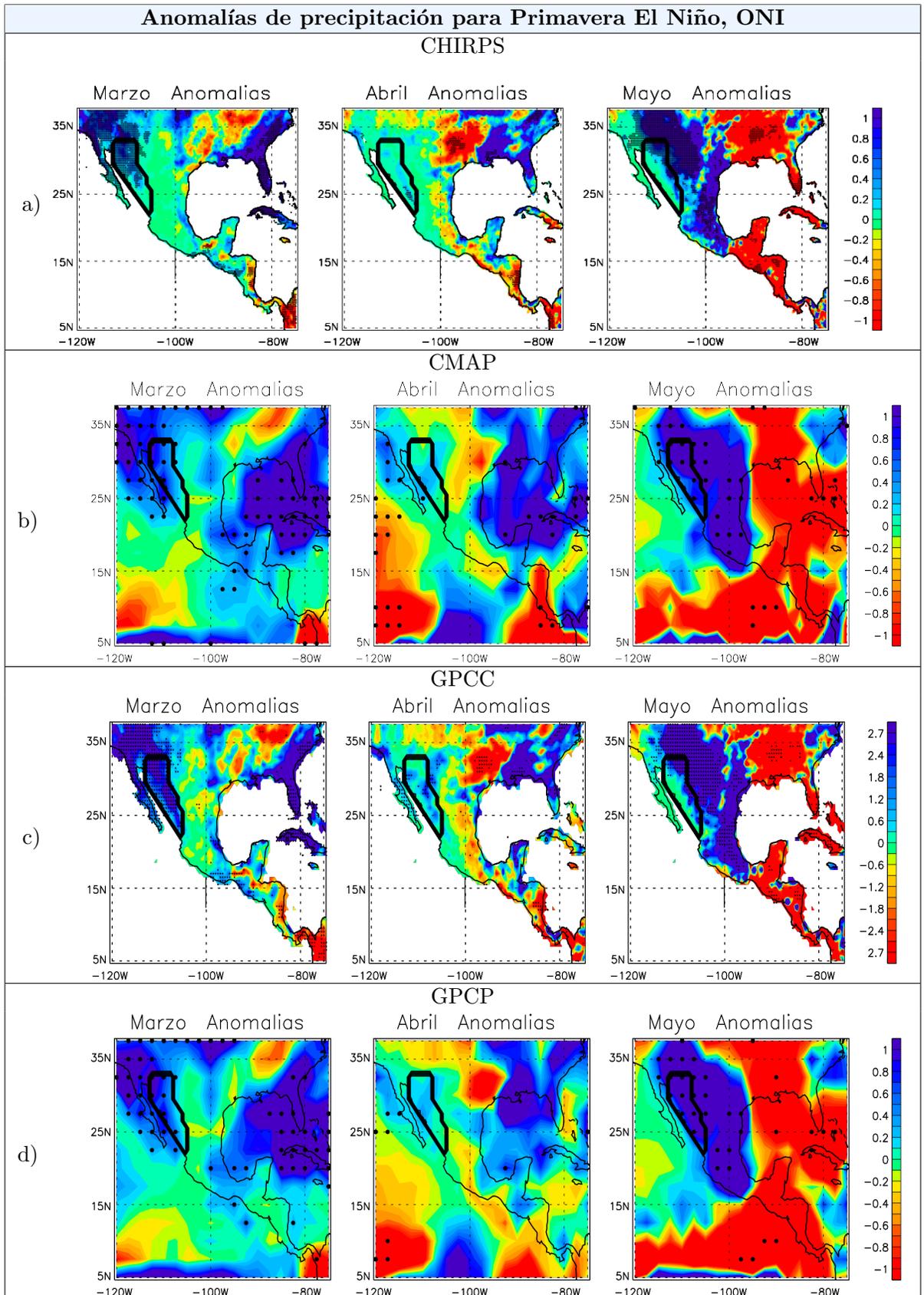


Figura B.5: Anomalías de precipitación para primavera con eventos El Niño, utilizando el índice ONI con cuatro bases de precipitación.

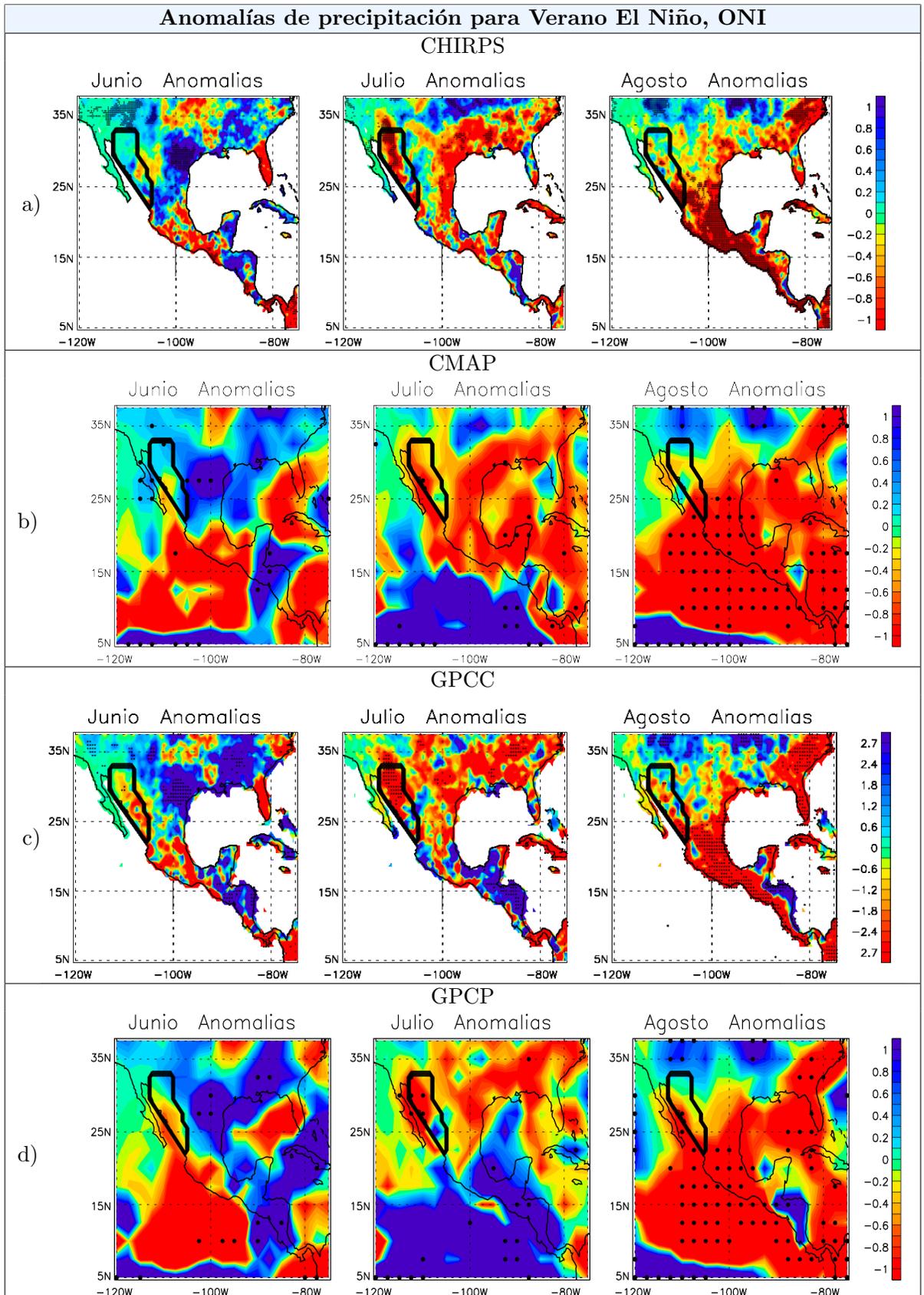


Figura B.6: Anomalías de precipitación para verano con eventos El Niño, utilizando el índice ONI con cuatro bases de precipitación.

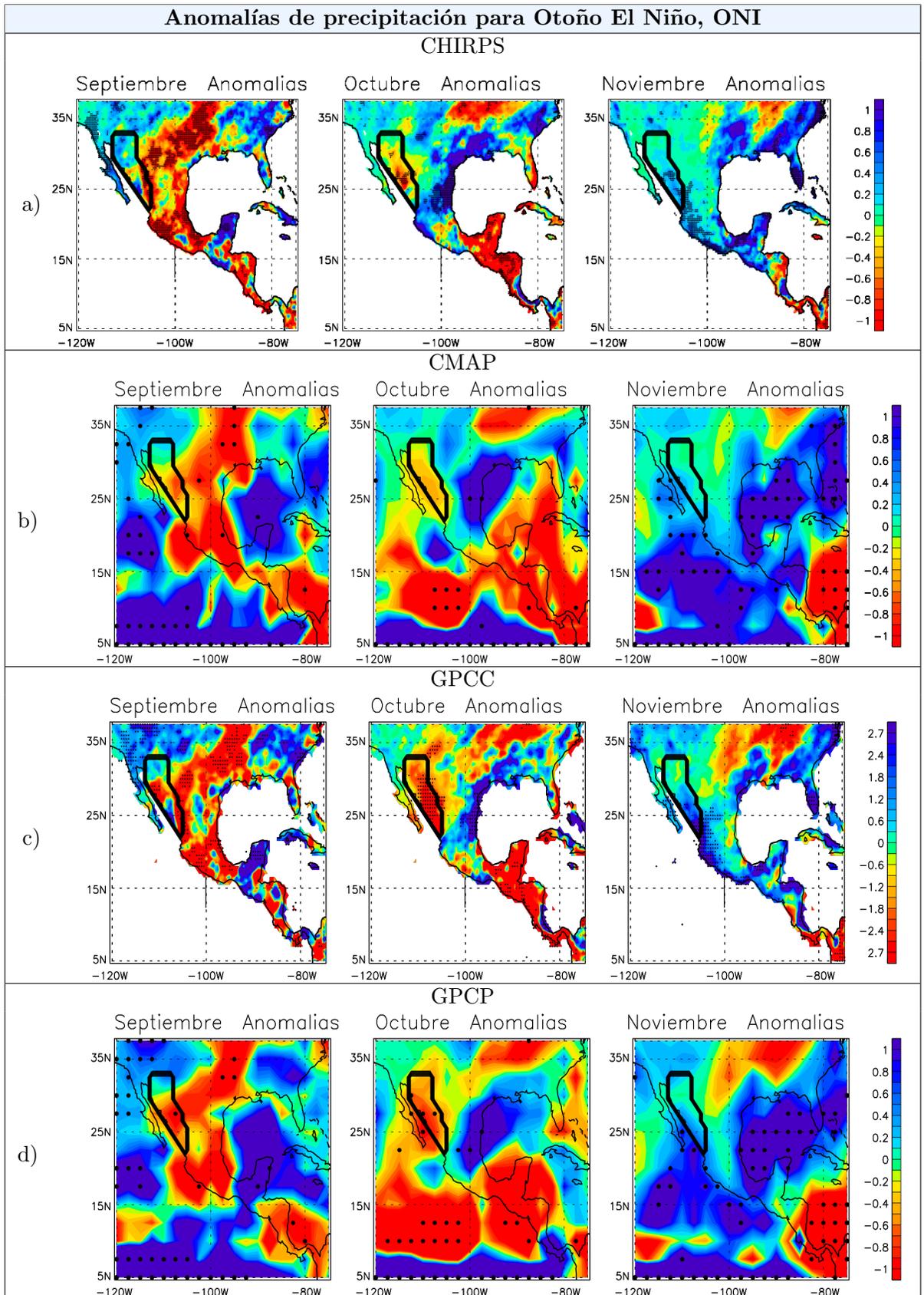


Figura B.7: Anomalías de precipitación para otoño con eventos El Niño, utilizando el índice ONI con cuatro bases de precipitación.

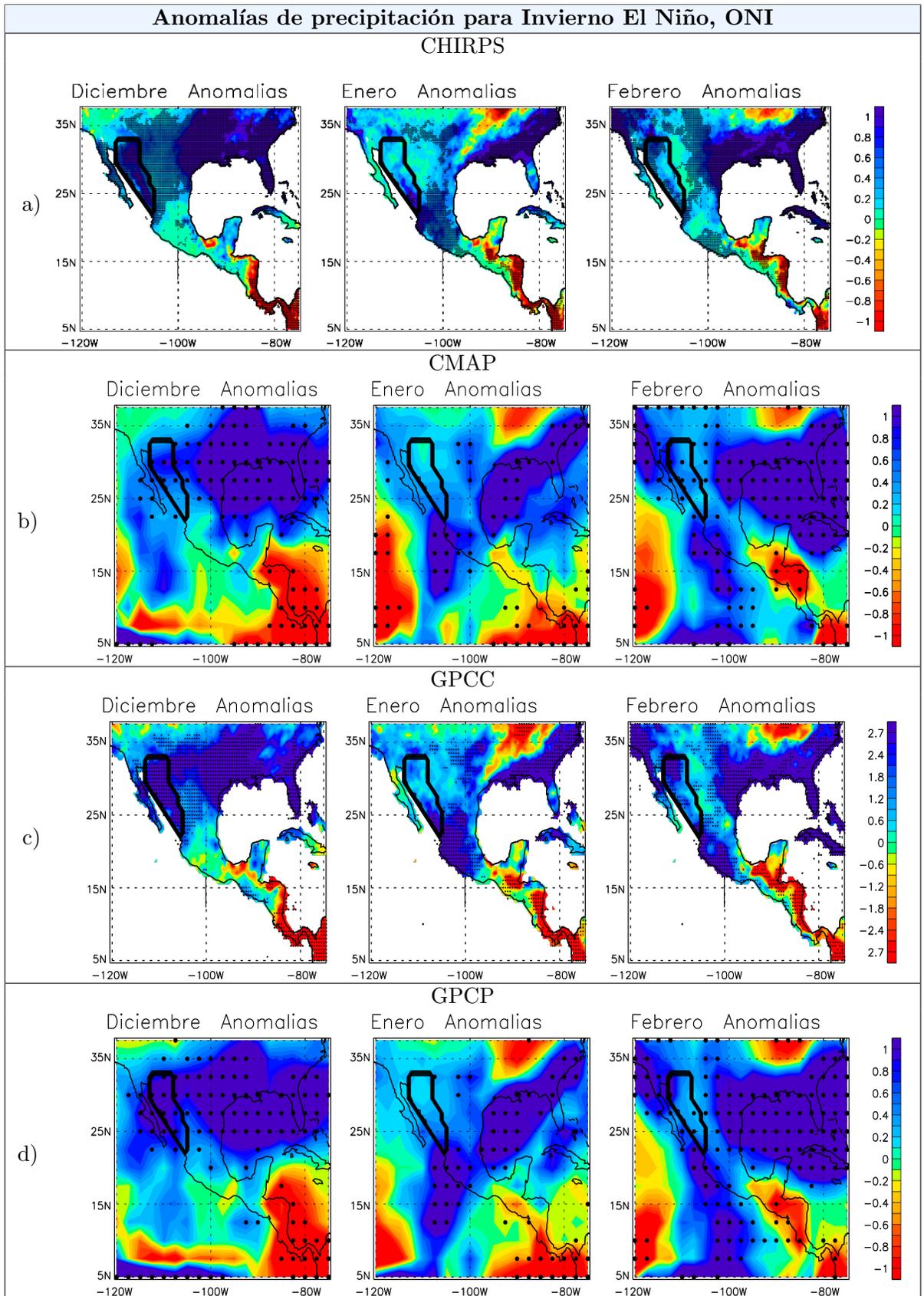


Figura B.8: Anomalías de precipitación para invierno con eventos El Niño, utilizando el índice ONI con cuatro bases de precipitación.

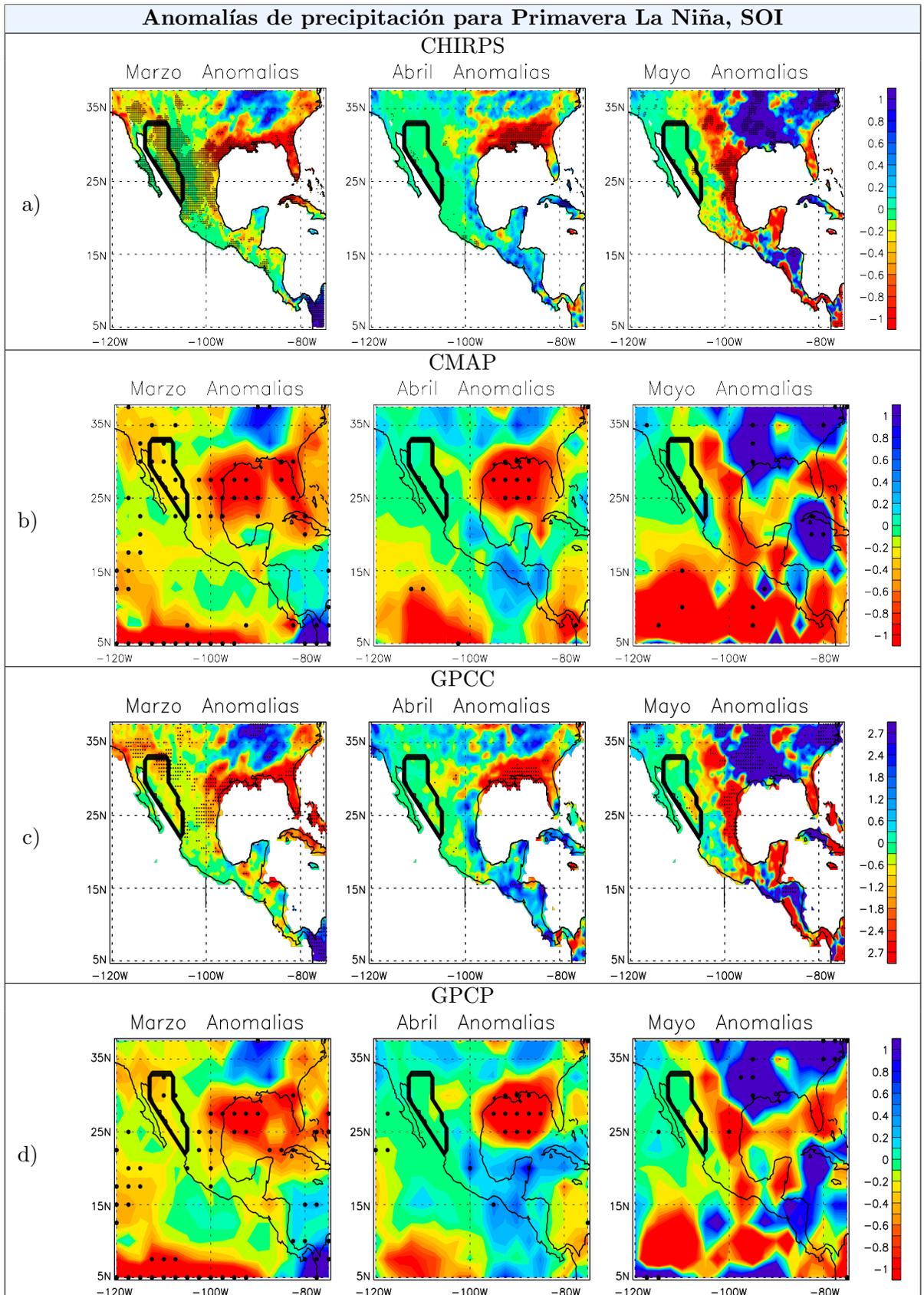


Figura B.9: Anomalías de precipitación para primavera con eventos La Niña, utilizando el índice SOI con cuatro bases de precipitación.

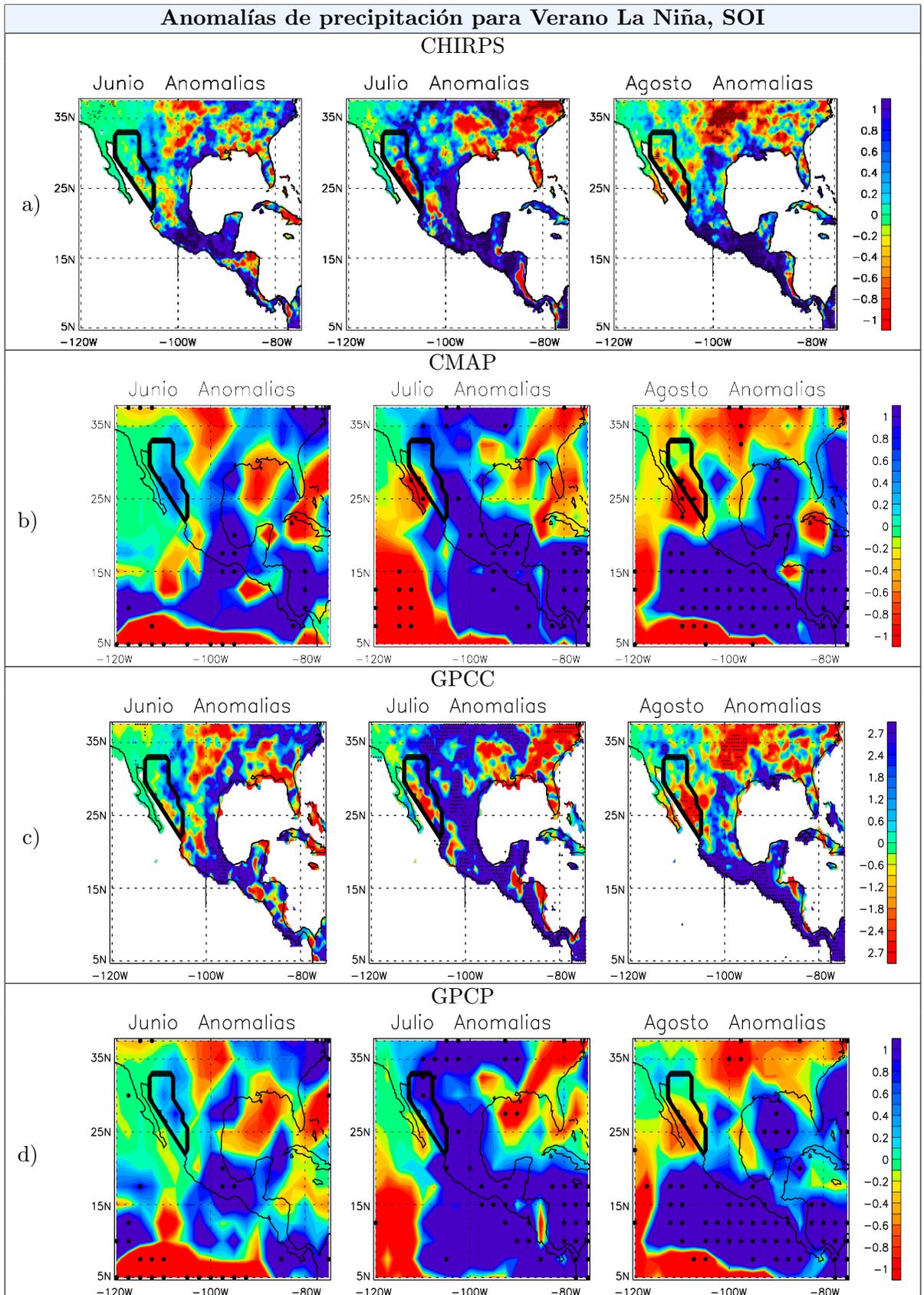


Figura B.10: Anomalías de precipitación para verano con eventos La Niña, utilizando el índice SOI con cuatro bases de precipitación.

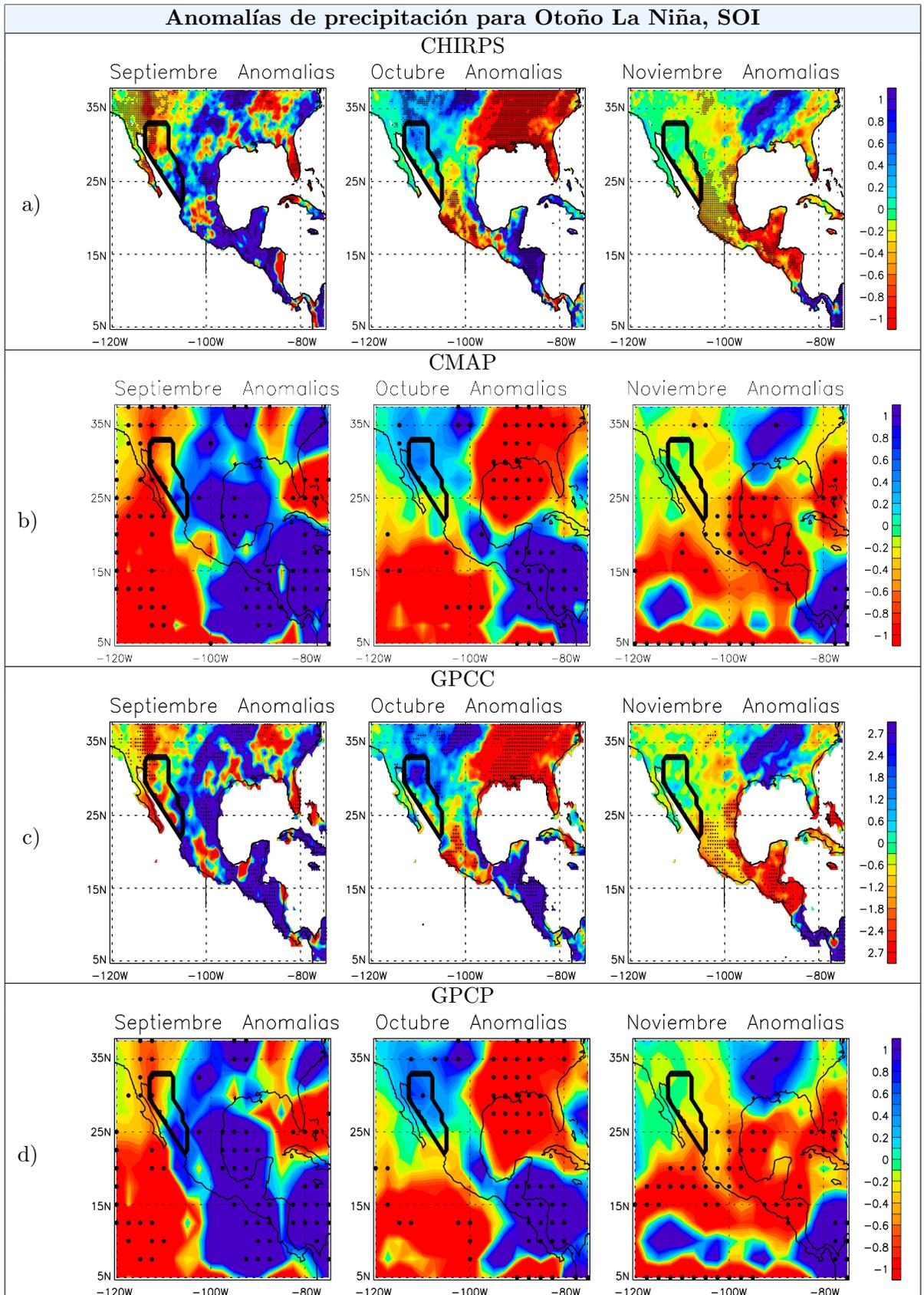


Figura B.11: Anomalías de precipitación para otoño con eventos La Niña, utilizando el índice SOI con cuatro bases de precipitación.

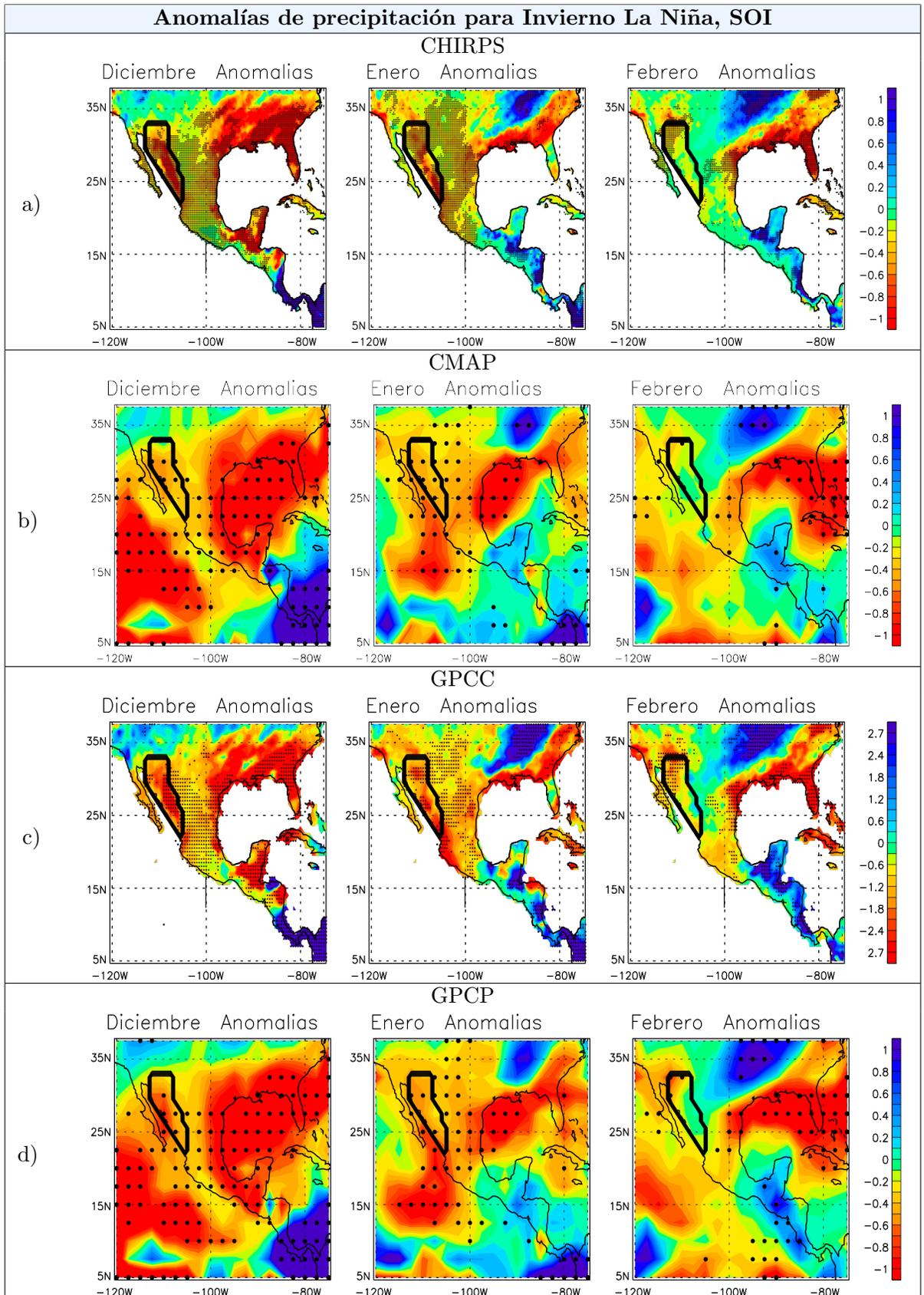


Figura B.12: Anomalías de precipitación para invierno con eventos La Niña, utilizando el índice SOI con cuatro bases de precipitación.

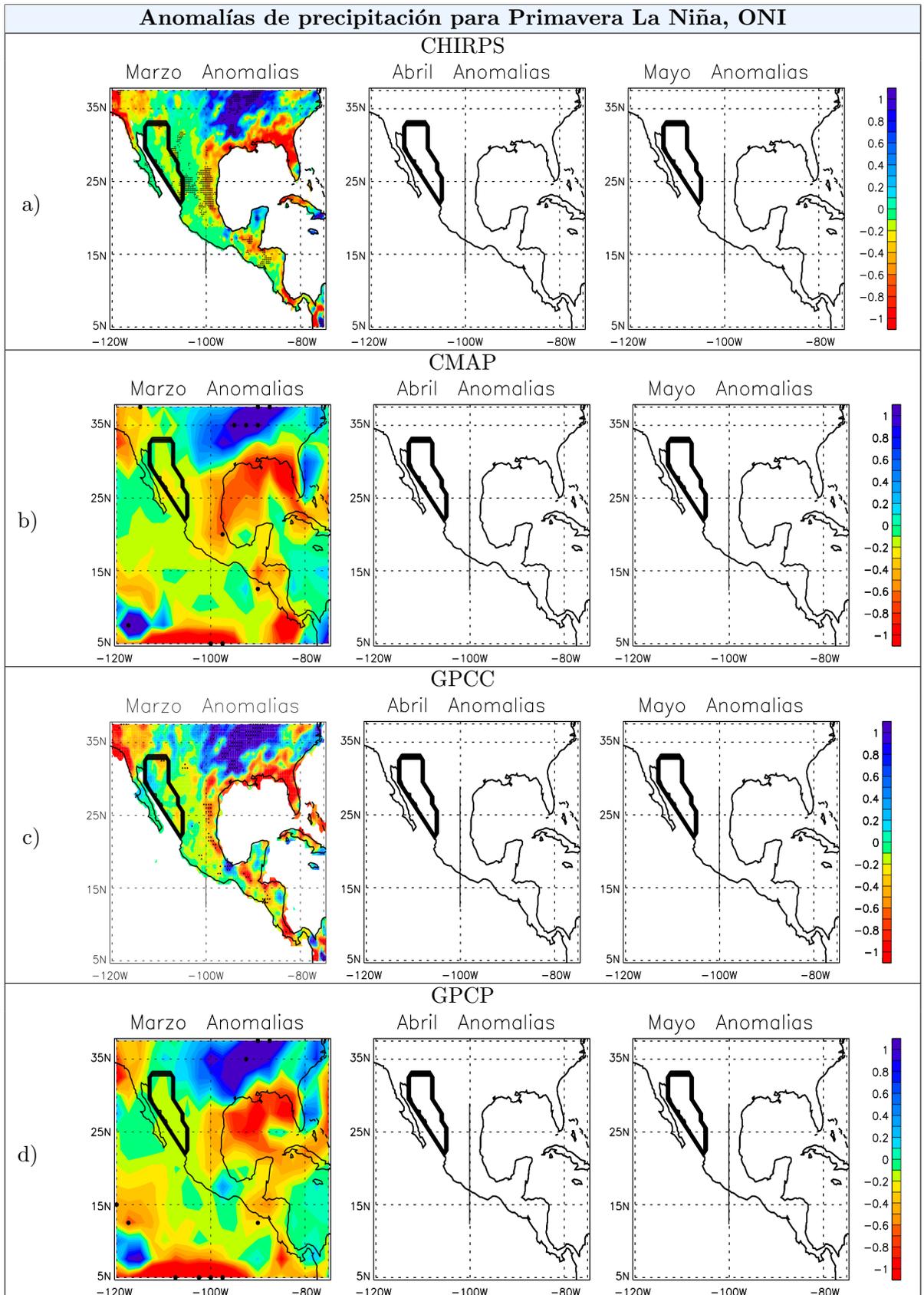


Figura B.13: Anomalías de precipitación para primavera con eventos La Niña, utilizando el índice ONI con cuatro bases de precipitación.

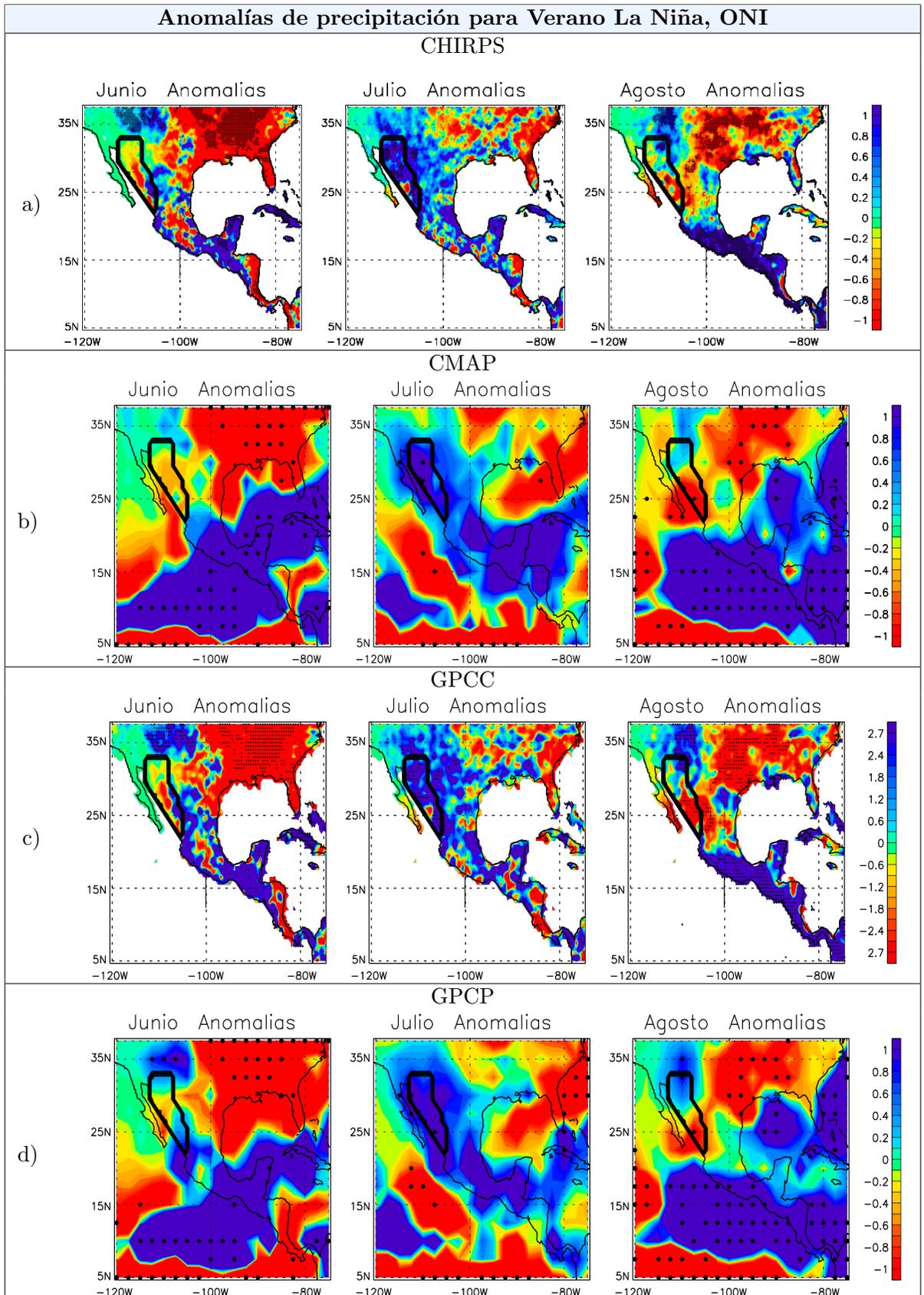


Figura B.14: Anomalías de precipitación para verano con eventos La Niña, utilizando el índice ONI con cuatro bases de precipitación.

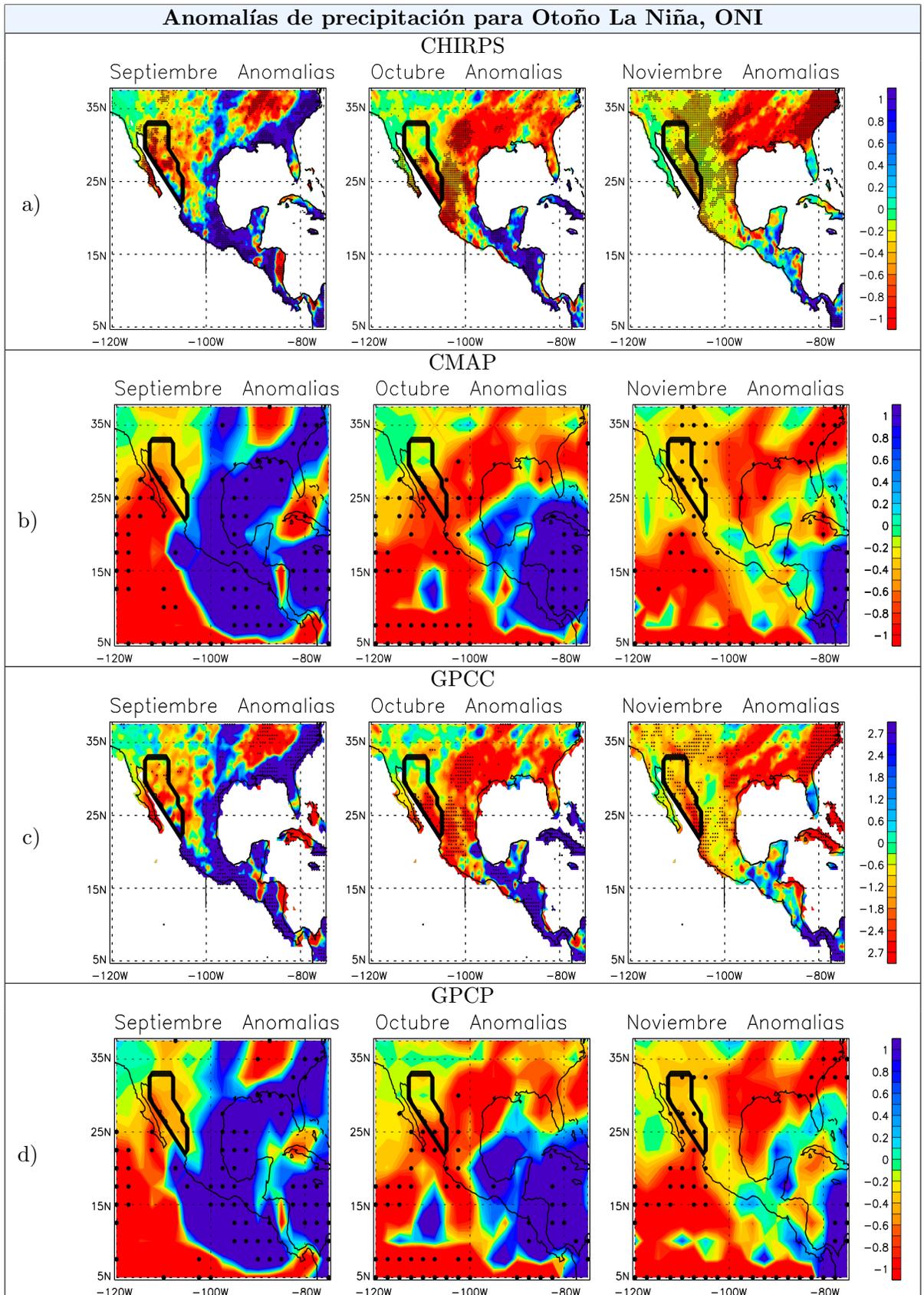


Figura B.15: Anomalías de precipitación para otoño con eventos La Niña, utilizando el índice ONI con cuatro bases de precipitación.

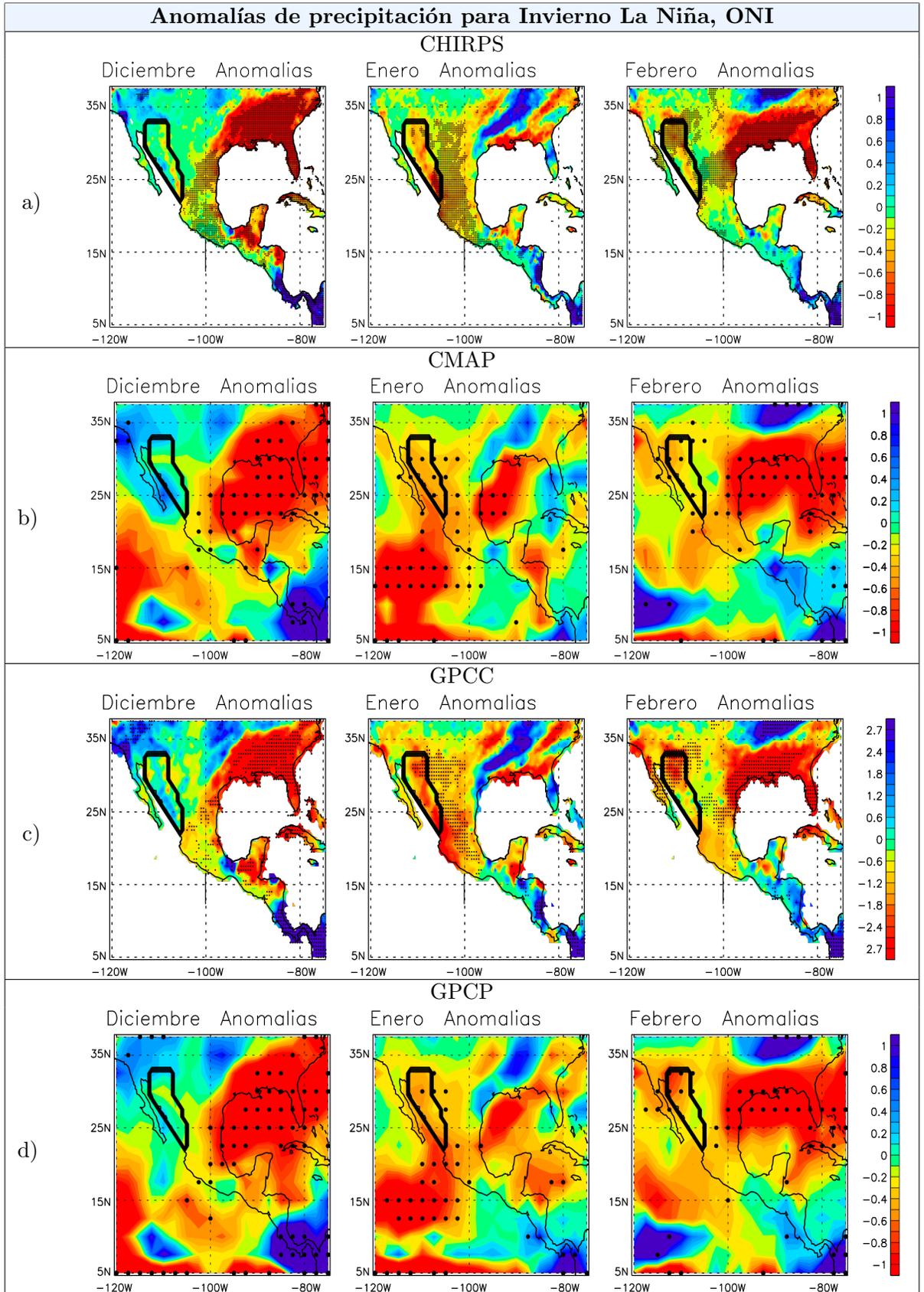


Figura B.16: Anomalías de precipitación para invierno con eventos La Niña, utilizando el índice ONI con cuatro bases de precipitación.

Bibliografía

- Adamec, D. (2010). Typical weather changes in the United States during an El Niño (top) and during a La Niña (bottom). http://forces.si.edu/elnino/01_02_00bc.html. Smithsonian National Museum of Natural History.
- Adams, D. K. (1997). Review of Variability in the North American Monsoon. <http://geochange.er.usgs.gov/sw/changes/natural/monsoon/>.
- Adams, D. K. and Comrie, A. C. (1997). The north American monsoon. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(10):2197–2213.
- Adler, R. F., Huffman, G. J., Chang, A., Ferraro, R., Xie, P.-P., Janowiak, J., Rudolf, B., Schneider, U., Curtis, S., Bolvin, D., et al. (2003). The version-2 global precipitation climatology project (GPCP) monthly precipitation analysis (1979-present). *Journal of hydrometeorology*, 4(6):1147–1167.
- Arkin, P., Xie, P., and for Atmospheric Research Staff(Eds.), N. C. (2016). The climate data guide: CMAP: CPC merged analysis of precipitation. <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/cmap-cpc-merged-analysis-precipitation>.
- Balaji Rajagopalan, W. and Grantz, K. (2008). North American Monsoon Variability: Implications to Water Resources Management in the Southwestern US.
- Bjerknes, J. (1968). Atmospheric teleconnections from the equatorial pacific.
- Cai, W., Borlace, S., Lengaigne, M., Van Rensch, P., Collins, M., Vecchi, G., Timmermann, A., Santoso, A., McPhaden, M. J., Wu, L., et al. (2014). Increasing frequency of extreme El Niño events due to greenhouse warming. *Nature climate change*, 4(2):111–116.
- Carleton, A. M. (1986). Synoptic-dynamic character of ‘bursts’ and ‘breaks’ in the South-West US summer precipitation singularity. *Journal of Climatology*, 6(6):605–623.
- Chang, C., Wang, B., and Lau, N. (2005). *The Global Monsoon System: Research and Forecast Report of the International Committee of the Third International Workshop on Monsoons (IWM-III)*. 1266. Geneva, Switzerland.
- Compagnucci, R. H. and Agosta, E. A. (2008). La precipitación de verano en el centro-oeste de argentina y los fenómenos interanual El Niño/Oscilación Sur (ENOS) e interdecádico” tipo. *enos. Geoacta*, 33:97–103.
- Cook, B. and Seager, R. (2013). The future of the North American monsoon.
- Crimmins, M. (2006). Arizona and the North American monsoon system.

- de Carvalho, L. M. V. (2016). The monsoons and climate change. In *The Monsoons and Climate Change*, pages 1–6. Springer.
- Dee, D., Uppala, S., Simmons, A., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M., Balsamo, G., Bauer, 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.
- Di Liberto, T. (2014). The Walker Circulation: ENSO’s atmospheric buddy. <https://www.climate.gov/news-features/blogs/enso/walker-circulation-ensos-atmospheric-buddy>.
- Douglas, M. W., Maddox, R. A., Howard, K., and Reyes, S. (1993). The mexican monsoon. *Journal of Climate*, 6(8):1665–1677.
- 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).
- Efron, B. and Tibshirani, R. (1993). An introduction to the Bootstrap Chapman and Hall New York Google Scholar.
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., et al. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific data*, 2.
- Gimeno, L., Nieto, R., Drumond, A., Castillo, R., and Trigo, R. (2013). Influence of the intensification of the major oceanic moisture sources on continental precipitation. *Geophysical Research Letters*, 40(7):1443–1450.
- Gochis, D. J., Jimenez, A., Watts, C. J., Garatuza-Payan, J., and Shuttleworth, W. J. (2004). Analysis of 2002 and 2003 warm-season precipitation from the North American Monsoon Experiment event rain gauge network. *Monthly weather review*, 132(12):2938–2953.
- Grantz, K., Rajagopalan, B., Clark, M., and Zagona, E. (2007). Seasonal shifts in the north American monsoon. *Journal of Climate*, 20(9):1923–1935.
- Gruber, A. and Levizzani, V. (2008). Assessment of Global Precipitation Products A project of the World Climate Research Programme Global Energy and Water Cycle Experiment (GEWEX) Radiation Panel.
- Higgins, R., Shi, W., and Hain, C. (2004). Relationships between Gulf of California moisture surges and precipitation in the southwestern United States. *Journal of Climate*, 17(15):2983–2997.
- Higgins, W. and Gochis, D. (2007). Synthesis of results from the North American Monsoon Experiment (NAME) process study. *Journal of Climate*, 20(9):1601–1607.
- Holton, J. R., Dmowska, R., and Philander, S. G. (1989). *El Niño, La Niña, and the southern oscillation*, volume 46. Academic press.
- Holton, J. R. and Hakim, G. J. (2012). *An introduction to dynamic meteorology*, volume 88. Academic press.

- Hu, H. and Dominguez, F. (2015). Evaluation of oceanic and terrestrial sources of Moisture for the North American Monsoon using numerical models and precipitation stable isotopes. *Journal of Hydrometeorology*, 16(1):19–35.
- Kessler, W. (2016). El Nino and La Nina-Related Winter Features Over North America. <https://faculty.washington.edu/kessler/ENSO/nawinter.html>.
- Lau, K. and Yang, S. (2003). Walker circulation. *Encyclopedia of atmospheric sciences*, pages 2505–2510.
- Lindsey, R. (2011). Influence of El Niño and La Niña on Southwest Rainfall. <https://www.climate.gov/news-features/event-tracker/influence-el-ni%C3%B1o-and-la-ni%C3%B1a-southwest-rainfall>.
- Magaña, V. O., Vázquez, J. L., Pérez, J. L., and Pérez, J. B. (2003). Impact of el niño on precipitation in Mexico. *GEOFISICA INTERNACIONAL-MEXICO-*, 42(3):313–330.
- McLamb, B. and Davis, C. (2015). Strong El Nino Drives Pacific Patterns, Jet Stream Impacts. <http://climate.ncsu.edu/climateblog?id=163>.
- McPhaden, M. J. (2015). ENSO and the Tropical Pacific in a Changing Climate. <https://www.slideshare.net/CFCC15/guilyardi-e-201507071430unescofontenoyroomxii>.
- Meitin, J., Howard, K., and Maddox, R. (1991). The South-West Area Monsoon Project: Daily operations summary. *National Severe Storm Laboratory Tech. Rep.*
- NCAR (2015). The climate data guide: GPCC: Global Precipitation Climatology Centre. <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/gpcc-global-precipitation-climatology-centre>.
- NCSU (2017). Global patterns el niño-southern oscillation(enso). <http://climate.ncsu.edu/climate/patterns/ENSO.html>.
- Nieto, R., Gimeno, L., Gallego, D., and Trigo, R. (2007). Contributions to the moisture budget of airmasses over Iceland. *Meteorologische Zeitschrift*, 16(1):37–44.
- Nieto, R., Gimeno, L., and Trigo, R. M. (2006). A Lagrangian identification of major sources of sahel moisture. *Geophysical Research Letters*, 33(18).
- NOAA (2005a). El Nino Related Changes in Atmospheric Circulation in the Subtropics and Middle Latitudes. http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensocycle/enso_circ.shtml.
- NOAA (2005b). The Southern Oscillation Index. http://www.cpc.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensocycle/soi.shtml.
- NOAA (2011). Global impacts of El Niño and La Niña. <https://feww.wordpress.com/tag/north-american-monsoon/>.
- NOAA, OAR, and PSD, E. (2016). GPCC GPCP and CMAP Precipitation Data. <http://www.esrl.noaa.gov/psd/>.

- 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.
- NWS (2005). Mean Tropical Pacific Rainfall, Winds and Subsurface Ocean Structure. http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensocycle/meanrain.shtml.
- NWS (2011). NAMS. <https://feww.wordpress.com/tag/north-american-monsoon/>.
- NWS (2016). North American Monsoon. http://www.wrh.noaa.gov/twc/monsoon/monsoon_NA.php.
- of Meteorology, B. (2012). Record-breaking la niña events. *Australian Government*.
- 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.
- Pendergrass, A. and NCAR (2016). The climate data guide: GPCP(monthly): Global Precipitation Climatology Project. <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/gpcp-monthly-global-precipitation-climatology-project>.
- Program, C. (2011). Introduction to Tropical Meteorology.
- Ramage, C. (1971). A Weather Pattern.(book reviews: Monsoon Meteorology). *Science*, 172:691–692.
- Ramírez, V. and Jaramillo, A. (2009). Relación entre el índice oceánico de El Niño y la lluvia en la región andina central de Colombia.
- Ropelewski, C. F. and Halpert, M. S. (1986). North American precipitation and temperature patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation (ENSO). *Monthly Weather Review*, 114(12):2352–2362.
- 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.
- Schmitz, J. T. and Mullen, S. L. (1996). Water vapor transport associated with the summertime North American monsoon as depicted by ECMWF analyses. *Journal of Climate*, 9(7):1621–1634.
- Schneider, U., Becker, A., Finger, P., Meyer-Christoffer, A., Rudolf, B., and Ziese, M. (2016). GPCC full data reanalysis version 7.0 at 0.5: Monthly land-surface precipitation from rain-gauges built on GTE-based and historic data. DOI: 10.5676/DWD_GPCC/FD_N_V7_050.
- Schneider, U., Becker, A., Finger, P., Meyer-Christoffer, A., Ziese, M., and Rudolf, B. (2014). GPCC’s new land surface precipitation climatology based on quality-controlled in situ data and its role in quantifying the global water cycle. *Theoretical and Applied Climatology*, 115(1-2):15–40.

- Smith, C. A., Sardeshmukh, P. D., et al. (2000). The effect of ENSO on the intraseasonal variance of surface temperatures in winter. *International Journal of Climatology*, 20(13):1543–1557.
- 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.
- Timmermann, A., Oberhuber, J., Bacher, A., Esch, M., Latif, M., and Roeckner, E. (1999). Increased El Niño frequency in a climate model forced by future greenhouse warming. *Nature*, 398(6729):694–697.
- Vecchi, G. A. and Wittenberg, A. T. (2010). El niño and our future climate: where do we stand? *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 1(2):260–270.
- Vera, C., Higgins, W., Amador, J., Ambrizzi, T., Garreaud, R., Gochis, D., Gutzler, D., Lettenmaier, D., Marengo, J., Mechoso, C., et al. (2006). Toward a unified view of the American monsoon systems. *Journal of Climate*, 19(20):4977–5000.
- Vernon, K. E. (2003). The el Niño/Southern Oscillation (ENSO) cycle. <https://www.meted.ucar.edu/climate/enso/>.
- Walker, G. T. and Bliss, E. (1932). World weather. V. *Mem. Roy. Meteor. Soc.*, 4:53–84.
- Wallén, C. C. (1955). Some characteristics of precipitation in Mexico. *Geografiska Annaler*, 37(1/2):51–85.
- Wang, B., Li, X., Huang, Y., and Zhai, G. (2016). Decadal trends of the annual amplitude of global precipitation. *Atmospheric Science Letters*, 17(1):96–101.
- Xie, P. and Arkin, P. A. (1997). Global precipitation: A 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates, and numerical model outputs. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(11):2539.
- Yeh, S.-W., Kug, J.-S., Dewitte, B., Kwon, M.-H., Kirtman, B. P., and Jin, F.-F. (2009). El niño in a changing climate. *Nature*, 461(7263):511–514.