



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA**

CLIMATOLOGÍA SINÓPTICA DEL CENTRO DE MÉXICO

**TESIS DE GRADO
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

**PRESENTA:
Lic. YOEL ALEJANDRO CALA PÉREZ**

**TUTOR
Dr. CARLOS ABRAHAM OCHOA MOYA
[CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA, UNAM]**

**MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR
Dr. IGNACIO ARTURO QUINTANAR ISAÍAS
[CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA, UNAM]
Dr. DIEGO ADOLFO ALFARO BEREÁ
[CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA, UNAM]
Dr. JUAN MATÍAS MÉNDEZ PÉREZ
[UNIVERSIDAD VERACRUZANA]
Dr. JOHN ALEJANDRO MARTÍNEZ AGUDELO
[UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA, MEDELLÍN, COLOMBIA]**

CIUDAD UNIVERSITARIA, CIUDAD DE MÉXICO, JUNIO DEL 2018



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.



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA**

CLIMATOLOGÍA SINÓPTICA DEL CENTRO DE MÉXICO

**TESIS DE GRADO
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

**PRESENTA:
Lic. YOEL ALEJANDRO CALA PÉREZ**

**TUTOR
Dr. CARLOS ABRAHAM OCHOA MOYA
[CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA, UNAM]**

**MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR
Dr. IGNACIO ARTURO QUINTANAR ISAÍAS
[CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA, UNAM]
Dr. DIEGO ADOLFO ALFARO BEREÁ
[CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA, UNAM]
Dr. JUAN MATÍAS MÉNDEZ PÉREZ
[UNIVERSIDAD VERACRUZANA]
Dr. JOHN ALEJANDRO MARTÍNEZ AGUDELO
[UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA, MEDELLÍN, COLOMBIA]**

CIUDAD UNIVERSITARIA, CIUDAD DE MÉXICO, JUNIO DEL 2018

Dedicatoria

A Dios y a mi familia

«Lo sabio es la meta del alma humana y a medida que se avanza en sus conocimientos va alejando a su vez el horizonte de lo desconocido»

Heráclito

Agradecimientos

Culminan estos dos años de ejercicio académico para la obtención del grado de Maestro en Ciencias de la Tierra y resaltan en mi mente incontables agradecimientos para todos aquellos que han puesto su granito de arena a lo largo de estos dos años.

En primer lugar, agradezco a Dios por esta oportunidad de superación profesional, su amor incondicional y por la fe que nos mueve cada día a aceptar nuevos retos.

Mi agradecimiento especial y a quienes dedico esta tesis: a mis padres Marianela y Nemecio, mi hermana Yeraldyn y a mi sobrino Liosvany. Llegue también al resto de mi familia mi más sincero agradecimiento por la confianza depositada en mí. Después de meses de distancia y horas de nostalgia, este es el mejor presente que les puedo dedicar.

Se agotarían las palabras para agradecer a mi tutor, Dr. Carlos Abraham Ochoa Moya. Infinitas gracias por su tiempo, por las horas de sueño, por soportar mis momentos de estrés. Gracias por la confianza depositada en mí, que me hacía esforzarme cada vez más para no defraudarle. Gracias por su excelente calidad humana, transmitida a cada uno de sus estudiantes. Esta tesis ha sido, sin lugar a dudas, el resultado de su constante dirección, su gran potencial científico y las horas de trabajo que compartimos juntos. De nuevo, ¡mil gracias!

Agradezco a la Coordinación del Posgrado de Ciencias de la Tierra de la UNAM por la oportunidad de realizar mis estudios de Maestría; al Centro de Ciencias de la Atmósfera por la preparación académica recibida por sus investigadores y profesores y al CONACyT por el otorgamiento de beca de manutención para poder llevar a cabo estos estudios (CVU/No.Becario: 779876/613957). También agradezco al proyecto PAPIIT-IA102916 mediante el cual se pudo contar con la infraestructura tecnológica necesaria para desarrollar la presente investigación; al Instituto de Meteorología de Cuba (INSMET) por facilitar la información meteorológica mediante los mapas sinópticos y de altura empleados en la investigación.

No puedo dejar de mencionar a mis revisores de tesis, quienes dedicaron parte de su valioso tiempo a realizar las correcciones necesarias y sus oportunas sugerencias que enriquecieron mi formación científico-investigativa. Ellos son: Dr. Ignacio Arturo Quintanar Isaías, Dr. Diego Alfaro Berea, Dr. Juan Matías Méndez y Dr. John Alejandro Martínez Agudelo. Por otra parte, agradezco a la Dra. Paulina Ordóñez Pérez por haber formado parte de mi Comité Tutor durante los dos años de maestría.

Gran parte de este logro profesional se debe a la formación recibida en el InSTEC por mis estudios de licenciatura y a todos los profesores, desde la infancia hasta aquí, que han contribuido en mi formación como profesional y ser humano. Desde luego, mis compañeros de estudio también forman parte de estos recuerdos. Mi mente insiste en fallar, por lo tanto llegue a todos ellos mi agradecimiento.

Durante este tiempo en México, lejos de mi país y mis seres queridos, muchas personas han sido un aliciente para seguir adelante. Agradezco a Mercedes, Yanet, Sabas, Gian Carlos y al resto de la familia, me recibieron como un miembro más de la familia y ahora merecen disfrutar conmigo este logro. A dos chicas cubanas que la vida en México nos hizo hermanitos: Alina y María Isabel, gracias por los momentos tristes y alegres, de estrés y de diversión. De algo estoy seguro, no podrán borrarse de nuestras mentes tantos buenos momentos juntos en estos dos años.

Imposible dejar de mencionar a los hermanitos que la vida me regaló en la universidad: Orlando y Jose Paul. Dentro de unos días después de escribir estos agradecimientos estaremos juntos de nuevo, en esta ocasión en México. Gracias Orlando por ser mi apoyo siempre que lo necesito, por soportar mi mal humor cuando estoy cargado de trabajo y por todo este tiempo que hemos compartido juntos. Mi agradecimiento a todos mis amigos de Cuba, que han obviado la distancia para hacerme llegar sus deseos y su apoyo incondicional durante estos dos años.

Muchas gracias a mis compañeros de estudio de la maestría, en especial a Gustavo, Ana Elena y Julio, por la disposición a ayudar siempre que recurrí a ellos; también por hacer de las horas en el cubículo momentos alegres. Gracias por enseñarme tantos albures y una cultura mexicana tan real que ninguna enciclopedia podrá mostrar. Muchas gracias a Fernando Arellano por su ayuda con las cuestiones tecnológicas. No podría dejar de agradecer a la comunidad cubana del Centro de Ciencias de la Atmósfera, que cualquier pasillo y cualquier horario podían convertirse en un pedazo de Cuba; en especial a José Alejandro, Evelyn, Ana Carla, Samanta, Milena y Oscar. Muchas gracias a Yanet Díaz Esteban por su aporte invaluable a la metodología desarrollada en la presente investigación.

¡A todos muchas gracias!

Resumen

El objetivo de este estudio fue desarrollar una climatología sinóptica de los patrones que influyen en el comportamiento del tiempo en el centro de México. Se utilizaron datos de reanálisis de ERA Interim para la generación de los mapas sinópticos en superficie y en los niveles de altitud de 850, 700 y 500 hPa. En superficie se analizaron la presión atmosférica a nivel del mar y la temperatura, mientras que en altitud se analizaron los valores de altura geopotencial. El período de estudio fue 1980-2016, utilizando los valores de anomalías estandarizadas de las variables. El método utilizado para el reconocimiento de patrones sinópticos fue “Self-Organizing Maps (SOM)”, que permitió agrupar clústeres con patrones similares. Se determinó la frecuencia de ocurrencia de los patrones en escalas temporales menores, persistencia y transición de los patrones sinópticos. Se detectaron 20 patrones sinópticos anuales que determinan el comportamiento del tiempo en el centro de México, de ellos se reconoció su estacionalidad en escalas temporales menores como períodos, trimestres y meses. El patrón sinóptico anual con mayor frecuencia de ocurrencia en el período húmedo (mayo-octubre) es el SLP-AN16 que representa la influencia del Anticiclón Subtropical del Atlántico sobre la región del Mar Caribe y Golfo de México, la presencia de un centro de bajas presiones sobre el NW de México y una hondonada en superficie sobre el centro de México. Durante el período seco (noviembre-abril) se detectó el patrón sinóptico SLP-AN06 como el más frecuente, representando la presencia de bajas extratropicales sobre el Golfo de México que conlleva al paso de sistemas frontales por la región central de México. El método SOM permitió reconocer la estacionalidad de los patrones sinópticos en escalas temporales menores.

Palabras claves: climatología sinóptica, self-organizing maps, patrones sinópticos

Abstract

ERA Interim was used to develop a synoptic pattern climatology that influences weather behavior in Central Mexico. Surface fields of sea level pressure and temperature were used. Geopotential Height at pressure levels of 850, 700 and 500 hPa was used to analyze the vertical structure of synoptic patterns. Standardized anomalies were calculated for each variable between 1980-2016. The method used to detect synoptic patterns was “Self-Organizing Maps (SOM)”, which allowed grouping clusters with similar patterns. Frequency of occurrence, seasonality, persistence and transition of synoptic patterns were determined. The algorithm detected 20 annual synoptic patterns that describe weather behavior over Central Mexico. Cluster seasonality was detected in smaller temporal scales like periods (wet and dry), quarters (or seasons) and months. The annual synoptic pattern with the highest frequency of occurrence in the wet period (May-October) is SLP-AN16, which represents influence of the Atlantic Subtropical Anticyclone over the Caribbean Sea and Gulf of Mexico, with presence of a low pressure center localized to NW Mexico and a trough in surface over Central Mexico. During the dry period (November-April), synoptic pattern SLP-AN06 was observed as the most frequent. Representing presence of extratropical lows over the Gulf of Mexico that lead to frontal systems through Central Mexico.

Key words: synoptic climatology, self-organizing maps, weather types

Tabla de contenidos

Dedicatoria	V
Agradecimientos	VII
Resumen	IX
Abstract	XI
1 Introducción	1
1.1 Fundamentación teórica y antecedentes de estudio.	1
1.1.1 Concepto y enfoques de la Climatología Sinóptica	1
1.1.2 Principales metodologías para la elaboración de climatologías sinópticas	3
1.1.3 Principales climatologías sinópticas desarrolladas en el mundo	6
1.1.4 Aplicaciones de la climatología sinóptica	11
1.1.5 Fenómenos sinópticos en México	14
1.2 Aspectos metodológicos de la investigación	15
1.2.1 Problema científico	15
1.2.2 Objetivos	15
1.2.3 Hipótesis	16
1.3 Estructura del documento	16
2 Materiales y métodos	17
2.1 Región de estudio	17
2.2 Datos de reanálisis de ERA Interim	18
2.3 Mapas sinópticos y de altitud utilizados para el análisis sinóptico	19
2.4 Método SOM para la obtención de patrones sinópticos	21
3 Análisis y discusión de los resultados	25
3.1 Patrones sinópticos anuales en superficie para la región central de México	25
3.1.1 Comportamiento de la frecuencia de los patrones anuales de SLP en escalas temporales menores	25
3.1.2 Comportamiento de la frecuencia de los patrones anuales de temperatura en superficie en escalas temporales menores	32
3.1.3 Correspondencia entre los patrones anuales de SLP y temperatura en superficie	38
3.1.4 Análisis meteorológico sinóptico de los patrones sinópticos anuales detectados con variables en superficie.	40

3.2	Patrones sinópticos anuales en diferentes niveles de altitud sobre la región central de México	54
3.2.1	Comportamiento de frecuencia de los patrones sinópticos de altura geopotencial en diferentes niveles de presión.	54
3.2.2	Relación entre los patrones sinópticos de altura geopotencial en los niveles de altura con los patrones sinópticos de SLP	64
3.3	Comportamiento de la persistencia y las transiciones entre los patrones sinópticos en superficie y altura	90
4	Conclusiones	95
5	Recomendaciones	98
6	Referencias bibliográficas	99
7	Apéndice A	110

Índice de cuadros

3-1	Comportamiento de los valores de anomalías estandarizadas de los patrones sinópticos anuales de SLP	25
3-2	Comportamiento de los patrones sinópticos anuales de SLP por trimestres, expresado en porcentajes de frecuencia. Las celdas amarillas representan los patrones cuya suma porcentual de frecuencia es mayor o igual al 80 %.	28
3-3	Comportamiento de los patrones sinópticos anuales de SLP en los meses del año, expresado en porcentajes de frecuencia.	30
3-4	Comportamiento de los patrones sinópticos anuales de SLP en cada mes del año, expresado en porcentajes de frecuencia.	31
3-5	Comportamiento de los valores de anomalías estandarizadas de los patrones sinópticos anuales de S2T.	34
3-6	Comportamiento de los patrones de S2T por trimestres. Las celdas en color amarillo representan los patrones cuya suma porcentual de frecuencia es mayor o igual al 80 %.	36
3-7	Comportamiento de los patrones de S2T en los meses del año.	38
3-8	Relación entre los patrones sinópticos de SLP y S2T.	39
3-9	Comportamiento de los valores de anomalías estandarizadas de los clústeres de G500	56
3-10	Comportamiento por periodos y trimestres de los patrones de G500, expresado en valores porcentuales.	57
3-11	Comportamiento de los valores de anomalías estandarizadas en los clústeres de G700	58
3-12	Comportamiento por periodos y trimestres de los patrones de G700, expresado en valores porcentuales	60
3-13	Comportamiento de los valores de anomalías estandarizadas en los clústeres de G850	61
3-14	Comportamiento por periodos y trimestres de los patrones de G850, expresado en valores porcentuales	63
3-15	Relaciones porcentuales entre los patrones SLP y G500	65
3-16	Relaciones entre los patrones SLP y G700, expresado en valores porcentuales . . .	74
3-17	Relaciones entre los patrones SLP y G850, expresado en valores porcentuales. . . .	82
3-18	Persistencia en días de los patrones sinópticos de SLP	90
3-19	Transiciones entre patrones sinópticos de SLP en cifras porcentuales. Las filas representan los patrones sinópticos antecedentes y las columnas los patrones sinópticos sucesores	93

Índice de figuras

Figura2-1	Región de estudio para realizar el análisis sinóptico y su influencia en el territorio mexicano	17
Figura2-2	Ejemplo de mapa sinóptico obtenido mediante los datos de reanálisis de ERA Interim, correspondiente al día 16 de julio del 2015 a las 1800Z. Los contornos representan isobaras (espaciadas cada 2 hPa) y los colores representan los valores de temperatura a dos metros de altura (expresada en Kelvin). Los centros de altas presiones se representan con la letra H y los centros de bajas presiones con la letra L.	20
Figura2-3	Ejemplo de mapa sinóptico obtenido del WPC. Fuente: http://www.wpc.ncep.noaa.gov/archives/web_pages/	20
Figura2-4	Ejemplo de mapa sinóptico del Centro de Pronóstico del INSMET. Fuente: Centro de Pronósticos del INSMET, Cuba.	21
Figura2-5	Cuadro resumen del método SOM. Fuente: Jankowski y Amanowicz (2015) .	22
Figura3-1	Patrones sinópticos anuales de SLP obtenidos mediante el método SOM. . .	26
Figura3-2	Comportamiento de los patrones sinópticos anuales de SLP por períodos seco (noviembre-abril) y húmedo (mayo-octubre) de acuerdo a su porcentaje de ocurrencia en el período de estudio.	27
Figura3-3	Patrones sinópticos anuales de S2T obtenidos mediante el método SOM. . .	33
Figura3-4	Comportamiento de los patrones de S2T en los períodos seco y húmedo de acuerdo a su porcentaje de ocurrencia en en el período de estudio.	35
Figura3-5	Mapas sinópticos característicos de los patrones sinópticos a) SLP-AN01 y b)SLP-AN02. Fuente: INSMET, Cuba.	41
Figura3-6	Mapas sinópticos característicos de los patrones sinópticos a) SLP-AN03 y b) SLP-AN04. Fuente: INSMET, Cuba.	42
Figura3-7	Mapas sinópticos característicos de los patrones sinópticos a)SLP-AN05 y b)SLP-AN06. Fuente: INSMET, Cuba.	44
Figura3-8	Mapas sinópticos característicos de los patrones sinópticos a) SLP-AN07 y b) SLP-AN08. Fuente: INSMET, Cuba.	45
Figura3-9	Mapas sinópticos característicos de los patrones sinópticos a)SLP-AN09 y b)SLP-AN10. Fuente: INSMET, Cuba.	47
Figura3-10	Mapas sinópticos característicos de los patrones sinópticos a)SLP-AN11 y b)SLP-AN12. Fuente: INSMET, Cuba.	48
Figura3-11	Mapas sinópticos característicos de los patrones sinópticos a)SLP-AN13 y b)SLP-AN14. Fuente: INSMET, Cuba.	49
Figura3-12	Mapas sinópticos característicos de los patrones sinópticos a)SLP-AN15 y b)SLP-AN16. Fuente: INSMET, Cuba.	50

Figura 3-13 Mapas sinópticos característicos de los patrones sinópticos a)SLP-AN17 y b)SLP-AN18. Fuente: INSMET, Cuba.	52
Figura 3-14 Mapas sinópticos característicos de los patrones sinópticos a)SLP-AN19 y b)SLP-AN20. Fuente: INSMET, Cuba.	53
Figura 3-15 Clústeres generados a partir de los valores de anomalías estandarizadas de altura geopotencial en 500 hPa, obtenidos mediante el método SOM.	55
Figura 3-16 Clústeres de los valores de anomalías estandarizadas de altura geopotencial en 700 hPa, obtenidos mediante el método SOM.	59
Figura 3-17 Clústeres de los valores de anomalías estandarizadas de altura geopotencial en 850 hPa, obtenidos mediante el método SOM.	62
Figura 3-18 Mapas de altitud en el nivel de 500 hPa que ejemplifica a los patrones sinópticos: a) SLP-AN01 y b) SLP-AN02	66
Figura 3-19 Mapas de altitud en el nivel de 500 hPa que ejemplifica a los patrones sinópticos SLP-AN03 y SLP-AN04	67
Figura 3-20 Mapas de altitud en el nivel de 500 hPa que ejemplifica a los patrones sinópticos: a) SLP-AN05 y b) SLP-AN06	68
Figura 3-21 Mapas de altitud en el nivel de 500 hPa que ejemplifica a los patrones sinópticos: a) SLP-AN07 y b) SLP-AN08	68
Figura 3-22 Mapas de altitud en el nivel de 500 hPa que ejemplifica a los patrones sinópticos: a) SLP-AN09 y b) SLP-AN10	69
Figura 3-23 Mapas de altitud en el nivel de 500 hPa que ejemplifica a los patrones sinópticos: a) SLP-AN11 y b) SLP-AN12	70
Figura 3-24 Mapas de altitud en el nivel de 500 hPa que ejemplifica a los patrones sinópticos: a) SLP-AN13 y b) SLP-AN14	70
Figura 3-25 Mapas de altitud en el nivel de 500 hPa que ejemplifica a los patrones sinópticos: a) SLP-AN15 y b) SLP-AN16	71
Figura 3-26 Mapas de altitud en el nivel de 500 hPa que ejemplifica a los patrones sinópticos: a) SLP-AN17 y b) SLP-AN18	72
Figura 3-27 Mapas de altitud en el nivel de 500 hPa que ejemplifica a los patrones sinópticos: a) SLP-AN19 y b) SLP-AN20	72
Figura 3-28 Mapas de altitud en el nivel de 700 hPa que ejemplifica a los patrones sinópticos: a) SLP-AN01 y b) SLP-AN02	73
Figura 3-29 Mapas de altitud en el nivel de 700 hPa que ejemplifica a los patrones sinópticos: a) SLP-AN03 y b) SLP-AN04	75
Figura 3-30 Mapas de altitud en el nivel de 700 hPa que ejemplifica a los patrones sinópticos: a) SLP-AN05 y b) SLP-AN06	76
Figura 3-31 Mapas de altitud en el nivel de 700 hPa que ejemplifica a los patrones sinópticos: a) SLP-AN07 y b) SLP-AN08	76
Figura 3-32 Mapas de altitud en el nivel de 700 hPa que ejemplifica a los patrones sinópticos: a) SLP-AN09 y b) SLP-AN10	77

Figura3-33 Mapas de altitud en el nivel de 700 hPa que ejemplifica a los patrones sinópticos: a) SLP-AN11 y b) SLP-AN12	78
Figura3-34 Mapas de altitud en el nivel de 700 hPa que ejemplifica a los patrones sinópticos: a) SLP-AN13 y b) SLP-AN14	79
Figura3-35 Mapas de altitud en el nivel de 700 hPa que ejemplifica a los patrones sinópticos: a) SLP-AN15 y b) SLP-AN16	79
Figura3-36 Mapas de altitud en el nivel de 700 hPa que ejemplifica a los patrones sinópticos: a) SLP-AN17 y b) SLP-AN18	80
Figura3-37 Mapas de altitud en el nivel de 700 hPa que ejemplifica a los patrones sinópticos: a) SLP-AN19 y b) SLP-AN20	81
Figura3-38 Mapas de altitud en el nivel de 850 hPa que ejemplifica a los patrones sinópticos: a) SLP-AN01 y b) SLP-AN02	83
Figura3-39 Mapas de altitud en el nivel de 850 hPa que ejemplifica a los patrones sinópticos: a) SLP-AN03 y b) SLP-AN04	83
Figura3-40 Mapas de altitud en el nivel de 850 hPa que ejemplifica a los patrones sinópticos: a) SLP-AN05 y b) SLP-AN06	84
Figura3-41 Mapas de altitud en el nivel de 850 hPa que ejemplifica a los patrones sinópticos: a) SLP-AN07 y b) SLP-AN08	85
Figura3-42 Mapas de altitud en el nivel de 850 hPa que ejemplifica a los patrones sinópticos: a) SLP-AN09 y b) SLP-AN10	86
Figura3-43 Mapas de altitud en el nivel de 850 hPa que ejemplifica a los patrones sinópticos: a) SLP-AN11 y b) SLP-AN12	86
Figura3-44 Mapas de altitud en el nivel de 850 hPa que ejemplifica a los patrones sinópticos: a) SLP-AN13 y b) SLP-AN14	87
Figura3-45 Mapas de altitud en el nivel de 850 hPa que ejemplifica a los patrones sinópticos: a) SLP-AN15 y b) SLP-AN16	88
Figura3-46 Mapas de altitud en el nivel de 850 hPa que ejemplifica a los patrones sinópticos: a) SLP-AN17 y b) SLP-AN18	88
Figura3-47 Mapas de altitud en el nivel de 850 hPa que ejemplifica a los patrones sinópticos: a) SLP-AN19 y b) SLP-AN20	89
Figura3-48 Persistencia promedio de los patrones sinópticos de SLP	91
Figura3-49 Ejemplos de la persistencia del patrón sinóptico SLP-AN05 para los días del 25 al 28 de febrero del 2003. Fuente: INSMET, Cuba.	92
Figura7-1 Representación del patrón sinóptico SLP-AN01 de acuerdo a sus valores de anomalías estandarizadas, mapa sinóptico en superficie y en niveles de altitud de 850, 700 y 500 hPa.	111
Figura7-2 Representación del patrón sinóptico SLP-AN02 de acuerdo a sus valores de anomalías estandarizadas, mapa sinóptico en superficie y en niveles de altitud de 850, 700 y 500 hPa.	111

Figura7-3	Representación del patrón sinóptico SLP-AN03 de acuerdo a sus valores de anomalías estandarizadas, mapa sinóptico en superficie y en niveles de altitud de 850, 700 y 500 hPa.	111
Figura7-4	Representación del patrón sinóptico SLP-AN04 de acuerdo a sus valores de anomalías estandarizadas, mapa sinóptico en superficie y en niveles de altitud de 850, 700 y 500 hPa.	112
Figura7-5	Representación del patrón sinóptico SLP-AN05 de acuerdo a sus valores de anomalías estandarizadas, mapa sinóptico en superficie y en niveles de altitud de 850, 700 y 500 hPa.	112
Figura7-6	Representación del patrón sinóptico SLP-AN06 de acuerdo a sus valores de anomalías estandarizadas, mapa sinóptico en superficie y en niveles de altitud de 850, 700 y 500 hPa.	112
Figura7-7	Representación del patrón sinóptico SLP-AN07 de acuerdo a sus valores de anomalías estandarizadas, mapa sinóptico en superficie y en niveles de altitud de 850, 700 y 500 hPa.	113
Figura7-8	Representación del patrón sinóptico SLP-AN08 de acuerdo a sus valores de anomalías estandarizadas, mapa sinóptico en superficie y en niveles de altitud de 850, 700 y 500 hPa.	113
Figura7-9	Representación del patrón sinóptico SLP-AN09 de acuerdo a sus valores de anomalías estandarizadas, mapa sinóptico en superficie y en niveles de altitud de 850, 700 y 500 hPa.	113
Figura7-10	Representación del patrón sinóptico SLP-AN10 de acuerdo a sus valores de anomalías estandarizadas, mapa sinóptico en superficie y en niveles de altitud de 850, 700 y 500 hPa.	114
Figura7-11	Representación del patrón sinóptico SLP-AN11 de acuerdo a sus valores de anomalías estandarizadas, mapa sinóptico en superficie y en niveles de altitud de 850, 700 y 500 hPa.	114
Figura7-12	Representación del patrón sinóptico SLP-AN12 de acuerdo a sus valores de anomalías estandarizadas, mapa sinóptico en superficie y en niveles de altitud de 850, 700 y 500 hPa.	114
Figura7-13	Representación del patrón sinóptico SLP-AN13 de acuerdo a sus valores de anomalías estandarizadas, mapa sinóptico en superficie y en niveles de altitud de 850, 700 y 500 hPa.	115
Figura7-14	Representación del patrón sinóptico SLP-AN14 de acuerdo a sus valores de anomalías estandarizadas, mapa sinóptico en superficie y en niveles de altitud de 850, 700 y 500 hPa.	115
Figura7-15	Representación del patrón sinóptico SLP-AN15 de acuerdo a sus valores de anomalías estandarizadas, mapa sinóptico en superficie y en niveles de altitud de 850, 700 y 500 hPa.	115

Figura7-16 Representación del patrón sinóptico SLP-AN16 de acuerdo a sus valores de anomalías estandarizadas, mapa sinóptico en superficie y en niveles de altitud de 850, 700 y 500 hPa.	116
Figura7-17 Representación del patrón sinóptico SLP-AN17 de acuerdo a sus valores de anomalías estandarizadas, mapa sinóptico en superficie y en niveles de altitud de 850, 700 y 500 hPa.	116
Figura7-18 Representación del patrón sinóptico SLP-AN18 de acuerdo a sus valores de anomalías estandarizadas, mapa sinóptico en superficie y en niveles de altitud de 850, 700 y 500 hPa.	116
Figura7-19 Representación del patrón sinóptico SLP-AN19 de acuerdo a sus valores de anomalías estandarizadas, mapa sinóptico en superficie y en niveles de altitud de 850, 700 y 500 hPa.	117
Figura7-20 Representación del patrón sinóptico SLP-AN20 de acuerdo a sus valores de anomalías estandarizadas, mapa sinóptico en superficie y en niveles de altitud de 850, 700 y 500 hPa.	117

1 Introducción

1.1. Fundamentación teórica y antecedentes de estudio.

1.1.1. Concepto y enfoques de la Climatología Sinóptica

El estudio de la circulación general de la atmósfera y su influencia en los diferentes componentes del sistema climático ha sido objeto de investigación por parte de la comunidad científica desde mediados del siglo XIX (Sheridan, 2002). Los fenómenos de escala sinóptica, como parte de la circulación atmosférica, presentan características dinámicas que permiten reconocer centros de acción permanentes y estacionarios, así como comportamientos similares en cuanto a frecuencia y variabilidad en una relación espacio-tiempo que contribuyen a estudios climatológicos.

La Climatología Sinóptica es la rama de la climatología que se basa en el análisis de los fenómenos sinópticos y su evolución en un espacio y período de tiempo dado (Sánchez, 1976). De esta forma se estudian las leyes empíricas del comportamiento del tiempo en la región geográfica objeto de estudio (Gutiérrez Quevedo et al., 2008). Otros autores presentan la climatología sinóptica como la relación entre la circulación atmosférica y su influencia en el clima regional y local en un período de años determinado (Barry y Perry, 1973; Barry y Carleton, 2001).

El estudio de la Climatología Sinóptica tiene dos enfoques fundamentales y de acuerdo a ellos se utilizan diferentes materiales y métodos. El primer enfoque consiste en la determinación de categorías o patrones, en superficie y diferentes niveles, que presentan una mayor frecuencia y/o características similares, por lo que se le suele llamar “clasificación de tipos sinópticos” o “clasificación de situaciones sinópticas”. El segundo enfoque se basa en relacionar dichos patrones con las variables meteorológicas en superficie y altura, permitiendo así conocer su influencia en el estado del tiempo y en el clima de una región geográfica dada. En ambos casos, el análisis de los mapas de tiempo en superficie y en los diferentes niveles de presión atmosférica constituye una herramienta fundamental debido a que proveen al investigador del reconocimiento de los fenómenos sinópticos mediante los campos de las variables fundamentales como: presión a nivel de superficie, altura geopotencial, temperatura, viento, etc.

Con el objetivo de clasificar e identificar los fenómenos meteorológicos de acuerdo a su comportamiento espacial y temporal, se han definido diferentes escalas que permiten un estudio más detallado de los fenómenos y su dinámica. Orlanski (1975) propuso una clasificación de escalas espacio-temporales para un mejor reconocimiento de los fenómenos meteorológicos con fines de pronóstico de tiempo. De esta forma, Orlanski (1975) agrupó a los fenómenos cuya resolución espacial fuera de 100 a 5000 km y con una resolución temporal de días a semanas como escala sinóptica. La escala planetaria, superior en resolución espacio-temporal a la escala sinóptica, fue definida en el rango de 1000 a 4000 km y con una duración mayor a una semana. Se puede apreciar que existe una superposición entre estas escalas, resultando difícil la clasificación de varios fenómenos. Fujita (1985) definió la escala sinóptica con el nombre de “Mesoescala Alfa”, agru-

pando en ella a todos los fenómenos sinópticos cuya resolución espacial se encontrara entre los 200 y los 2000 km, con una duración temporal comprendida entre seis horas y dos días. De esta forma, superior a esta escala temporal, se encontraría la escala planetaria e inferior a ella la Mesoescala Beta y la Microescala, evitando la superposición de escalas en la clasificación propuesta por Orlandi (1975). Posteriormente, Asnani (1993) propuso una nueva distribución de estas escalas basándose en el orden de magnitud de la distancia que pueden abarcar los fenómenos. Asnani (1993) consideró escala planetaria a los fenómenos de un orden de magnitud de 5000 km o más; escala sinóptica los de orden de 1000 km y mesoescala a los de un orden de 100 km. Por su parte, la clasificación utilizada en este estudio es la propuesta por Lackmann (2011), quien estableció la escala sinóptica con una duración entre un día y una semana y con una resolución espacial de entre 1000 y 6000 km.

El análisis de escalas para el estudio de los movimientos atmosféricos y el comportamiento de los fenómenos meteorológicos permite conocer cuáles ecuaciones y principios físicos rigen estos movimientos, valorando cuáles términos son más dominantes que otros (Lackmann, 2011). Entre las ecuaciones que rigen los movimientos atmosféricos se encuentran las ecuaciones de momento (ver ecuación 1-1), la ecuación de estado del gas ideal (ver ecuación 1-2), la ecuación de continuidad (ver ecuación 1-3) considerando el balance hidrostático (ver 1-5) y la ecuación de conservación de la energía basada en principios termodinámicos (ver ecuación 1-4) (Holton y Hakim, 2012).

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = -\vec{U} \cdot \nabla \vec{V} - \frac{1}{\rho} \nabla_h p - f \hat{k} \times \vec{V} + \vec{F}_r \quad (1-1)$$

$$p = \rho R_d T_v \quad (1-2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial p} = E - P \quad (1-3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = - \left[u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \omega \left[\frac{R_d T_v}{C_p p} - \frac{\partial T}{\partial p} \right] + \frac{J}{C_p} \quad (1-4)$$

Para el estudio de los fenómenos sinópticos, aplicando el análisis de escala propuesto por Lackmann (2011), se pueden considerar algunos modelos como el balance hidrostático, donde dominan los términos de la fuerza del gradiente de presión y la aceleración gravitacional (ver ecuación 1-5). Por otro lado existe el balance geostrófico (para el caso de latitudes medias), donde dominan la fuerza del gradiente de presión y el término de Coriolis (ver ecuación 1-6). La aproximación

cuasi-geostrófica permite estudiar los movimientos verticales de las masas de aire en los diferentes niveles de presión y su relación con los fenómenos en superficie (Holton y Hakim, 2012).

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g \quad (1-5)$$

$$\vec{V}_g = \hat{k} \times \frac{1}{\rho f} \nabla p \quad (1-6)$$

1.1.2. Principales metodologías para la elaboración de climatologías sinópticas

Con el avance de la era digital se han diseñado metodologías para desarrollar clasificaciones de forma objetiva que sean de utilidad en la Climatología Sinóptica. Las primeras clasificaciones, basadas en un trabajo manual y subjetivo como la clasificación sinóptica de Lamb (Lamb, 1972), fueron evolucionando mediante métodos numéricos más avanzados como las clasificaciones basadas en correlaciones (Kirchhofer, 1974), el Análisis de Componentes Principales y estudio de Funciones Empíricas Ortogonales (Kalkstein y Corrigan, 1986; Huth, 2000), así como el método de Jenkinson y Collison (1977) utilizado en Europa, principalmente en la Península Ibérica (Trigo et al., 2000). Actualmente, las técnicas para la obtención de clústeres o “conglomerados” que identifican los patrones sinópticos más frecuentes son las más reconocidas como son “Self-Organizing Maps” (Kohonen, 2001), “fuzzy clusters” (Bárdossy et al., 2002) y el método k-means (Sinclair et al., 2010; Markle et al., 2012; Coggins et al., 2014).

Los métodos de clasificación de patrones sinópticos se pueden dividir, a modo general, en dos tipos: subjetivos y automatizados (Philippopoulos y Deligiorgi, 2012). Los métodos subjetivos, fundamentalmente basados en técnicas manuales de comparación y clasificación, dependen mucho de la experiencia del observador y de un análisis exhaustivo de mapas sinópticos de tiempo tanto en superficie como en diferentes niveles de altura. En presencia de un volumen pequeño de datos, estos métodos pueden ser factibles y brindar buenos resultados, pero con bases de datos más extensas y en presencia de muchos mapas sinópticos se hace muy difícil el procesamiento y la obtención de una clasificación adecuada.

Entre las primeras clasificaciones sinópticas manuales se encuentran la realizada por Lamb (1972) en las Islas Británicas (Jones et al., 1993) y la de (Maunder, 1968) para el Pacífico Norte Occidental (Stahl et al., 2006). En el presente siglo se continúan utilizando técnicas manuales para muchos fines como en estudios de calidad del aire (Fiddes et al., 2016), la influencia de situaciones sinópticas como las bajas extratropicales en el occidente de Cuba (Fariñas y Pedroso, 2011), en eventos de precipitación extrema en el período lluvioso en Venezuela (Gutiérrez Quevedo et al., 2008), así como un catálogo de patrones sinópticos que afectan el archipiélago cubano (Fernández

y Díaz, 2005). Sin embargo, estas técnicas fueron más comunes en las últimas décadas del siglo XX debido a la poca disponibilidad de datos meteorológicos y menores avances tecnológicos.

Posteriormente, métodos objetivos con una componente matemática y estadística más profunda fueron desarrollados. Las técnicas de Kirchhofer y de Lund, conocidas como “Análisis basado en correlaciones” fueron más populares en las décadas de los 80 y 90. Esta técnica consiste en dividir en cuadrículas, tanto como sea posible, la base de datos. Basándose en parámetros estadísticos y suma de mínimos cuadrados, calcula un coeficiente de correlación para cada par de cuadrículas, de forma que escoge los pares con mayores correlaciones (Frakes y Yarnal, 1997). Varias clasificaciones sinópticas fueron realizadas con este método (Yarnal, 1984; Mckendry, 1994; Moore y McKendry, 1996). Este método tiene como desventajas que no permite al observador sinóptico escoger un número posible de patrones, lo realiza automáticamente sin supervisión y, por lo tanto, muchas soluciones carecen de sentido físico. Por otra parte, pueden tenerse muchas correlaciones altas y los datos en sí puede que no presenten patrones dinámicamente similares debido a que una alta correlación no siempre implica causalidad física (Blair, 1998). La corrección de este método se realizó utilizando técnicas manuales junto con el análisis de las correlaciones (Frakes y Yarnal, 1997).

Los métodos de Análisis de Componentes Principales y las Funciones Empíricas Ortogonales fueron muy utilizados en los años 90 y principios del presente siglo. El análisis de la varianza y covarianza en una matriz de correlación de los datos permite reconocer agrupaciones de datos con parámetros similares de acuerdo al porcentaje de la varianza explicada por cada uno de ellos. Estos métodos se convirtieron en los más populares de la época por la aproximación de los resultados a las configuraciones de los mapas sinópticos de los días relacionados, por lo que fueron desarrolladas muchas clasificaciones mediante dichos métodos (Kalkstein y Corrigan, 1986; Huth, 2000; Yarnal, 1993; Skinner et al., 2002; Cannon et al., 2002; Harrison, 2015; Wang y Rui, 1990; Leighton y Spark, 1997; Barry y Perry, 1973; Tanner y Law, 2002; Chen et al., 2008). Actualmente estos métodos se siguen utilizando, pero generalmente dentro de algunos de los algoritmos que utilizan técnicas de clústeres, procurando detectar un sentido físico en ellos (Dahni y Ebert, 1998; Stahl et al., 2006; Jones et al., 2000; Gibson y Cullen, 2015).

Otros métodos menos generalizados han sido implementados a lo largo de los años y han mostrado diferentes clasificaciones sinópticas en varias regiones del planeta. Uno de dichos métodos es el diseñado por Jenkinson y Collison (1977) utilizado principalmente en Europa. La clasificación de Jenkinson y Collison (1977) se basa en el establecimiento de ocho variables deducidas exclusivamente a partir de la presión atmosférica en superficie como son: presión media en superficie, componentes zonales y meridionales del viento geostrofico, componentes zonales de la vorticidad, por citar algunas. De esta forma se establece una rejilla con una cantidad de puntos que permitan calcular las ocho variables y el sistema de ecuaciones sea compatible (Azorín Molina et al., 2014; Llop y Alomar, 2012). Otros métodos como “clústeres difusos” están basados en la agrupación de

las anomalías de datos de presión seguido de un Análisis de Componentes Principales (Bárdossy et al., 2002) y el método estocástico no homogéneo aplicado a estudios de precipitación (Vrac et al., 2007).

Entre las técnicas más modernas para la confección de clasificaciones sinópticas se encuentran las llamadas “técnicas de clústeres”, que reconocen patrones similares en configuraciones de mapas y en bases de datos. Los dos métodos más conocidos, basados en estas técnicas, son el método “k-means” y el método “Self-Organizing Maps”(SOM, por sus siglas en inglés). El método “k-means” posee un enfoque de clasificación no jerárquica, que permite la reasignación de diferentes objetos, en este caso patrones sinópticos, a través de un análisis continuo. Se basa en dos pasos fundamentales, el primero es un análisis de componentes principales para encontrar un número de patrones que presente una mayor varianza explicada entre la serie de datos y el segundo es la obtención de clústeres a partir de calcular un número de centroides (llamado k). Dentro del segundo paso se calcula la distancia euclidiana entre el centro de cada centroide y cada clústeres, hasta llegar a las configuraciones finales donde los clústeres de mayor frecuencia se obtienen por la menor distancia euclidiana con el centroide. Actualmente muchos investigadores utilizan este método en la elaboración de climatologías sinópticas (Skinner et al., 2002; Coggins et al., 2014; Dahni y Ebert, 1998; Dahni, 2003; Dahni y Ebert, 1998; Stahl et al., 2006; Jones et al., 2000; Seim et al., 2017; Theobald et al., 2015, 2016; Gibson y Cullen, 2015).

Por su parte, SOM es un método basado en el modelo de redes neuronales no supervisado de Kohonen (2001) y permite la clasificación de los datos de entrada en grandes dimensiones. De esta forma, transforma toda la base de datos en relaciones geométricas en un mapa de dos dimensiones. Posteriormente, realiza un análisis vectorial y calcula la distancia euclidiana entre cada elemento y los centroides, eligiendo así las Unidades Más Coincidentes (BMU, por sus siglas en inglés). El método ha sido utilizado en varias investigaciones en diferentes regiones del planeta y en relación con diferentes variables meteorológicas como la temperatura potencial y temperatura potencial equivalente (Nowotarski y Jensen, 2013), presión reducida al nivel del mar (SLP, por sus siglas en inglés) (E. N. Cassano et al., 2015; Alexander et al., 2010; Hewitson y Crane, 2002; Sang et al., 2008; Gibson et al., 2016; Nicholls et al., 2010), temperatura a dos metros de altura (E. N. Cassano et al., 2015), anomalías de SLP (Nigro et al., 2011), dirección y velocidad del viento (Michaelides et al., 2010), campos de humedad (Michaelides et al., 2010; Sang et al., 2008), precipitación (Gueye et al., 2011), altura geopotencial en diferentes niveles de presión (Philippopoulos y Deligiorgi, 2012; Jiang et al., 2012).

La ventaja que presenta el método SOM respecto al método “k-means” y los otros métodos anteriormente mencionados es que presenta una aproximación más cercana a las situaciones sinópticas detectadas debido a que escoge las distancias más cercanas entre los principales vectores de entrada de las variables a analizar, es decir, los que presentan un mayor peso en los datos (Philippopoulos y Deligiorgi, 2012). Además, permite un orden topológico de los patrones, de forma que pueden

ser diferenciados con más facilidad entre ellos, así como posee una densidad coincidente mejor, debido a la selección de las BMUs. Por otra parte, permite relacionar los mapas adyacentes mediante una “función de vecindad” que implementa el método y permite reconocer las diferencias entre ellos por más sutiles que sean (Jiang et al., 2012).

1.1.3. Principales climatologías sinópticas desarrolladas en el mundo

En latitudes altas se han realizado diferentes clasificaciones de patrones sinópticos que influyen en las temperaturas extremas, principalmente en Alaska y las regiones árticas de Canadá (E. N. Cassano et al., 2015), así como los cambios observados en estos patrones entre el siglo XX y principios del siglo XXI (J. J. Cassano et al., 2006). En la Antártida, la climatología sinóptica anual mostró que las circulaciones ciclónicas en el campo de viento son los fenómenos más influyentes en los gradientes de temperatura en cada una de estaciones del año (Coggins et al., 2014). Por su parte, una climatología sinóptica de bajas polares en el Golfo de Alaska y el Estrecho de Bering permitió conocer las condiciones necesarias para la llegada de masas de aire frías procedentes de la región polar a latitudes medias (Businger, 1987). La tendencia a un aumento de la vorticidad ciclónica y una fuerte componente zonal del viento fueron encontrados mediante 35 patrones sinópticos en la región antártica, así como la coherencia entre las anomalías de temperatura y precipitación (Lynch et al., 2006). Los valores de anomalías de SLP de las salidas del modelo Antarctic Mesoscale Prediction System (AMPS) se utilizaron para obtener 20 patrones sinópticos en la región antártica, mostrando la validez del modelo y del método SOM (Nigro et al., 2011).

La clasificación sinóptica desarrollada por Sheridan (2002) permitió reconocer siete patrones sinópticos relacionados con la procedencia de masas de aire que afectan la región oriental de América del Norte. Posteriormente, se observó que estos patrones no presentaban la misma frecuencia en verano con el paso de los años, de modo que aumentó en un 30 % la presencia de días húmedos y disminuyó en un 50 % la presencia de días con aire polar seco (Senkbeil et al., 2017). Por otra parte, en la región este de los EE.UU. se encontraron 35 patrones sinópticos de SLP mediante el método SOM; la correlación de la frecuencia de estos patrones con valores de precipitación mostró que esta última ha mostrado una notable disminución en los últimos 40 años del siglo XX (Hewitson y Crane, 2002).

Trece tipos de situaciones sinópticas fueron identificadas en las anomalías de SLP en la costa occidental de Canadá, los cuales fueron relacionados con las fases positivas y negativas de índices de teleconexión atmosféricos como El Niño/Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés) y la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO, por sus siglas en inglés) (Stahl et al., 2006). Por otro lado, se desarrolló otra clasificación sinóptica para dicha región, en la costa de Columbia Británica, Canadá, analizando los valores de SLP en relación con la altura geopotencial a 500 hPa y su influencia en las componentes principales del viento, por separado, para cada estación del año (Bakri et al.,

2017). Además, en la región occidental de los EE.UU se encontraron 13 situaciones sinópticas que describen el comportamiento del tiempo en los diferentes meses del año. Se observó coherencia entre estas situaciones sinópticas y el inicio del monzón de Norteamérica e inicio de la estación seca, el comportamiento de los chorros subtropical y polar, así como eventos de flujo meridional y zonal (Davis y Walker, 1992).

Las configuraciones de mapas sinópticos de tiempo, empleando cinco variables de estudio, se utilizaron para identificar los principales patrones climatológicos sinópticos en la costa occidental de Canadá (Cannon et al., 2002). En esta misma región se estudió la ocurrencia de nevadas en primavera y su relación con el invierno precedente, así como su variabilidad interanual e interdecadal mediante el reconocimiento de cuatro patrones sinópticos. Dichos patrones fueron determinados mediante datos observacionales de SLP y altura geopotencial en el nivel de 500 hPa (Moore y McKendry, 1996). El reconocimiento de 20 patrones sinópticos, utilizando la técnica de Kirchofer, permitió describir los campos de SLP y altura geopotencial en 500 hPa sobre la provincia de Alberta, Canadá. Estos resultados fueron comparados con las salidas del modelo CCC GCM (Canadian Climate Centre's General Circulation Model) mostrando que la eficiencia de precipitación simulada durante estos patrones sinópticos es confiable (Saunders y Byrne, 1996).

Los tipos de patrones sinópticos encontrados por McCabe et al. (1989) se emplearon para estudiar el comportamiento de la precipitación en la cuenca del Río Delaware. Hay et al. (1991) utilizaron los datos de precipitación y el reconocimiento de patrones sinópticos como entradas al modelo basado en el método de Markov, mostrando la validación del mismo con valores de precipitación muy cercanos a los reales. La identificación de patrones sinópticos en secos y húmedos, de acuerdo a la precipitación y datos de temperatura, fue obtenida mediante la clasificación sinóptica automatizada a través del método "optimized fuzzy rules" (Zadeh, 1965). Estos patrones detectados por Zadeh (1965) se utilizaron para definir 12 patrones sinópticos y de circulación global para la región europea (Bárdossy et al., 2002).

Un alto grado de correlación entre los patrones sinópticos obtenidos en el nivel de 500 hPa en el medio oeste de los EE.UU mediante las salidas de los modelos de circulación general HadCM3 y CGCM2 permitió el estudio de índices de teleconexión atmosférica como Oscilación del Atlántico Norte (NAO, por sus siglas en inglés) y el patrón de teleconexión Pacífico/ Norteamérica (PNA, por sus siglas en inglés) (Schoof y Pryor, 2006). La relación entre la variabilidad interanual de los patrones sinópticos asociados al "efecto lago" y a las nevadas en la región de los Grandes Lagos de Norteamérica con la Oscilación Ártica (AO, por sus siglas en inglés), la NAO y PNA, fue obtenido mediante la clasificación sinóptica de los mismos; mostrando una tendencia a la disminución de dicho efecto y de las nevadas en los años recientes (Suriano y Leathers, 2017). Una climatología sinóptica, basada en dos tipos de clasificaciones, "patrones de precipitación" y "patrones de circulación", fue realizada en Illinois, EE.UU; permitiendo analizar el comportamiento de días con precipitación extrema y días de poca precipitación (Vrac et al., 2007).

En África, los primeros estudios de climatología sinóptica fueron realizados en Sudáfrica para el análisis de la variabilidad de las precipitaciones (Harrison, 2015). La identificación de nueve patrones sinópticos en la costa occidental africana, principalmente en Senegal, permitió reconocer el comportamiento de variables meteorológicas y de eventos como el monzón de verano de África Occidental, ondas del este, el desplazamiento de la baja térmica del Sahara (Gueye et al., 2011). Años anteriores, Moron et al. (2008) habían identificado ocho patrones sinópticos relacionados con anomalías positivas de precipitación sobre Senegal, analizando además la región occidental del Sahel y las proximidades al Océano Atlántico. La variabilidad interanual de estos patrones y su frecuencia de ocurrencia fueron asociados a eventos La Niña y/o El Niño, indistintamente.

Una climatología sinóptica de la ciclogénesis sobre el Sudeste Asiático determinó las áreas más probables de desarrollo ciclónico, analizando valores de SLP y cronología histórica de eventos ciclónicos (Chen et al., 1991). Veinte patrones sinópticos obtenidos de valores de SLP de los datos de reanálisis de ERA 40 fueron analizados de acuerdo a sus cambios en frecuencia y variabilidad interanual en Australia. La tendencia a la disminución de la precipitación en la región fue correlacionada con el incremento o decrecimiento en la frecuencia de dichos patrones en el período de estudio (Alexander et al., 2010).

Kidson (2000) identificó doce patrones sinópticos para Nueva Zelanda, los cuales se agruparon dentro de tres regímenes de acuerdo a su frecuencia y variabilidad. De esta forma se clasificaron regímenes tales como: vaguadas cruzando sobre Nueva Zelanda, altas presiones al norte con vientos zonales al sur y situaciones de bloqueo con predominio de altas presiones al sur de la región. Esta clasificación fue empleada por Gibson y Cullen (2015) para estudiar la variabilidad del recurso viento con fines de producción energética. Por otra parte, Jiang (2011) actualizó los patrones sinópticos encontrados por Kidson (2000), utilizando una nueva metodología basada en el Análisis de Componentes Principales (PCA, por sus siglas en inglés) y algoritmos de clústeres como k-means. Los resultados de la comparación entre ambas clasificaciones mostraron concordancia, solo que los centros de altas presiones mostraron mayor frecuencia en verano que en otoño y las vaguadas y los centros de baja presión mostraron en invierno y primavera (Jiang, 2011). Una metodología similar, pero esta vez comparando los resultados de los métodos k-means, SOM y diferentes fases de PCA, fue desarrollada para el Este de Australia obteniendo 12 patrones sinópticos (Jiang et al., 2012).

La variación estacional, interanual e interdecadal de la temperatura en Melbourne, Australia, fue estudiada mediante el reconocimiento de 20 patrones sinópticos sobre el continente australiano. Las notables diferencias de temperatura entre el invierno y el verano fueron observados mediante la estacionalidad encontrada en el comportamiento de los patrones (Nicholls et al., 2010). Por otra parte, Theobald et al. (2015) estudiaron el comportamiento de la precipitación sobre las Montañas Nevadas del sureste de Australia mediante el reconocimiento de 11 patrones sinópticos de SLP

para los días lluviosos mayores a 10 mm, mostrando que estos días son menos frecuentes pero más intensos (Theobald et al., 2016). Además, en el continente australiano detectaron patrones sinópticos mediante el método SOM utilizando como entrada las salidas de modelos CIMP5. La frecuencia y variabilidad de los 30 patrones identificados fue simulada de manera más eficiente con los modelos CNRM-CM5, ACCESS1-0 y MIROC5 (Gibson et al., 2016).

La clasificación sinóptica objetiva de Jenkinson y Collison (1977) fue de los primeros estudios en Europa utilizados para estudiar condiciones de tiempo sinóptico, la cual se reconoce como la versión objetiva y automatizada de la clasificación de Lamb (1972). Este método identifica 27 tipos sinópticos agrupados en cuatro categorías: direccionales, anticiclónicos, ciclónicos e híbridos. La implementación de este método y su clasificación fue adecuada para la Península Ibérica (Azorín Molina et al., 2014) y también ha sido utilizada para estudios de la nubosidad, reconociendo seis regiones de interés de este elemento meteorológico (Azorín Molina et al., 2014). Por otra parte, la precipitación intensa sobre el litoral de la región española de Catalunya y las Islas Baleares fue relacionada con los patrones sinópticos obtenidos por Jenkinson y Collison (1977), mostrando que aquellos relacionados con la presencia de anticiclones sobre el Mediterráneo Occidental con vientos provenientes del este (Llop y Alomar, 2012). Otero et al. (2018) desarrollaron una clasificación basada en este método automatizado para validar salidas de modelos CMIP5 en el escenario climático RCP8.5. Los patrones sinópticos mostraron coherencia con las salidas de los modelos, pero en muchos casos la precipitación y la temperatura fueron sobrestimadas y/o subestimadas en diferentes regiones de Europa. Putniković y Tošić (2017) utilizaron también el método de Jenkinson y Collison (1977) para estudiar los patrones asociados con la precipitación estacional sobre Serbia.

Huth (2000) utilizó datos observacionales de altura geopotencial en 500 hPa y salidas del modelo ECHAM3 para obtener patrones sinópticos y validarlos con la modelación del escenario climático A2. Los valores de altura geopotencial en el nivel de 500 hPa también fueron analizados por Littmann (2000) mediante patrones sinópticos para estudiar el comportamiento de los principales centros de altas y bajas presiones en la cuenca del Mediterráneo, en relación con las vaguadas en este nivel y la precipitación. En esta misma región, el reconocimiento de patrones sinópticos que conllevan a condiciones de tiempo húmedas y secas, así como frías y cálidas, fue analizado por Michaelides et al. (2010) usando el método SOM como parte de las técnicas de redes neuronales artificiales. Este mismo método fue utilizado por Philippopoulos y Deligiorgi (2012) para reconocer las condiciones típicas de tiempo en las diferentes estaciones del año sobre el sudeste del Mediterráneo, principalmente sobre Grecia.

Entre los primeros trabajos de Climatología Sinóptica en América del Sur se encuentran el estudio de patrones sinópticos mensuales mediante PCA por Compagnucci (1988), analizando las precipitaciones sobre la región del Cuyo. Este estudio fue basado en los métodos de clasificación sinóptica empleados por Barry y Perry (1973). Por otra parte, Alessandro (1998) estudió las

condiciones sinópticas promedio mensuales en Argentina y sus desviaciones debido a sistemas de circulación global como las ondas largas en la altura. Coronel (2001) estudió el comportamiento de las masas de aire extremadamente cálidas y húmedas durante el verano en Argentina mediante el reconocimiento de cinco patrones sinópticos obtenidos por PCA. Entre las principales situaciones sinópticas fueron determinadas la influencia de los anticiclones del Pacífico Sur y del Atlántico Sur que advectan aire cálido y húmedo, la máxima advección de aire cálido previa a la llegada a un sistema frontal situado sobre al norte de la Patagonia y el típico avance del anticiclón postfrontal sobre territorio argentino. Una climatología sinóptica de frentes cálidos sobre la región suroriental del continente sudamericano fue realizada por Ribeiro et al. (2016) mediante el estudio de los campos medios y anomalías de altura geopotencial y vientos en 850 hPa con la precipitación.

Diez patrones sinópticos mediante técnicas combinadas de climatología sinóptica en la Península Ibérica permitió conocer la posición de los principales centros de acción, ciclónicos y anticiclónicos. Se analizó, además, la persistencia y transiciones entre ellos Rasilla Álvarez (2003). La distribución de tormentas eléctricas y de superceldas, entre otros Sistemas Convectivos de Mesoescala, fueron analizados con el reconocimiento de patrones sinópticos que influyen sobre Europa Central (Wapler y James, 2015). El movimiento de las bandas de nubes en la troposfera media y alta sobre el Medio Oriente fue examinado por Tubi y Dayan (2014) mediante la obtención de clústeres de patrones sinópticos en diferentes niveles de altitud. La migración hacia el norte del chorro norteafricano fue relacionado con las bandas de nubes que producen precipitación sobre la región.

Una climatología sinóptica del período lluvioso en Venezuela fue realizada entre los períodos 1956-1977 y 1978-1999, permitiendo reconocer diferentes patrones en una frecuencia bimestral (Gutiérrez Quevedo et al., 2008). Por otra parte, una clasificación sinóptica manual basada en el análisis de mapas sinópticos y comportamientos estadísticos de los datos meteorológicos fue desarrollada en Cuba donde se reconocieron nueve situaciones sinópticas que modulan el comportamiento del tiempo en dicho territorio (Lapinel, 1988). También en Cuba se estudió la influencia de los patrones sinópticos de origen extratropical en el período poco lluvioso demostrando que son las bajas extratropicales las que más afectan la región occidental y dominan el comportamiento del campo de viento, temperatura y presión en este período (Fariñas y Pedroso, 2011). Cavazos (1999) detectó patrones de circulación de gran escala que influyen en el comportamiento de la precipitación día y eventos extremos de precipitación, mediante el método SOM, sobre la región nordeste de México y sudeste de Texas. Se encontró que el comportamiento de la precipitación en los meses de invierno, en dicha región, está relacionada con el comportamiento de la Baja de Aleutinas, el Anticiclón del Pacífico Norte, el Patrón Pacífico-Norteamérica y el índice El Niño-Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés) (Cavazos, 1999). Una climatología sinóptica de los regímenes del viento en bajos niveles sobre América Central permitió conocer once patrones fundamentales en la circulación atmosférica regional, los cuales concuerdan con otros estudios de fenómenos sinópticos en la región como oleadas de frío, el chorro de bajos niveles del Caribe, etc. (Sáenz y Durán-Quesada, 2015). Recientemente, Díaz-Esteban y Raga (2018) estudiaron la variabilidad de la precipitación en los meses de verano sobre el SW de México mediante el reconocimiento de

patrones sinópticos detectados con el método SOM.

1.1.4. Aplicaciones de la climatología sinóptica

Estudios de calidad del aire y contaminación atmosférica

Una aplicación de la climatología sinóptica a estudios de calidad del aire se observó en el análisis de la profundidad óptica de aerosoles en la atmósfera de las regiones árticas rusas al norte de Eurasia, mostrando que la concentración de aerosoles era diferente en presencia de altas polares y centros de bajas presiones (Shahgedanova y Lamakin, 2005). Además, la clasificación sinóptica realizada por Heywood (1953) y ampliada por Tanner (1999) fue utilizada para explicar los niveles de calidad del aire y concentración de gases contaminantes sobre Hong Kong, desde el punto de vista meteorológico. Los frentes fríos, vientos monzónicos del N-NE y ciclones tropicales influyeron en días con alta contaminación; mientras que masas de aire marítimas provenientes del sur influyeron en días con bajos niveles de contaminación (Tanner y Law, 2002).

La proyección de escenarios climáticos futuros de emisiones de CO₂ para la región oriental de los EE.UU se estudió combinando las salidas del modelo GCM20 con una clasificación sinóptica basada en la temperatura en el nivel de 850 hPa (Lee y Sheridan, 2012). La obtención de siete clústeres del flujo del viento en 900 hPa en Houston, Texas, permitió conocer la relación de estos patrones con la cantidad de días con concentraciones extremas de ozono troposférico en los meses de verano del período 2010-2014 (Souri et al., 2016). Por otra parte, una clasificación sinóptica obtenida mediante el método de Kirchhofer (1974) mostró que los días con mayor concentración de ozono sobre Columbia Británica, Canadá, ocurren cuando coinciden una vaguada térmica en niveles bajos con centros de alto geopotencial en niveles altos (Mckendry, 1994). Durante el programa COST733, se desarrolló un software de clasificación sinóptica automatizada que agrupa las principales metodologías empleadas en la región europea; la cual fue utilizada para estudiar los días con altas concentraciones de ozono (Demuzere et al., 2011) y las temperaturas máximas y mínimas diarias en las estaciones europeas (Huth et al., 2008).

Chen et al. (2008) detectaron cuatro patrones sinópticos obtenidos mediante datos de SLP y viento en superficie, los cuales fueron correlacionados con el Índice de Contaminación del Aire (API, por sus siglas en inglés) mostrando que este índice aumenta cuando centros de altas presiones son sucedidos por centros de bajas presiones y también durante el paso de un frente frío. Por otra parte, este índice disminuye con patrones sinópticos que presentan un fuerte gradiente de presión en circulaciones anticiclónicas (Chen et al., 2008). Los días con alta concentración de PM10 en Nueva Zelanda durante los meses de invierno fueron analizados mediante el comportamiento de patrones sinópticos usando datos de SLP, anomalías de temperatura y velocidad de viento. Se demostró que la presencia del anticiclón sobre el Mar de Tasmania junto con masas de aire frío provenientes del SW influyeron en la presencia de días con altas concentraciones de PM10 (Fiddes et al., 2016). Por otra parte, la relación entre patrones sinópticos observados con la frecuencia de ocurrencia

de días con eventos de contaminación atmosférica sobre la ciudad de Sydney, Australia, demostró que la presencia de anticiclones influye en el aumento de días de contingencia de moderada a alta (Leighton y Spark, 1997).

En los incendios forestales en Canadá se pudo observar una relación con las anomalías en los patrones sinópticos observados en el nivel de 500 hPa, relacionando el 18 % de los eventos a estas anomalías, principalmente de las componentes zonales y meridionales del viento (Skinner et al., 2002). Por otra parte, tres patrones sinópticos que se asocian a flujos de vientos del suroeste, altos gradientes verticales de geopotencial y bajos valores de humedad relativa, se determinaron como los más frecuentes en presencia de incendios forestales en el suroeste de EE.UU, principalmente en Nuevo México y Arizona (Crimmins, 2006).

Estudios hidroclimáticos

La clasificación sinóptica de los valores de la humedad relativa en el nivel de 500 hPa permitió conocer el comportamiento de variables hidroclimáticas en la cuenca del Río Colorado, tales como escorrentía superficial, niveles de agua en embalses y fenómenos de sequía (Kirk et al., 2017). Fueron encontrados 22 tipos de patrones sinópticos, separados por estaciones y de acuerdo a sistemas de altas y bajas presiones, regímenes de viento y sistemas frontales en el Atlántico Norte Occidental; lo que permitió estudios hidroclimáticos de la región relacionados con la humedad del suelo y la descarga de flujos en aguas subterráneas (Siegert et al., 2017).

Por otra parte, en la cuenca del río Susquehanna, en la región nororiental de EE.UU, se estudiaron los eventos de descargas de los acuíferos y su correlación con el comportamiento de patrones sinópticos identificados (Yarnal y Frakes, 1997). Un estudio de la precipitación helada y de las nevadas en el sur de las Grandes Planicies de Norteamérica fue realizado mediante una climatología sinóptica de las masas de aire de la región en superficie y en el nivel de 500 hPa (Mullens et al., 2016). La climatología sinóptica manual realizada por Yarnal (1993) permitió reconocer a las tormentas provenientes de los Grandes Lagos como la principal causa de las inundaciones en Nueva Inglaterra, EE.UU.; reconociendo también otras situaciones sinópticas como ciclones tropicales y sistemas de bajas de presiones (Collins et al., 2014).

Estudios biometeorológicos y paleoclimáticos

Las características actuales de los eventos de calor extremo y escenarios climáticos futuros de la temperatura en verano, en relación con los problemas de salud asociados en todo el sureste de los Estados Unidos se realizó mediante la clasificación sinóptica de Sheridan (2002), fundamentalmente con los días de calor extremo (Diem et al., 2017). Por otra parte, la mortalidad en invierno sobre la región de Inglaterra fue estudiada en relación con los patrones sinópticos determinados mediante el software COST733, mostrando que las condiciones más desfavorables para la salud

pública se presentan durante la advección de masas de aire fríos provenientes de Europa continental (Paschalidou y Kassomenos, 2016).

La relación entre patrones sinópticos reconstruidos mediante el reanálisis NOAA-CIRES para el período 1871- 2010 con el ancho de anillos de los árboles en las latitudes medias de Asia permitió determinar el Índice de Circulación Atmosférica mediante Anillos de Árboles (ACTI, por sus siglas en inglés) para los meses de verano. De los 13 patrones sinópticos encontrados, los ciclones sobre el norte de Rusia se correlacionan con el crecimiento y la resequedad de los anillos de los árboles, mientras que los ciclones sobre el noroeste de Rusia y los anticiclones sobre Mongolia provocan sensaciones térmicas positivas en los árboles (Seim et al., 2017).

Las olas de calor en el sur de Australia fueron estudiadas mediante una climatología sinóptica de variables meteorológicas en superficie y en niveles de altura; mostrando que la ocurrencia de las mismas depende, en gran medida, de la posición de los centros anticiclónicos y ciclónicos (Pezza et al., 2012). La presencia de días con efecto de isla de calor sobre Melbourne, Australia, se asoció con patrones sinópticos de anomalías de SLP. Se observó que la posición de los centros anticiclónicos fue determinante en la génesis y desarrollo de este efecto, así como los patrones asociados con anomalías negativas de SLP propiciaron el 40 % de estos días con el efecto (Morris y Simmonds, 2000).

Otras aplicaciones

Eventos sinópticos basados en análisis de mapas de anomalías de convección tropical en la región del Sudeste Asiático, Océano Índico, Australia y Oceanía fueron clasificados en tres patrones de acuerdo a la región de procedencia de las ondas convectivas. Esta climatología permitió reconocer características intra e interanuales de fenómenos tales como la circulación monzónica, la posición de la Zona de Convergencia Intertropical (ITCZ, por sus siglas en inglés) y movimientos convectivos (Wang y Rui, 1990).

La climatología sinóptica de los eventos extremos costeros en el Atlántico Nororiental fue utilizada para identificar patrones sinópticos, principalmente de circulación ciclónica, responsables de las tormentas severas, surgencias, anomalías de temperatura superficial del mar (SST, por sus siglas en inglés) y afectando el comportamiento del índice de la NAO (Betts et al., 2004). Por otra parte, la clasificación sinóptica objetiva realizada por James (2007) fue utilizada para estudiar eventos extremos como los deslizamientos de tierra inducidos por condiciones de tiempo severo en el sur de Noruega, mostrando que la presencia de anticiclones en el suroeste del país son los más influyentes en estos deslizamientos (Devoli et al., 2017). Además, siete patrones de circulación, en su mayoría asociados con vientos provenientes del Atlántico Norte, fueron determinados durante el estudio de las fuertes nevadas sobre Andorra (Esteban et al., 2005).

Los niveles de producción de uvas en sus diferentes etapas fue asociado con patrones sinópticos sobre Francia. Se asoció que los patrones que producen incursiones de masas de aire frías y húmedas sobre la región disminuyen la calidad de la vendimia y afectan la fisiología de la planta. Por otra parte, los patrones que conllevan a un aumento de las temperaturas benefician la producción (Jones et al., 2000).

1.1.5. Fenómenos sinópticos en México

Las primeras climatologías sinópticas desarrolladas en México tienen lugar en las primeras décadas del siglo XX, cuando López (1926) propuso nueve tipos de patrones de tiempo de acuerdo al comportamiento de la presión atmosférica en superficie. Por su parte, años después se elaboró una clasificación sinóptica de cuatro patrones basada en la posición de centros de altas y bajas presiones sobre México y el suroeste de los EE.UU. También Domínguez (1941) reconoce ocho patrones sinópticos en correspondencia con el período del año, de los cuales cinco corresponden al período seco y tres al período lluvioso (Jáuregui, 1971).

Años después, Mosiño (1958) elaboró una clasificación sinóptica basada en la relación entre niveles de altitud con las condiciones del tiempo en superficie, donde reconoció quince tipos de patrones para los niveles de altura y diez para superficie; estos últimos basados en circulaciones ciclónicas y anticiclónicas. Esta clasificación fue utilizada para estudiar la variabilidad y frecuencia de ocurrencia de estos diez patrones sinópticos en un período de veinte años. Se encontró que la presencia de una vaguada ubicada al Este de la Sierra Madre Oriental fue el patrón sinóptico más frecuente y con menor variabilidad en el período de estudio, seguido por la presencia de un centro de altas presiones al norte del Golfo de México separada del Anticiclón Subtropical del Atlántico por una vaguada extendida en dirección norte-sur (Jáuregui, 1971).

Cavazos (1999) estudió la influencia de patrones de circulación de gran escala e índices de teleconexión, como el Patrón Pacífico-Norteamérica y el ENSO, en el comportamiento de la precipitación diaria y eventos extremos en el comportamiento de dicha variable sobre el nordeste de México y sudeste de Texas. Otras investigaciones han caracterizado el comportamiento de las principales variables meteorológicas con los fenómenos sinópticos en varias regiones de México. La separación de estaciones por regímenes de viento en la Ciudad de México mostró que las condiciones anticiclónicas y los flujos de viento del oeste son los más dominantes (De Foy et al., 2005). Una caracterización climática de nueve regiones de México relaciona algunos patrones sinópticos de cada región con los regímenes de temperatura, precipitación y viento (Zepeda, 2005).

El comportamiento de la precipitación junto con las condiciones sinópticas en superficie y en el nivel de 500 hPa fue estudiado por Comrie y Glenn (1998) en la región SW de Estados Unidos y NE de México. Mediante el método de Componentes Principales Rotacionales se determinaron nueve sub-regiones dentro de la región de estudio, de acuerdo a los resultados del método y distribución

espacial. Por otra parte, Englehart y Douglas (2002) estudiaron el comportamiento de la precipitación en México, utilizando el método de Componentes Principales, con el las fases de algunas teleconexiones atmosféricas como la PDO, ENSO y el Índice de Precipitación Ecuatorial (ERI, por sus siglas en inglés). La lluvia mostró una coherencia espacial dentro de su distribución mensual en el período de estudio, así como un comportamiento más fuerte de los índices de teleconexión estudiados cuando se presenta la fase positiva de la PDO.

1.2. Aspectos metodológicos de la investigación

1.2.1. Problema científico

Esta investigación tiene como **objeto de estudio** la clasificación climatológica de patrones sinópticos y se inserta en el **campo de conocimiento** de la Climatología Sinóptica. Debido a lo anteriormente expuesto, se plantea como **problema científico** de esta investigación:

“La necesidad de un estudio climatológico sinóptico de los patrones que influyen en el comportamiento del tiempo en el centro de México”.

Como parte del mismo, se plantean las siguientes **preguntas de investigación**:

- ✓ ¿Cuáles son los patrones sinópticos que más influyen en las condiciones del tiempo en el centro de México?
- ✓ ¿Cuál es la persistencia de los patrones sinópticos detectados y las transiciones más frecuentes entre ellos?
- ✓ ¿Cuál es la frecuencia de ocurrencia de estos patrones sinópticos en escalas temporales menores como períodos, trimestres y meses?

1.2.2. Objetivos

Con el fin de dar respuesta al problema científico y a las preguntas de investigación anteriormente planteadas se propone como **Objetivo General** en este estudio: “Desarrollar una climatología sinóptica de los patrones que influyen en el comportamiento del tiempo en el centro de México”. De esta forma, se plantean como **objetivos específicos**:

- ✓ Reconocer los principales patrones sinópticos que influyen en el comportamiento del tiempo en las diferentes regiones geográficas de la República Mexicana, principalmente en el centro de México.
- ✓ Clasificar dichos patrones en “Patrones Sinópticos” de acuerdo a su frecuencia de ocurrencia y variabilidad en diferentes escalas espacio-temporales.

- ✓ Analizar el comportamiento de la persistencia de los patrones sinópticos en el período de estudio y sus posibles transiciones entre ellos.

1.2.3. Hipótesis

La justificación de esta investigación consiste en la clasificación climatológica de los patrones sinópticos que influyen en el comportamiento del tiempo en el centro de México en un período de 37 años, así como el análisis de su frecuencia de ocurrencia y su variabilidad en diferentes escalas de tiempo. Por lo tanto, se plantea como **Hipótesis**:

“Los patrones sinópticos que afectan la región central de la República Mexicana pueden ser clasificados climatológicamente de acuerdo a la condiciones de tiempo meteorológico.”

1.3. Estructura del documento

El presente documento está estructurado por tres capítulos que abarcan todo el desarrollo de la investigación. El primer capítulo, como está siendo mostrado, sintetiza la revisión bibliográfica realizada para conocer los antecedentes de estudio y el marco teórico necesario para resolver el problema científico planteado. En este capítulo, además, se definen los aspectos metodológicos para arribar a conclusiones mediante métodos científicos e investigativos. El segundo capítulo expone los principales materiales y métodos empleados para el desarrollo de la investigación, partiendo de definir y caracterizar la región de estudio. El tercer capítulo se enfoca en el análisis y discusión de los resultados obtenidos, dando respuesta al problema científico y comparando dichos resultados con los encontrados por otros autores. Este trabajo finaliza presentando las conclusiones de la investigación, recomendaciones para trabajos futuros referentes a metodologías y aplicaciones de los resultados, así como las principales referencias bibliográficas que han sido mencionadas en el documento.

2 Materiales y métodos

2.1. Región de estudio

La región geográfica definida para estudiar el comportamiento de los patrones sinópticos que influyen en la República Mexicana se encuentra entre los 0-70°N y los 10-150°W (ver Fig.7.20(b)). Este dominio abarca el Mar Caribe, América Central, el Océano Atlántico Norte y el Océano Pacífico Nororiental. La selección de este dominio permitió analizar los fenómenos sinópticos y los principales centros de acción de la circulación general de la atmósfera en la escala planetaria, como son: la posición de los centros anticiclónicos del Anticiclón Subtropical del Atlántico Norte y del Anticiclón del Pacífico Norte; el movimiento y desarrollo de ondas tropicales; los sistemas frontales y los centros de bajas presiones extratropicales. Además, se analizó la influencia de estas condiciones sinópticas propiamente en el centro de México, por lo que se utilizó un dominio anidado comprendido entre los 17.5-22.5°N y los 95-106°W (ver Fig.7.20(e)).

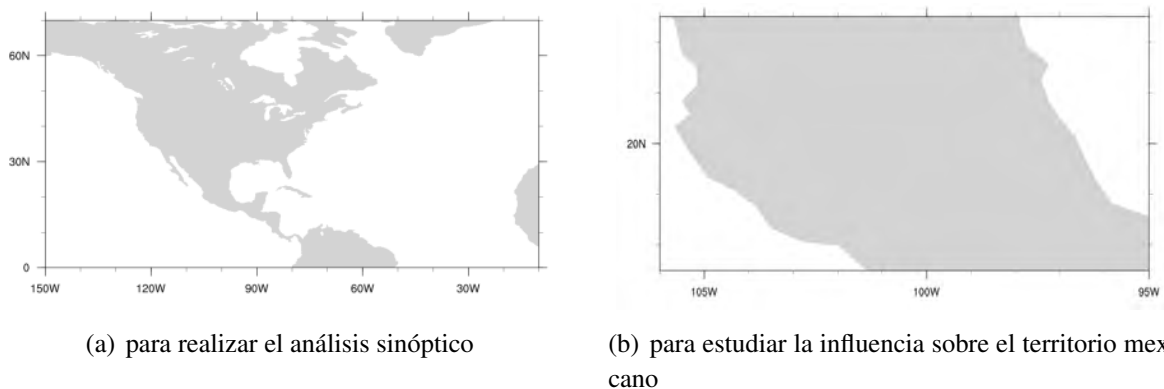


Figura 2-1: Región de estudio para realizar el análisis sinóptico y su influencia en el territorio mexicano

La región central de México, o región Centro, fue definida por Zepeda (2005) como la parte sur de la Altiplanicie Mexicana, donde se encuentra la meseta central o de Anáhuac. Resulta difícil definir los estados de la República Mexicana presentes en esta región debido a que no responde a límites político-administrativos, pero está integrado por parte de los estados: Ciudad de México, Jalisco, Zacatecas, Hidalgo, Aguascalientes, Guanajuato, Estado de México, Michoacán, Puebla y Tlaxcala. La altitud de la región varía desde los 900 m hasta los 5452 m con el volcán Popocatepetl. La oscilación térmica diaria, en superficie, de la región varía dentro un amplio rango, desde menos de 5°C en la región de las sierras, hasta 14°C en la parte noroccidental de la región. Durante el período húmedo, correspondiente a los meses de mayo a octubre, ocurre aproximadamente el 90 % de la precipitación en la región, con lluvias que pueden registrar los 200 mm en un episodio. En los meses de período seco, presentes de noviembre a abril, la precipitación corresponde al 10 % anual, la cual es producida principalmente por la circulación de los vientos del oeste que trae consigo perturbaciones de escala sinóptica y patrones migratorios provenientes de latitudes medias, además de los sistemas frontales.

2.2. Datos de reanálisis de ERA Interim

Como materiales para la realización de la investigación se utilizaron los datos de reanálisis de ERA Interim (Dee et al., 2011) obtenidos del Centro Europeo de Pronóstico del Tiempo a Mediano Plazo (ECMWF, por sus siglas en inglés). Estos datos de reanálisis de ERA Interim han sido validados para la región tropical por su alta resolución espacial, horizontal y vertical, respecto a otros reanálisis (Simmons, 2006; Simmons et al., 2007; Uppala et al., 2008; Serra et al., 2010). Las variables seleccionadas fueron SLP y temperatura en superficie, a dos metros de altura, para el nivel de superficie. Para la obtención de patrones sinópticos a diferentes niveles de presión se seleccionaron los niveles de 850, 700 y 500 hPa como los niveles estándares para el análisis de las condiciones del tiempo en la troposfera baja (Organization, 1977). Los niveles de presión de 300 y 200 hPa fueron considerados para el análisis sinóptico de los patrones, pero los clústeres obtenidos mediante el método SOM mostraron poca variabilidad entre ellos, razón por la cual no serán discutidos en el presente trabajo. En los niveles de altitud fueron analizadas las variables: altura geopotencial, temperatura, humedad específica, componente zonal del viento y componente meridional del viento. Se determinaron los campos de la media y la desviación estándar anuales de cada una de las variables. De esta forma fueron calculadas las anomalías estandarizadas de las variables, las que fueron utilizadas para la obtención de los patrones sinópticos. También se determinaron las anomalías estandarizadas de las variables respecto a los campos mensuales, trimestrales y por períodos seco y húmedo; sin embargo, se consideraron solamente las obtenidas con los campos anuales ya que solo el algoritmo del método SOM fue capaz de reconocer el comportamiento estacional entre dichos patrones, como será mostrado en el transcurso del presente trabajo.

Se utilizaron datos correspondientes al período 1980-2016, donde fue seleccionado el horario de observaciones sinópticas (OMM, 2011) de las 1800Z para cada uno de los días presentes en el período. Este horario corresponde a las 1200 y 1300 locales en la región central de México, dependiendo si se usa o no el horario de verano. Los datos de entrada al algoritmo del método SOM fueron los correspondientes al horario de las 1800Z, pero durante el análisis sinóptico de los patrones detectados se utilizaron todos los mapas de tiempo de los horarios de observaciones sinópticas de las fuentes que se mencionarán en la sección 2.3. Al algoritmo del método SOM se le asignó un solo horario para caracterizar el día debido a que los fenómenos sinópticos presentan una duración de un día hasta una semana en la escala temporal (Lackmann, 2011). No existe un criterio establecido en la literatura para la selección del horario a emplear, por lo que la elección en la metodología de Lapinel (1988). La cantidad de días que constituyen este período y que fue presentado al algoritmo para la detección de patrones sinópticos, fue 13505 días. De esta forma, se obtuvo una matriz de 13505 x 20301 valores (número de días x número de puntos de malla) para cada una de las variables y sus anomalías estandarizadas. De esta manera, se puede utilizar un enfoque climatológico en la investigación al abarcar 37 años de estudio.

Los datos de ERA Interim se encuentran disponibles para la comunidad científica desde el año

2009, aunque desde 2011 abarca el período más extenso de 1979-actualidad. La resolución espacial de estos datos es de aproximadamente 79 km, que serían 0.703125° en coordenadas geográficas. Los datos se presentan en 61 niveles verticales, que abarca desde el nivel 1 con valores de presión atmosférica de 0.1 hPa en los 64.56 km de altura hasta el nivel 61 que es la superficie terrestre. La información meteorológica se encuentra disponible en los horarios sinópticos, es decir, 0000, 0600, 1200 y 1800 UTC; además de 28 intervalos trihorarios para el pronóstico del tiempo. Estos datos se encuentran en formato NetCDF (Network Common Data Form), aunque para su lectura o procesamiento fueron generados en formato GRIB (Gridded Binary file).

Además de los 61 niveles verticales que posee el reanálisis, se pueden obtener 37 niveles de altura significativos de acuerdo a la altura sobre el nivel medio de mar y los valores de altura geopotencial. De esta forma, el nivel de 500 hPa corresponde al nivel 39 de los 61 verticales a una altura de 4.94 km; el nivel de 700 hPa corresponde al nivel 44 de los 61 niveles verticales a una altura de 2.67 km; el nivel de 850 hPa corresponde al nivel 49 de los 61 niveles verticales a una altura de 1.17 km. El nivel de superficie se considera con el valor de presión atmosférica de 1013.25 hPa y corresponde al nivel 61 de los 61 verticales.

2.3. Mapas sinópticos y de altitud utilizados para el análisis sinóptico

Además de la obtención de las variables meteorológicas, los datos de reanálisis de ERA Interim fueron utilizados para la elaboración de mapas sinópticos en superficie con los valores de SLP, y en altura con los valores de altura geopotencial (Fig.2-2). Estos mapas fueron realizados para cada uno de los 13505 días correspondientes al período de estudio y se emplearon para realizar el análisis de los patrones sinópticos obtenidos. Se utilizó el lenguaje de programación NCAR Command Language (NCL) (<http://ncl.ucar.edu/citation.shtml>), facilitado por el National Center of Atmospheric Research (NCAR, por sus siglas en inglés), para el trazado de los datos meteorológicos y la identificación de situaciones sinópticas. Una descripción de este lenguaje fue ofrecida por Brown et al. (2012). De esta forma, se obtuvieron los mapas sinópticos para la región de estudio desde el 1 de enero de 1980 a las 0000 UTC hasta el 31 de diciembre del 2016 a las 1800 UTC.

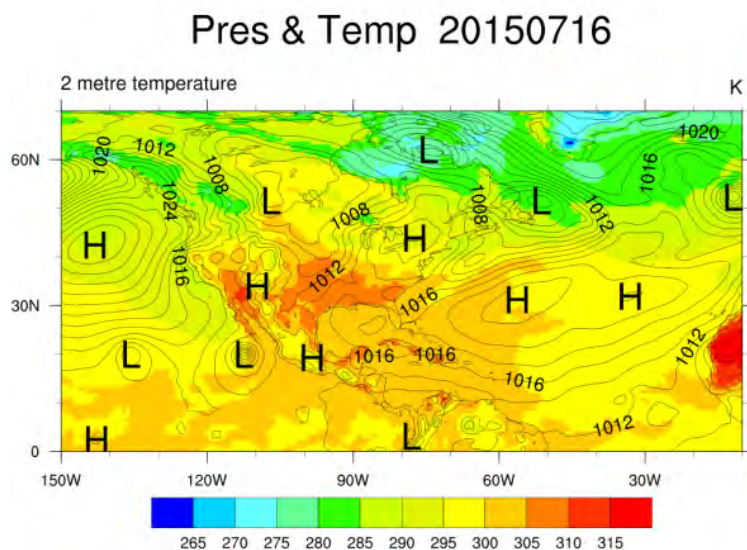


Figura 2-2: Ejemplo de mapa sinóptico obtenido mediante los datos de reanálisis de ERA Interim, correspondiente al día 16 de julio del 2015 a las 1800Z. Los contornos representan isobaras (espaciadas cada 2 hPa) y los colores representan los valores de temperatura a dos metros de altura (expresada en Kelvin). Los centros de altas presiones se representan con la letra H y los centros de bajas presiones con la letra L.

Los mapas sinópticos en superficie generados por el Weather Prediction Center (WPC) del National Center for Environmental Prediction (NCEP) del gobierno de los EE.UU también fueron utilizados para realizar el análisis sinóptico (Fig.2-3). Estos mapas pueden ser obtenidos mediante el siguiente enlace: http://www.wpc.ncep.noaa.gov/archives/web_pages/. Dichos mapas sinópticos se encuentran disponibles desde el 29 de marzo del 2006 hasta la actualidad, donde es actualizado en cada uno de los horarios sinópticos. Para el caso de la región de estudio de este trabajo fue factible utilizar también la modalidad "zoom-in" dentro de estos archivos de mapas sinópticos, la cual se encuentra disponible desde el 1 de mayo del 2005.

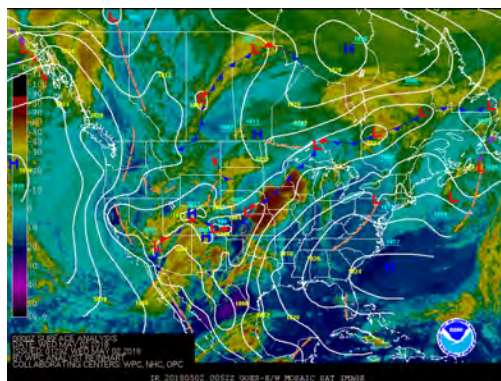


Figura 2-3: Ejemplo de mapa sinóptico obtenido del WPC. Fuente: http://www.wpc.ncep.noaa.gov/archives/web_pages/

Por otra parte, también fueron utilizados los mapas sinópticos de superficie y los niveles de altitud de 200, 500, 700, 850 hPa generados por el Centro de Pronósticos del Instituto de Meteorología de Cuba (INSMET). Estos mapas sinópticos (Fig.2-4) abarcan la región de estudio y se puede visualizar con mayor claridad los fenómenos sinópticos que influyen sobre el territorio mexicano. Estos mapas fueron facilitados por investigadores del INSMET y se encuentran disponibles desde el año 2003 en formato digital.

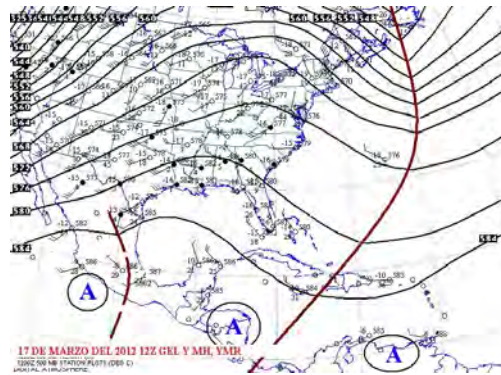


Figura 2-4: Ejemplo de mapa sinóptico del Centro de Pronóstico del INSMET. Fuente: Centro de Pronósticos del INSMET, Cuba.

2.4. Método SOM para la obtención de patrones sinópticos

El método utilizado para la detección de patrones sinópticos es conocido como Self-Organizing Maps (SOM, por sus siglas en inglés). Este método objetivo permite agrupar clústeres de patrones similares mediante un análisis estadístico y vectorial (Kohonen, 2001). Dentro del método se realizan una serie de procedimientos estadístico-matemáticos como son el reconocimiento de centroides para la confección de los clústeres y la obtención de Funciones Empíricas Ortogonales (EOFs, por sus siglas en inglés) para inicializar la distribución de los patrones y, posteriormente, definirlos de acuerdo a los mayores porcentajes de varianza explicada.

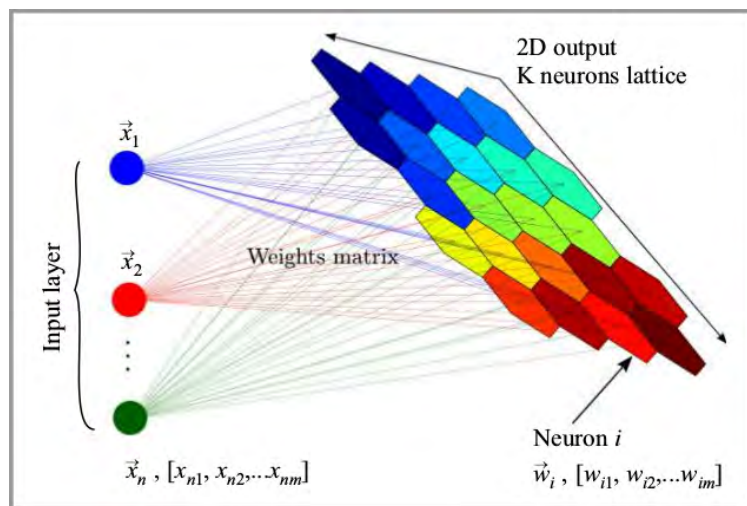


Figura 2-5: Cuadro resumen del método SOM. Fuente: Jankowski y Amanowicz (2015)

El método SOM consiste en una red neuronal artificial sugerida por Kohonen y Maps (1995) basada en aprendizaje no supervisado. En el algoritmo, las neuronas que inicialmente se presentan como datos multidimensionales se proyectan en una malla bidimensional regular (ver Fig.2-5). Dicha malla está compuesta por neuronas (o nodos), cada una de las cuales está representada por un vector de peso $m = [m_1, m_2, \dots, m_d]$, donde d es la dimensión de los vectores de entrada. Es decir, los vectores de peso tienen la misma dimensión que los vectores de entrada. Las neuronas están conectadas a sus adyacentes mediante una relación de vecindad, lo cual permite un enfoque topológico en la selección de los clústeres.

Se utilizó la paquetería SOM Toolbox, la cual, está desarrollada en el lenguaje de programación MATLAB para la obtención de los patrones sinópticos sobre la región central de México (Vesanto et al., 2000). El algoritmo del método SOM requiere que los datos de entrada presenten un formato y una distribución matricial de manera que puedan ser transformados en la estructura de malla bidimensional. La función que realiza esta transformación es “som_data_struct”. En este caso de estudio, las dimensiones de la matriz fueron $37 \times 365 \times (101 \times 201)$ que representa la distribución de los datos por días en los años de estudio en todos los puntos de la malla seleccionada como región de estudio. Esta matriz fue transformada a una matriz bidimensional de 13505×20301 , de modo que cada fila corresponde a cada uno de los días presentes en el período 1980-2016 y cada columna a cada uno de los puntos malla. La distribución de las columnas fue realizada de forma latitudinal, es decir, cada fila corresponde a cada uno de los días y está organizado de acuerdo a cada una de las latitudes y cada columna a las longitudes de la región de estudio. Se construyó una matriz con valores de anomalías estandarizadas para cada una de las variables en superficie y altitud mencionadas anteriormente.

El primer paso que realiza el algoritmo es inicializar los vectores de peso de las neuronas de la malla bidimensional creada con la función “som_data_struct”. Esta inicialización se realiza me-

dian­te las funcio­nes “som_lininitz” y “som_randinit”, depen­diendo de la elec­ción de los pa­rámetros lininit o randinit, respec­tivamente. El pa­rámetro randinit indica que los vec­tores de peso serán de­terminados de forma aleatoria, orga­nizando los valores desde el mí­nimo hasta el máx­imo aunque pro­vengan de forma desorganizada. Por su parte, el pa­rámetro lininit indica que los vec­tores de peso serán seleccionados de acuerdo a un subespacio lineal creado con los eigen­vectores principales de la matriz de covarianza de los datos de entrada. De esta forma, el pa­rámetro lininit es más eficiente que el pa­rámetro randinit, pues realiza un Análisis de Componentes Principales para de­terminar cuáles vec­tores tienen un mayor peso en la varianza de los datos. En este caso de estudio fue seleccionado el pa­rámetro lininit debido a sus ventajas para el análisis físico de los patrones sinópticos por los mayores porcentajes de varianza explicada y una mayor rapidez en el cómputo.

El segundo paso consiste en un proceso iterativo donde cada vector de los datos de entrada se intenta corresponder con una neurona de la malla. Con este paso se determina la distancia euclidiana entre cada vector de peso y los vectores de entrada, de modo que la menor distancia determina las Mejores Unidades Coincidentes (BMU, por sus siglas en inglés). Después de encontrar cada BMU, se identifica cada uno de los vectores de peso con las BMUs y se pueden reconocer cuáles BMUs pertenecen a cada día del período de estudio. Para efectuar este paso se debe seleccionar entre dos parámetros batch y sequential. El parámetro sequential realiza la búsqueda de las BMUs considerando cada uno de los vectores dentro de un radio de vecindad asignado; mientras que el parámetro batch agrupa los vectores en pequeños lotes o paquetes, de modo que las BMUs son determinados por el peso promedio de los vectores. La selección de estos parámetros no produce cambios notables en los resultados del algoritmo, aunque el parámetro batch permite una mejor optimización de tiempo de corrida del algoritmo. En este caso de estudio fue seleccionado el parámetro batch, aunque también se usó el parámetro sequential para comprobar las diferencias en los resultados, siendo notorio que no variaban los mismos sino más bien el tiempo de corrida.

La función de vecindad en el algoritmo SOM se refiere al conjunto de neuronas vecinas que son afectadas por la neurona ganadora en la fase de entrenamiento. A medida que el número de iteraciones avanza en el entrenamiento la vecindad, se hace más pequeña hasta afectar solamente a la neurona ganadora. De esta forma, las neuronas se van ordenando de modo que las más cercanas entre ellas tengan características similares. Esta función de vecindad posibilita un enfoque topológico en la visualización de los patrones sinópticos obtenidos en el algoritmo, de modo que se puede ver una sucesión lógica del comportamiento de las variables cuando son representadas. Es importante destacar que esta distribución de los patrones sinópticos no está basada en sus frecuencias de ocurrencia, sino entre las diferencias entre los valores de entrada. Como fue explicado anteriormente, esta función de vecindad es la principal ventaja del método SOM frente a otros métodos como EOFs, k-means, aproximación jerárquica, etc.

Entre las deficiencias que presenta el método SOM, como en el resto de los métodos de clusterización, se encuentra la selección del número de nodos o patrones sinópticos en este caso de estudio.

Existen diferentes criterios propuestos por diferentes autores con el objetivo de seleccionar bien este número de nodos, basados en técnicas tanto objetivas como subjetivas. Un número grande de nodos representa una resolución espacial más continua de la variabilidad de los patrones, sin embargo puede no tener un sentido físico en los resultados. Díaz-Esteban y Raga (2018) mostraron 16 regímenes de tiempo y su influencia en la precipitación para la región central y sur de México en los meses de verano, realizando un previo análisis de EOFs del comportamiento de las variables utilizadas para una selección óptima del número de clústeres. Por otra parte, Sáenz y Durán-Quesada (2015) detectaron 11 patrones del comportamiento del viento en la región de América Central basándose en el “Índice de Clasificabilidad” presentado por Michelangeli et al. (1995) y la revisión bibliográfica de otros trabajos centrados en el período invernal. Autores de diferentes regiones del planeta basaron su elección del número de clústeres en métodos subjetivos en combinación con objetivos, probando con diferentes números hasta observar un mejor significado físico en los resultados del algoritmo (Alexander et al., 2010; E. N. Cassano et al., 2015; Hewitson y Crane, 2002; Michaelides et al., 2010). En este estudio fueron seleccionados 20 patrones para realizar la climatología sinóptica de la región. La elección del número de patrones se basó en el diagnóstico experimental de diferentes números de patrones, de modo que los mismos presentaran la mayor variabilidad entre ellos por el comportamiento de sus valores de anomalías estandarizadas. También se consideró que sus frecuencias de ocurrencias fueran similares en el período de estudio.

3 Análisis y discusión de los resultados

3.1. Patrones sinópticos anuales en superficie para la región central de México

3.1.1. Comportamiento de la frecuencia de los patrones anuales de SLP en escalas temporales menores

Los patrones sinópticos y la influencia de la circulación atmosférica a gran escala sobre ellos, obtenidos para los valores de SLP mediante el método SOM, se presentan en la Fig.3-1. A continuación se muestra un análisis de las anomalías estandarizadas que presentan estos patrones sinópticos sobre la región de México (ver cuadro 3-1).

Cuadro 3-1: Comportamiento de los valores de anomalías estandarizadas de los patrones sinópticos anuales de SLP

Patrón sinóptico	Valor de Anomalía Estandarizada	Clasificación de Anomalía Estandarizada
SLP-AN01	0.9 a 1.0	Altamente Positiva (AP)
SLP-AN02	0.8 a 1.0	Altamente Positiva (AP)
SLP-AN03	0.8 a 1.0	Altamente Positiva (AP)
SLP-AN04	0.6 a 0.8	Moderadamente Positiva (MP)
SLP-AN05	0.4 a 0.6	Moderadamente Positiva (MP)
SLP-AN06	0.4 a 0.6	Moderadamente Positiva (MP)
SLP-AN07	0.4 a 0.6	Moderadamente Positiva (MP)
SLP-AN08	0.2 a 0.4	Ligeramente Positiva (LP)
SLP-AN09	0 a 0.2	Ligeramente Positiva (LP)
SLP-AN10	0 a 0.2	Ligeramente Positiva (LP)
SLP-AN11	-0.2 a 0	Ligeramente Negativa (LN)
SLP-AN12	-0.4 a -0.2	Ligeramente Negativa (LN)
SLP-AN13	-0.4 a -0.2	Ligeramente Negativa (LN)
SLP-AN14	-0.6 a -0.4	Moderadamente Negativa (MN)
SLP-AN15	-0.4 a -0.2	Ligeramente Negativa (LN)
SLP-AN16	-0.4 a -0.2	Ligeramente Negativa (LN)
SLP-AN17	-0.8 a -0.6	Moderadamente Negativa (MN)
SLP-AN18	-1 a -0.8	Altamente Negativa (AN)
SLP-AN19	-1 a -0.8	Altamente Negativa (AN)
SLP-AN20	-0.8 a -0.6	Moderadamente Negativa (MN)

Analizando los valores de anomalías estandarizadas de SLP sobre la región central de México, se observa que los patrones sinópticos del SLP-AN01 al SLP-AN10 presentan anomalías positivas en el campo de SLP. En los meses del período seco es donde se encuentran los valores de presión

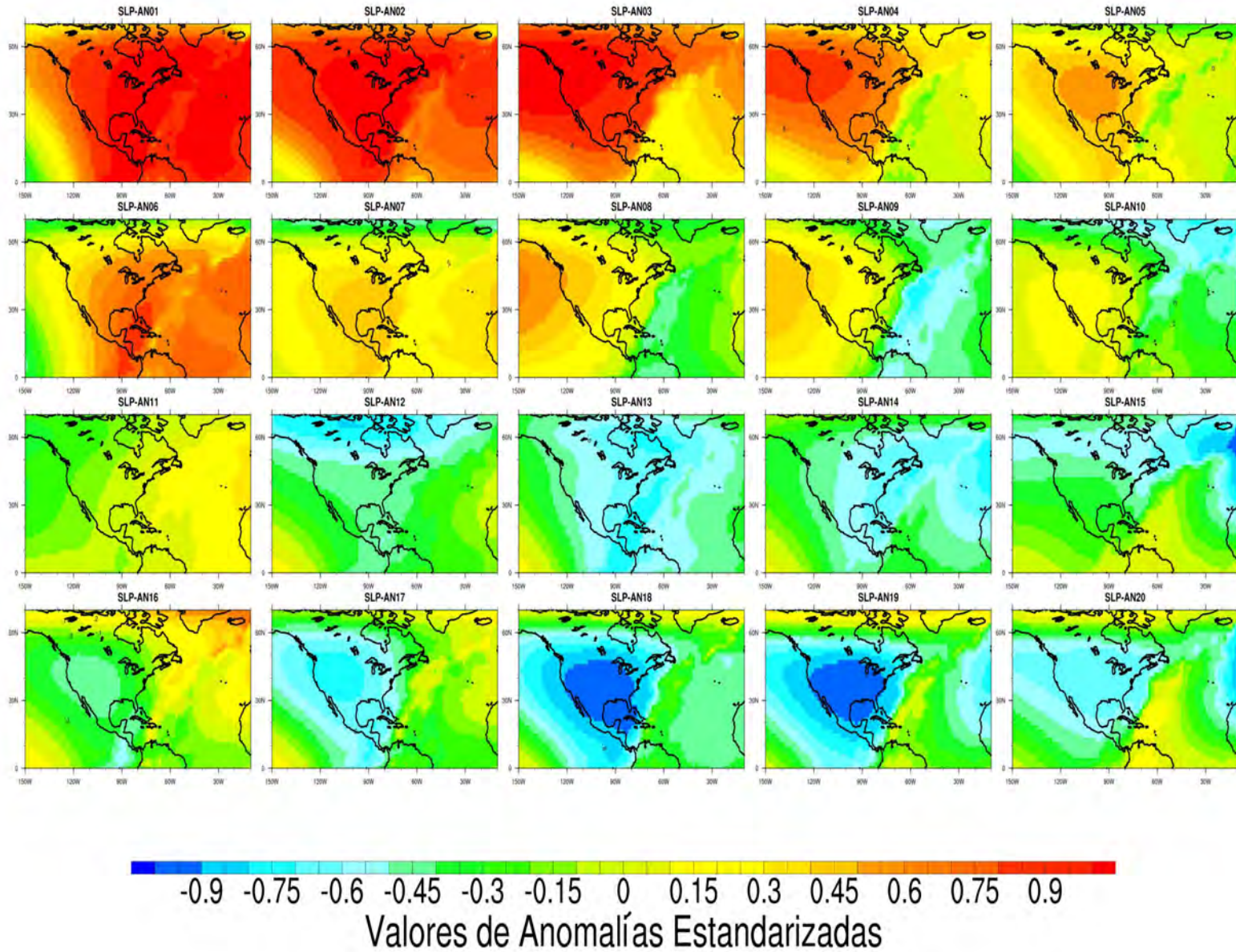


Figura 3-1: Patrones sinópticos anuales de SLP obtenidos mediante el método SOM.

más altos de lo normal, que inhiben el desarrollo de la convección y se puede observar el avance de sistemas migratorios desde altas latitudes hasta latitudes tropicales. Por otra parte, los patrones sinópticos del SLP-AN11 al SLP-AN20 muestran las anomalías negativas, correspondientes a los meses del período húmedo. La distribución de las anomalías estandarizadas de SLP realizadas por el algoritmo van desde las anomalías más altamente positivas (ver clúster SLP-AN01 en Fig.3-1) hasta las moderadamente y altamente negativas (ver clústeres SLP-AN19 y SLP-AN20 en Fig.3-1), de modo que los valores de SLP más cercanos a la media histórica climatológica se encuentran en los clústeres centrales (ver clústeres del SLP-AN08 al SLP-AN13 en Fig.3-1).



Figura 3-2: Comportamiento de los patrones sinópticos anuales de SLP por períodos seco (noviembre-abril) y húmedo (mayo-octubre) de acuerdo a su porcentaje de ocurrencia en el período de estudio.

Como se puede observar en la Fig.3-2, la distribución de los clústeres cumple con la función de vecindad que distingue al método SOM. El análisis de frecuencia de ocurrencia de los patrones en escalas temporales menores (períodos, trimestres y meses) muestra que el algoritmo pudo distinguir entre los patrones del período seco (noviembre-abril) y los del período húmedo (mayo - octubre). El criterio de reconocimiento del comportamiento de los clústeres en las diferentes escalas temporales será tomando como referencia los valores porcentuales mayores o iguales al 80 % de ocurrencia para identificar a un patrón sinóptico como típico de un período, trimestre o mes. De esta forma, todo patrón sinóptico o patrones sinópticos cuya suma porcentual de frecuencia sea igual o mayor al 80 % de su frecuencia anual será considerado como característico de ese período, trimestre o mes y no de otro. Los patrones sinópticos SLP-AN01 al SLP-AN07 corresponden al período seco, mientras que los patrones sinópticos SLP-AN12 al SLP-AN14 y del SLP-AN16 al SLP-AN20 pertenecen al período húmedo. Es importante destacar que los patrones sinópticos SLP-AN08, SLP-AN09, SLP-AN10 y SLP-AN15 tienen su mayor frecuencia de ocurrencia (superior al 60 % de los casos) en el período seco, aunque no puede descartarse su comportamiento en el

Cuadro 3-2: Comportamiento de los patrones sinópticos anuales de SLP por trimestres, expresado en porcentajes de frecuencia. Las celdas amarillas representan los patrones cuya suma porcentual de frecuencia es mayor o igual al 80 %.

Patrones sinópticos SLP	TRIMESTRES			
	MAM	JJA	SON	DEF
SLP-AN01	11	0	6	83
SLP-AN02	15	0	15	70
SLP-AN03	33	1	19	47
SLP-AN04	49	1	16	34
SLP-AN05	34	0	14	52
SLP-AN06	14	0	8	78
SLP-AN07	30	0	16	54
SLP-AN08	83	2	4	11
SLP-AN09	91	1	2	6
SLP-AN10	51	0	26	23
SLP-AN11	40	30	18	12
SLP-AN12	33	59	4	4
SLP-AN13	43	50	6	1
SLP-AN14	23	24	52	1
SLP-AN15	7	1	80	12
SLP-AN16	9	86	5	0
SLP-AN17	3	92	5	0
SLP-AN18	2	71	27	0
SLP-AN19	1	34	65	0
SLP-AN20	0	7	92	1

período húmedo. De forma similar ocurre con el clúster SLP-AN11, donde el 67 % de ocurrencia se presenta en el período húmedo, pero también es característica su presencia en el período seco.

El comportamiento por trimestre de los clústeres anuales de SLP se presenta en el cuadro 3-2. Los trimestres fueron definidos de acuerdo a las estaciones del año en el hemisferio boreal. De esta forma, el trimestre DEF corresponde a los meses de invierno (diciembre-enero-febrero), el trimestre MAM corresponde a los meses de primavera (marzo-abril-mayo), el trimestre JJA corresponde a los meses de verano (junio-julio-agosto) y el trimestre SON corresponde a los meses de otoño (septiembre-octubre-noviembre).

En el cuadro 3-2 se puede observar que la distribución trimestral de los patrones es más hete-

rogénea. Bajo el criterio asumido basado en el 80 % de la frecuencia, representado por las celdas de color amarillo, se puede identificar al clúster SLP-AN01 como característico del trimestre DEF, los clústeres SLP-AN08 y SLP-AN09 como característicos del trimestre MAM, los clústeres SLP-AN16 y SLP-AN17 del trimestre JJA y el clúster SLP-AN20 del trimestre SON. Este comportamiento trimestral de los clústeres mencionados muestran una relación consecuente con sus valores de anomalías estandarizadas sobre el centro de México. El clúster SLP-AN01 presenta anomalías altamente positivas, lo cual es característico del período invernal por la presencia de anticiclones de origen continental migratorio desplazándose hacia latitudes tropicales. Los clústeres característicos del trimestre JJA presentan valores de anomalías estandarizadas ligeramente y moderadamente negativas, típico del período estival donde los altos valores de radiación solar en la región tropical favorecen las corrientes ascendentes de las masas de aire, lo que propicia que se presenten bajos valores de presión atmosférica en superficie. Estos movimientos de masas de aire pueden estar asociados al reflejo de la circulación de gran escala en el comportamiento de los fenómenos sinópticos, tales como la ITCZ y las circulaciones monzónicas. En los trimestres MAM y SON los valores de anomalías estandarizadas de SLP son más cercanos a la media climatológica, lo que explica que sus clústeres característicos presenten valores ligeramente y moderadamente positivos y negativos, respectivamente.

Otros clústeres no son característicos de un trimestre propiamente dicho, debido fundamentalmente a su mayor frecuencia de ocurrencia en meses de transición entre los trimestres. De esta forma, los clústeres SLP-AN03, SLP-AN05, SLP-AN06 y SLP-AN07 se presentan con mayor frecuencia en el trimestre DEF, pero también son característicos del trimestre MAM aunque con menor frecuencia. De forma similar ocurre con el clúster SLP-AN04 que es más característico del trimestre MAM pero también del trimestre DEF; los clústeres SLP-AN12 y SLP-AN13 son más característicos del trimestre JJA y en segundo lugar del trimestre MAM; el clúster SLP-AN15 se presenta mayormente en el trimestre SON y en un menor por ciento de ocurrencia en el trimestre DEF; y los clústeres SLP-AN18 y SLP-AN19 son característicos de los trimestres JJA y SON, respectivamente; y en segundo lugar de los trimestres SON y JJA, respectivamente. Por otra parte, clústeres como SLP-AN02 y SLP-AN10 se pueden presentar en mayor o menor frecuencia en los trimestres DEF, MAM y SON, pero nunca se observan en el trimestre JJA correspondiente al período estival; mientras que los clústeres SLP-AN11 y SLP-AN14 se pueden presentar con determinadas frecuencias en los trimestres JJA, MAM y SON, pero su presencia es poca en el trimestre DEF correspondiente al período invernal.

Cuadro 3-3: Comportamiento de los patrones sinópticos anuales de SLP en los meses del año, expresado en porcentajes de frecuencia.

Patrones SLP	MESES											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
SLP-AN01	37	25	10	1	0	0	0	0	0	1	4	22
SLP-AN02	30	14	12	3	0	0	0	0	0	5	10	26
SLP-AN03	12	16	21	11	3	1	0	0	0	4	15	17
SLP-AN04	12	13	25	18	6	0	0	0	0	4	13	9
SLP-AN05	14	16	24	8	3	0	0	0	0	4	10	21
SLP-AN06	28	27	12	2	0	0	0	0	0	1	7	23
SLP-AN07	20	14	20	8	2	0	0	0	0	3	13	20
SLP-AN08	3	5	18	35	30	2	0	0	0	1	3	3
SLP-AN09	0	4	18	43	31	1	0	0	0	0	1	2
SLP-AN10	5	7	14	26	12	0	0	0	0	11	15	10
SLP-AN11	4	6	5	13	22	19	5	7	7	8	3	1
SLP-AN12	1	2	3	8	22	34	19	5	2	2	1	1
SLP-AN13	0	0	1	6	35	41	9	3	3	2	0	0
SLP-AN14	1	0	0	6	17	10	3	11	18	31	3	0
SLP-AN15	1	2	1	3	3	0	0	1	6	30	44	9
SLP-AN16	0	0	0	0	9	22	40	24	5	0	0	0
SLP-AN17	0	0	0	0	2	28	43	23	4	1	0	0
SLP-AN18	0	0	0	0	2	12	22	37	22	5	0	0
SLP-AN19	0	0	0	0	1	1	4	28	51	14	1	0
SLP-AN20	0	0	0	0	0	0	1	6	27	48	17	1

El análisis del comportamiento de la frecuencia de los clústeres en los diferentes meses del año (ver cuadro 3-3) permite validar el análisis realizado anteriormente para los períodos seco y húmedo y los cuatro trimestres del año. Se observa que el clúster SLP-AN01 se presenta en los meses diciembre, enero y febrero, principalmente en enero; su presencia en otros meses del año es muy poca, por lo que es característico del trimestre DEF correspondiente al período seco. De la misma forma ocurre con los clústeres SLP-AN08 y SLP-AN09, los cuales son característicos de los meses marzo, abril y mayo, principalmente abril, que corresponden al trimestre que abarca la transición entre el período seco y el húmedo. Los clústeres SLP-AN16 y SLP-AN17 se presentan en los meses de junio, julio y agosto, principalmente julio y corresponden al período húmedo. De igual forma se observa el clúster SLP-AN20 con su mayor presencia en los meses septiembre, octubre y noviembre, que constituye la transición entre el período húmedo y seco. En el resto de los clústeres se puede observar una distribución mensual heterogénea o distribuida a lo largo de los meses, razón por la cual pueden presentarse indistintamente en ambos períodos seco y húmedo y en va-

rios trimestres. Esta distribución muestra la complejidad del estudio de la atmósfera y su naturaleza continua, lo que impide definir estrictas categorías en la escala temporal además de mostrar la influencia de oscilaciones de escala planetaria que predominan en el comportamiento de los valores SLP y en los patrones sinópticos.

El análisis del comportamiento mensual también permite reconocer en cada mes cuáles son los clústeres más probables de encontrar, es decir, cómo se comporta cada patrón dentro de cada uno de los meses del año, lo cual es una herramienta útil en el pronóstico del tiempo. A continuación se muestra el porcentaje de ocurrencia para cada mes del año y para cada uno de los patrones detectados (ver cuadro 3-4).

Cuadro 3-4: Comportamiento de los patrones sinópticos anuales de SLP en cada mes del año, expresado en porcentajes de frecuencia.

Patrón sinóptico SLP	MESES											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
SLP-AN01	23	17	6	1	0	0	0	0	0	1	3	13
SLP-AN02	20	10	7	2	0	0	0	0	0	3	7	17
SLP-AN03	8	12	12	8	2	1	0	0	0	3	10	11
SLP-AN04	6	7	12	9	3	0	0	0	0	2	7	4
SLP-AN05	9	11	13	5	2	0	0	0	0	2	7	13
SLP-AN06	19	22	8	2	0	0	0	0	0	1	5	16
SLP-AN07	10	8	10	4	1	0	0	0	0	1	7	11
SLP-AN08	1	3	9	18	15	1	0	0	0	0	2	2
SLP-AN09	0	2	10	25	18	1	0	0	0	0	1	1
SLP-AN10	2	4	6	11	5	0	0	0	0	5	6	5
SLP-AN11	1	2	1	3	5	5	1	2	2	2	1	0
SLP-AN12	0	1	2	4	11	19	10	3	1	1	1	1
SLP-AN13	0	0	1	4	20	22	5	2	2	1	0	0
SLP-AN14	0	0	0	2	5	3	1	3	6	9	1	0
SLP-AN15	1	2	1	2	2	0	0	1	4	21	30	6
SLP-AN16	0	0	0	0	8	22	39	24	5	0	0	0
SLP-AN17	0	0	0	0	1	17	25	14	3	1	0	0
SLP-AN18	0	0	0	0	1	8	15	24	14	3	0	0
SLP-AN19	0	0	0	0	1	1	4	24	44	12	1	0
SLP-AN20	0	0	0	0	0	0	1	3	18	32	11	0

De este modo, basándonos en el cuadro 3-4, se puede decir que los clústeres SLP-AN01 al SLP-

AN03 y SLP-AN05 al SLP-AN07 son característicos del mes de diciembre; los clústeres SLP-AN01 al SLP-AN02 y SLP-AN05 al SLP-AN07 del mes de enero y los clústeres SLP-AN01 al SLP-AN07 del mes de febrero. Estos meses del trimestre DEF están caracterizados, de acuerdo a sus clústeres más característicos, por anomalías alta y moderadamente positivas. Por otra parte, los clústeres SLP-AN02 al SLP-AN09 son característicos del mes de marzo, los clústeres SLP-AN03 al SLP-AN05, del SLP-AN07 al SLP-AN10 y del SLP-AN12 al SLP-AN13 del mes de abril; y los clústeres SLP-AN08 al SLP-AN14 y el clúster SLP-AN16 del mes de mayo. En estos meses del trimestre MAM se pueden continuar observando anomalías estandarizadas alta y moderadamente positivas, pero predominan ligeramente positivas y ligeramente negativas, lo cual es característico de la transición entre el período invernal y el estival. En cuanto a los meses del trimestre JJA, se puede observar que en el mes de junio son característicos los clústeres SLP-AN12 al SLP-AN13 y SLP-AN16 al SLP-AN17; en el mes de julio los clústeres SLP-AN12, del SLP-AN16 al SLP-AN18; mientras que el mes de agosto son los clústeres del SLP-AN16 al SLP-AN19. Durante este trimestre JJA se pueden observar anomalías estandarizadas negativas, que abarcan desde ligeras hasta altamente negativas de SLP, lo cual es característico de los meses estivales. De forma similar al trimestre MAM sucede con el trimestre SON, que son meses de transición entre el período estival y el invernal. En el mes de septiembre los clústeres más característicos son SLP-AN18 al SLP-AN20; en el mes de octubre son los clústeres SLP-AN10, SLP-AN14 al SLP-AN15 y del SLP-AN18 al SLP-AN20; mientras que en el mes de noviembre son los clústeres SLP-AN02 al SLP-AN05 y SLP-AN07. En estos meses las anomalías estandarizadas tienen valores tanto negativos como positivos, es notable el cambio en el signo de las anomalías del mes de noviembre con respecto al de los meses septiembre y octubre, mostrando la transición al período seco y la cercanía de los meses invernales.

3.1.2. Comportamiento de la frecuencia de los patrones anuales de temperatura en superficie en escalas temporales menores

Los clústeres obtenidos mediante el método SOM para las anomalías estandarizadas de temperatura en superficie (S2T de ahora en adelante) se muestran a continuación en la Fig.3-3.

Como se puede observar, también se cumple la función de vecindad en el distribución topológica de los clústeres mediante el método SOM. El cuadro 3-5 muestra el comportamiento de las anomalías estandarizadas sobre la región central de México.

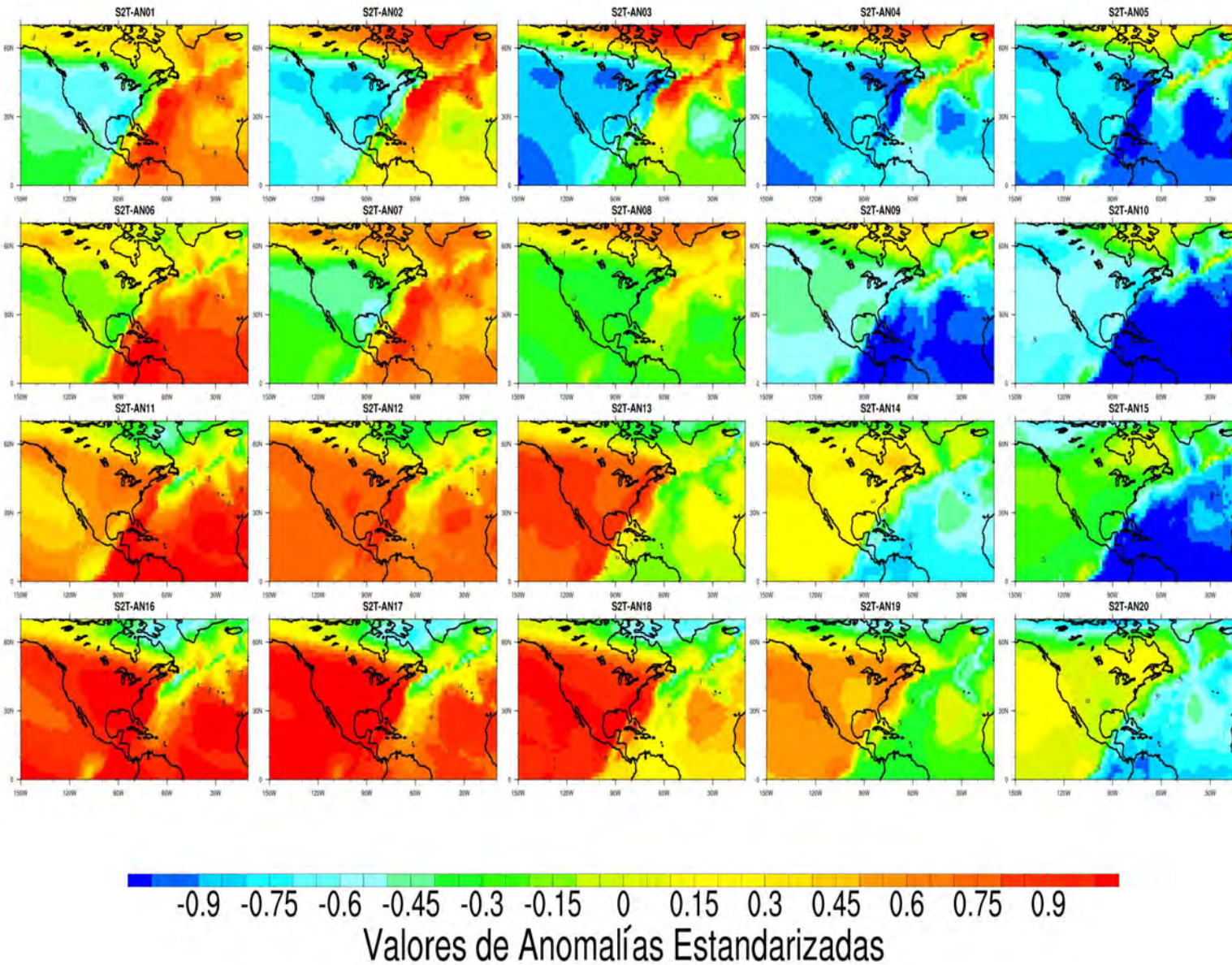


Figura 3-3: Patrones sinópticos anuales de S2T obtenidos mediante el método SOM.

Cuadro 3-5: Comportamiento de los valores de anomalías estandarizadas de los patrones sinópticos anuales de S2T.

Patrón sinóptico	Valor de Anomalía Estandarizada	Clasificación de Anomalía Estandarizada
S2T-AN01	-0.6 a -0.4	Moderadamente Negativa (MN)
S2T-AN02	-0.8 a -0.6	Moderadamente Negativa (MN)
S2T-AN03	-0.8 a -0.6	Moderadamente Negativa (MN)
S2T-AN04	-1 a -0.8	Altamente Negativa (AN)
S2T-AN05	-1 a -0.8	Altamente Negativa (AN)
S2T-AN06	-0.2 a 0	Ligeramente Negativa (LN)
S2T-AN07	-0.4 a -0.2	Ligeramente Negativa (LN)
S2T-AN08	-0.4 a -0.2	Ligeramente Negativa (LN)
S2T-AN09	-0.6 a -0.4	Moderadamente Negativa (MN)
S2T-AN10	-0.8 a -0.6	Moderadamente Negativa (MN)
S2T-AN11	0.4 a 0.6	Moderadamente Positiva (MP)
S2T-AN12	0.6 a 0.8	Moderadamente Positiva (MP)
S2T-AN13	0.8 a 1	Altamente Positiva (AP)
S2T-AN14	0 a 0.2	Ligeramente Positiva (LP)
S2T-AN15	-0.4 a -0.2	Ligeramente Negativa (LN)
S2T-AN16	0.8 a 1	Altamente Positiva (AP)
S2T-AN17	1 a 1.2	Altamente Positiva (AP)
S2T-AN18	1 a 1.2	Altamente Positiva (AP)
S2T-AN19	0.4 a 0.6	Moderadamente Positiva (MP)
S2T-AN20	-0.2 a 0	Ligeramente Negativa (LN)

Se puede observar que los clústeres S2T-AN01 al S2T-AN10, junto con S2T-AN15 y S2T-AN20 presentan anomalías estandarizadas con valores negativos sobre la región central de México; mientras que el resto de los clústeres presentan anomalías estandarizadas positivas. Los valores de temperatura superiores a la media histórica se encuentran en el período estival, aunque se pueden encontrar valores altos dentro de todo el período que abarquen los trimestres MAM y SON. El comportamiento de la ocurrencia de los clústeres de S2T en los períodos seco y húmedo se puede observar en la Fig.3-4.



Figura 3-4: Comportamiento de los patrones de S2T en los periodos seco y húmedo de acuerdo a su porcentaje de ocurrencia en en el periodo de estudio.

Analizando el comportamiento de los clústeres de S2T dentro de los periodos seco y húmedo, puede decirse que el algoritmo del método SOM también distingue una marcada estacionalidad entre ambos periodos, de modo que los clústeres pertenecen a un periodo o al otro. Los clústeres S2T-AN02 al S2T-AN05, del S2T-AN08 al S2T-AN10, del S2T-AN14 al S2T-AN15 y el clúster S2T-AN20 pertenecen al periodo seco. Estos clústeres presentan anomalías estandarizadas negativas, que abarcan desde ligeras hasta altamente negativas, con la excepción del clúster S2T-AN14 que tiene anomalías ligeramente positivas, lo cual también se puede presentar en estos periodos durante los meses de transición al periodo húmedo. Por otra parte, los clústeres S2T-AN01, S2T-AN06 al S2T-AN07, S2T-AN11 al S2T-AN13 y del S2T-AN16 al S2T-AN18 son clústeres característicos del periodo húmedo. Estos clústeres presentan, por lo general, anomalías estandarizadas positivas; aunque también se presentan valores negativos como en los clústeres S2T-AN01, S2T-AN06 y S2T-AN07 que deben presentarse en meses de transición al periodo seco. Otros clústeres como S2T-AN02 y S2T-AN19 se presentan en ambos periodos ya que no cumplen con el criterio de selección superior al 80 por ciento de su frecuencia en alguno de los periodos. Sin embargo, de acuerdo a su frecuencia de ocurrencia superior al 50 %, se puede decir que el clúster S2T-AN02 es más característico del periodo húmedo que del seco y lo contrario ocurre con el clúster S2T-AN19.

El comportamiento de los clústeres de S2T en cada uno de los trimestres previamente definidos se muestra en el cuadro 3-6.

Cuadro 3-6: Comportamiento de los patrones de S2T por trimestres. Las celdas en color amarillo representan los patrones cuya suma porcentual de frecuencia es mayor o igual al 80 %.

Patrones sinópticos SLP	TRIMESTRES			
	MAM	JJA	SON	DEF
S2T-AN01	77	23	0	0
S2T-AN02	100	0	0	0
S2T-AN03	100	0	0	0
S2T-AN04	79	0	0	21
S2T-AN05	19	0	0	81
S2T-AN06	0	100	0	0
S2T-AN07	75	25	0	0
S2T-AN08	67	0	3	30
S2T-AN09	1	0	1	98
S2T-AN10	0	0	0	100
S2T-AN11	0	100	0	0
S2T-AN12	0	6	94	0
S2T-AN13	0	0	100	0
S2T-AN14	0	0	73	27
S2T-AN15	0	0	1	99
S2T-AN16	0	97	3	0
S2T-AN17	0	13	87	0
S2T-AN18	0	0	100	0
S2T-AN19	0	0	100	0
S2T-AN20	0	0	60	40

De acuerdo al criterio de selección anteriormente planteado, podemos decidir cuál o cuáles clústeres son característicos de cada trimestre. En el caso del trimestre DEF los clústeres característicos son S2T-AN05, S2T-AN09, S2T-AN10 y S2T-AN15, cuyas anomalías estandarizadas presentan valores negativos como es típico de los meses invernales. En el caso del trimestre MAM los clústeres más característicos son S2T-AN02 y S2T-AN03, con valores de anomalías estandarizadas moderadamente negativas sobre la región central de México, lo cual es característico de la etapa de transición del invierno al verano. En el caso del trimestre JJA se presentan los clústeres S2T-AN06, S2T-AN11 y S2T-AN16 como los característicos, donde se muestran anomalías estandarizadas positivas y ligeramente negativas. Los clústeres S2T-AN12 al S2T-AN13 y del S2T-AN17 al S2T-AN19 son característicos del trimestre SON, aquí se observan los mayores valores de anomalías estandarizadas.

Otros clústeres como S2T-AN01, S2T-AN04, S2T-AN07 y S2T-AN08 no pueden ser definidos como característicos de un trimestre u otro pero sí se puede observar que lo son en mayor medida del trimestre MAM, con anomalías estandarizadas negativas. De la misma forma ocurre con clústeres como S2T-AN14 y S2T-AN20 que tienen más del 60 % en el trimestre SON, pero también es notable su presencia en otros trimestres. Cabe destacar que en estos últimos clústeres las anomalías estandarizadas son bastante cercanas a la media climatológica, lo cual muestra que son condiciones bastante normales todo el año.

Haciendo el análisis del comportamiento mensual de los clústeres S2T se pueden conocer las particularidades del comportamiento en períodos y trimestres. El cuadro **3-7** muestra dicho comportamiento. Se puede observar que existe una distribución más concentrada de los clústeres en los meses pues todos están representados en uno o dos meses de los 12 que posee el año, a diferencia de los clústeres de SLP que mostró ser más heterogénea. De esta forma se puede reconocer que los clústeres sean característicos de uno u otro período del año, húmedo y seco, y de uno de los cuatro trimestres del año. Los clústeres S2T-AN09 y S2T-AN10 se presentan solo durante los meses del trimestre DEF dentro del período seco y sus valores de anomalías estandarizadas presentan valores negativos. De forma similar ocurre con los clústeres S2T-AN02 y S2T-AN03 que se presentan en los meses del trimestre MAM y constituyen la transición entre el período seco y el húmedo; el clúster S2T-AN16 en los meses del trimestre JJA en el período seco, con anomalías estandarizadas altamente positivas. Para el caso del trimestre SON, el clúster S2T-AN19 es característico de los meses octubre y noviembre, que constituyen la transición entre el período húmedo y el seco. El resto de los clústeres están presentes en meses consecutivos que abarcan la transición entre dos trimestres y, en muchos casos, entre los períodos seco y húmedo.

Cuadro 3-7: Comportamiento de los patrones de S2T en los meses del año.

Patrón sinóptico SLP	MESES											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
S2T-AN01	0	0	0	0	77	23	0	0	0	0	0	0
S2T-AN02	0	0	0	48	52	0	0	0	0	0	0	0
S2T-AN03	0	0	30	70	0	0	0	0	0	0	0	0
S2T-AN04	1	19	78	2	0	0	0	0	0	0	0	0
S2T-AN05	16	64	19	0	0	0	0	0	0	0	0	1
S2T-AN06	0	0	0	0	0	94	6	0	0	0	0	0
S2T-AN07	0	0	0	0	75	25	0	0	0	0	0	0
S2T-AN08	0	0	4	63	0	0	0	0	0	0	4	30
S2T-AN09	39	17	1	0	0	0	0	0	0	0	1	42
S2T-AN10	73	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13
S2T-AN11	0	0	0	0	0	9	88	3	0	0	0	0
S2T-AN12	0	0	0	0	0	1	4	0	83	12	0	0
S2T-AN13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	82	18	0
S2T-AN14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	73	27
S2T-AN15	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	86
S2T-AN16	0	0	0	0	0	0	22	75	3	0	0	0
S2T-AN17	0	0	0	0	0	0	0	13	87	0	0	0
S2T-AN18	0	0	0	0	0	0	0	0	20	80	0	0
S2T-AN19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25	75	0
S2T-AN20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	60	40

3.1.3. Correspondencia entre los patrones anuales de SLP y temperatura en superficie

Para identificar la relación entre cada uno de los clústeres de SLP con cada uno de los clústeres de S2T se aplicó el mismo criterio asumido para el reconocimiento del comportamiento de la frecuencia de dichos clústeres en escalas temporales menores. De esta forma, los clústeres de S2T cuya suma porcentual sean superiores o igual al 80 por ciento de coincidencia con los días en que se presenta un clúster de SLP, y viceversa, serán reconocidos como aquellos que caracterizan a dicho clúster. El cuadro 3-8 muestra dicha relación.

Al analizar la relación entre los clústeres de SLP con los de S2T se puede observar que un mismo clúster de SLP puede estar relacionado con varios clústeres de S2T de diferentes rangos de anomalías estandarizadas. Esto puede entenderse debido a la complejidad de los sistemas atmosféri-

Cuadro 3-8: Relación entre los patrones sinópticos de SLP y S2T.

SLP/S2T	CORRESPONDENCIAS PORCENTUALES ENTRE PATRONES SLP Y S2T																			
	S2T-AN01	S2T-AN02	S2T-AN03	S2T-AN04	S2T-AN05	S2T-AN06	S2T-AN07	S2T-AN08	S2T-AN09	S2T-AN10	S2T-AN11	S2T-AN12	S2T-AN13	S2T-AN14	S2T-AN15	S2T-AN16	S2T-AN17	S2T-AN18	S2T-AN19	S2T-AN20
SLP-AN01	0	0	1	5	25	0	0	0	8	38	0	0	1	3	13	0	0	0	0	4
SLP-AN02	0	1	4	9	19	0	0	0	11	24	0	0	4	6	12	0	0	0	1	4
SLP-AN03	1	5	13	15	17	1	0	0	2	10	0	0	1	6	8	0	0	2	8	10
SLP-AN04	3	8	17	20	13	0	1	1	3	8	0	0	1	3	5	0	0	2	5	10
SLP-AN05	1	4	10	22	8	0	1	0	8	10	0	0	3	3	16	0	0	1	3	10
SLP-AN06	0	0	2	6	28	0	0	0	8	31	0	0	1	7	13	0	0	0	1	2
SLP-AN07	1	3	9	15	20	0	0	0	13	12	0	0	3	10	8	0	0	1	3	2
SLP-AN08	12	29	29	13	4	1	3	1	2	1	0	0	1	2	1	0	0	0	1	1
SLP-AN09	9	36	28	13	2	0	8	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1
SLP-AN10	0	20	18	12	4	0	3	1	4	2	0	0	7	6	5	0	0	2	7	7
SLP-AN11	8	13	11	2	8	12	9	0	1	4	8	0	4	1	1	6	5	5	1	1
SLP-AN12	5	13	7	1	3	28	12	0	1	0	18	0	1	1	1	6	2	1	0	0
SLP-AN13	23	13	2	1	0	27	16	0	0	0	8	0	1	0	0	4	2	2	0	0
SLP-AN14	7	10	4	0	0	7	7	0	0	0	3	1	11	0	0	9	16	23	2	1
SLP-AN15	0	2	3	2	1	0	2	0	1	2	0	1	15	17	4	1	5	14	22	9
SLP-AN16	6	1	0	0	0	19	4	0	0	0	31	0	0	0	0	32	6	1	0	0
SLP-AN17	3	0	0	0	0	25	1	0	0	0	33	1	0	0	0	33	4	1	0	0
SLP-AN18	3	0	0	0	0	9	0	0	0	0	17	1	1	0	0	40	22	6	0	0
SLP-AN19	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	3	2	3	0	0	27	45	18	1	0
SLP-AN20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	16	2	0	6	22	33	14	3

cos, donde un fenómeno sinóptico puede ocurrir en condiciones dinámicas muy diferentes y como consecuencia producir comportamientos diferentes en campos como la temperatura, humedad, precipitación, etc. Por otra parte, esta relación muestra que los patrones sinópticos de S2T son más puntuales y característicos de escalas temporales menores, mientras que los patrones de SLP son de mayor escala. Sin embargo, a pesar de esa limitación física, se puede observar que el algoritmo del método SOM fue capaz de identificar situaciones físicas con bastante claridad. Por ejemplo, en los clústeres de SLP donde se presentan anomalías estandarizadas altamente positivas, tales como los clústeres del SLP-AN01 al SLP-AN03, le corresponden clústeres de S2T con anomalías estandarizadas negativas, en los que más del 50 % de los casos coincide son altas y moderadamente negativas, típico de los meses invernales (ver clústeres S2T-AN04, S2T-AN05, S2T-AN09 y S2T-AN11). Otros clústeres de SLP con anomalías estandarizadas moderadamente positivas (ver clústeres SLP-AN03 al SLP-AN07) están asociados con clústeres de S2T cuyas anomalías estandarizadas son moderadas y altamente negativas (ver clústeres S2T-AN03 al S2T-AN05, S2T-AN10 y S2T-AN15), aunque también se presentan otros con anomalías estandarizadas positivas con muy poca frecuencia. Por otra parte, los clústeres de SLP con anomalías estandarizadas negativas están más relacionados con clústeres de S2T cuyas anomalías estandarizadas presentan valores positivos. Por solo mencionar algunos casos, se puede observar que a clústeres como SLP-AN18 al SLP-AN20, con anomalías estandarizadas altamente negativas, le corresponden los clústeres S2T-AN16 al S2T-AN19, cuyos valores presentan anomalías estandarizadas altamente positivas, típico de los meses estivales.

Analizando las posibles causas físicas de esta relación inversa entre los valores de anomalías estandarizadas de SLP y S2T, se puede suponer que la misma está ligada a los movimientos convergentes y/o divergentes de las masas de aire en la altura. Debido a los altos valores de radiación solar recibida en la zona tropical, fundamentalmente en los meses estivales, se debe producir un aumento de la temperatura en superficie, lo que conlleva a movimientos ascendentes de las masa de aire húmedo que son menos densas que las de aire seco. Este movimiento ascendente produce un gradiente vertical de presión atmosférica, que produce bajos valores de la presión en superficie. De esta forma, se puede asumir que el algoritmo del método SOM permite validar los principios generales de la circulación general de la atmósfera y la dinámica atmosférica.

3.1.4. Análisis meteorológico sinóptico de los patrones sinópticos anuales detectados con variables en superficie.

Una vez que ya se analizó el comportamiento de los patrones sinópticos de SLP y S2T en escalas temporales menores (períodos, trimestres y meses), así como las relaciones entre ellos, se puede realizar un análisis sinóptico detallado de algunos días donde se presentan dichos patrones. La selección de los días a analizar fue realizada basándose en el criterio de aquellos días donde la persistencia del clúster fue mayor a cinco días. El análisis de los mapas de tiempo, junto con la

interpretación de los valores de anomalías estandarizadas en cada clúster, fue utilizado para reconocer la situación sinóptica generalizada en los días de ocurrencia de cada clúster de SLP con sus clústeres de S2T asociados. Este análisis sinóptico fue realizado para la región de estudio, definida en el capítulo 2 del presente documento. Es importante destacar que los mapas sinópticos utilizados para la explicación de cada uno de los patrones sinópticos es un caso particular que contiene una alta representación de la configuración sinóptica detallada, por lo que puede que algún elemento en específico no se visualice en el mapa pero sí sea característico del patrón sinóptico.

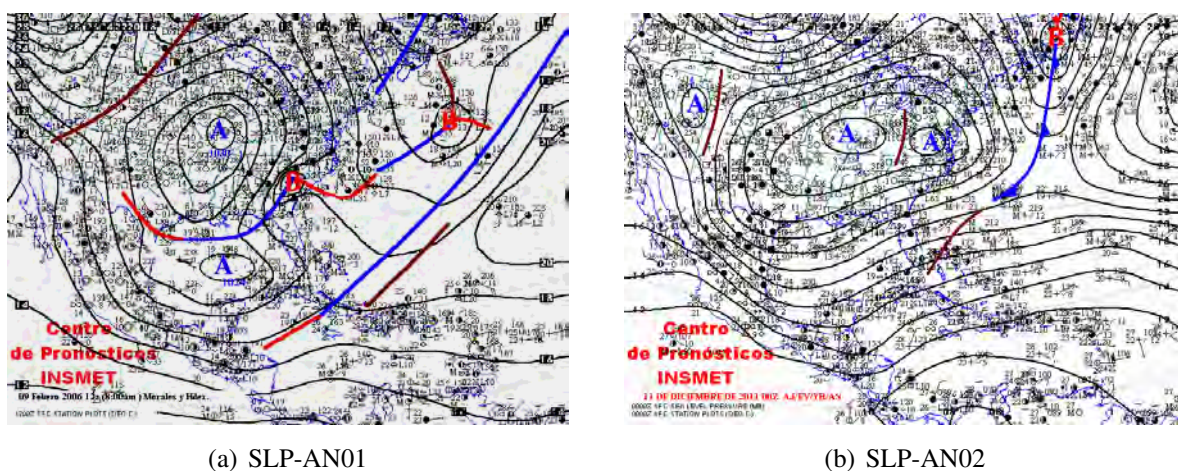
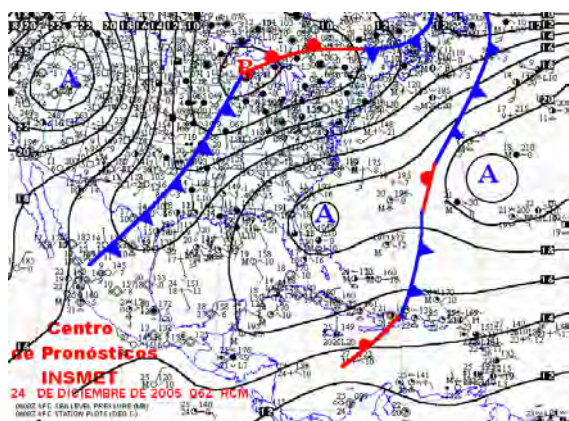


Figura 3-5: Mapas sinópticos característicos de los patrones sinópticos a) SLP-AN01 y b) SLP-AN02. Fuente: INSMET, Cuba.

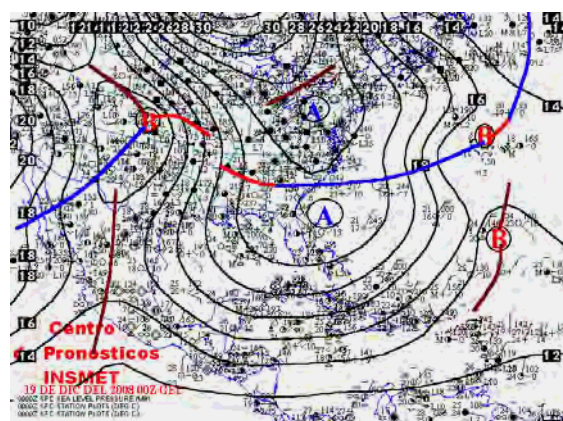
SLP-AN01: Este patrón sinóptico es característico del período seco (99 % de los casos), del trimestre DEF (83 % de los casos), donde es más frecuente encontrarlo en el mes de enero (37 % de los casos). La situación sinóptica general que representa este patrón (ver Fig.3.49(c)) está caracterizada por la presencia de un anticiclón de origen continental migratorio sobre el centro de EE.UU. y Canadá (en lo adelante se hará referencia a esta región como “continente norteamericano”), el cual se va desplazando hacia latitudes bajas y puede llegar a ubicarse sobre la Península de la Florida, Golfo de México, Cuba y demás islas de las Antillas Mayores. Se presenta, además, una baja extratropical sobre la costa oriental del continente norteamericano con desplazamiento hacia altas latitudes. Otra baja extratropical se presenta con marcada frecuencia sobre la región noroeste (NW, por siglas en inglés) de México (no se muestra en la Fig.3.49(c)). Estas bajas extratropicales traen asociados sistemas frontales, frentes fríos o estacionarios, que atraviesan la región sur del continente americano, Golfo de México y Cuba. El movimiento de estos sistemas frontales está condicionado al desplazamiento del anticiclón de origen continental migratorio y de las bajas extratropicales anteriormente mencionadas. Sobre el centro de México predominan las altas presiones debido al gradiente bórico generado por la separación entre el anticiclón de origen continental migratorio y las bajas extratropicales, razón por la cual las anomalías estandarizadas de este clúster tienen valores altamente positivos. El comportamiento de la temperatura se ve influenciado

por el paso de los sistemas frontales, por lo que sus valores de anomalías estandarizadas se encuentran altos y moderadamente positivos, observándose un gradiente que describe una configuración lineal, similar a los sistemas frontales.

SLP-AN02: Este patrón sinóptico se presenta en el período seco (95 % de los casos), durante los trimestres DEF, MAM y SON, aunque con una mayor frecuencia en el trimestre DEF con el 70 % de los casos, fundamentalmente en los meses de enero (30 % de los casos) y diciembre (26 % de los casos). En este patrón sinóptico persiste la influencia de anticiclones de origen continental migratorio provenientes de altas latitudes (ver Fig.3.49(d)), pero ubicados sobre la región oriental del continente americano, cuya configuración bórica es bastante desarrollada y logra extenderse hasta el territorio mexicano. Se continúan observando sistemas frontales sobre la región, pero fundamentalmente en fase de disipación sobre el norte de Cuba y La Española. Se pueden también presentar dos anticiclones de origen continental migratorio, el ubicado sobre la costa oriental del continente norteamericano ya mencionado y otro sobre la costa centro-oeste de dicha región. Debido a la presencia de uno o más anticiclones de origen continental migratorio, se pueden generar bajas de desprendimiento sobre el territorio mexicano que pueden generar sistemas frontales de corta duración. Como consecuencia de la descripción anterior, sobre el centro de México predominan vientos del SE debido a la influencia del anticiclón de origen continental migratorio sobre la costa oriental del continente americano, que pueden también presentarse del N-NE de acuerdo a la extensión de otro anticiclón de origen continental migratorio sobre el oeste del continente americano. La temperatura en superficie, durante este clúster, presenta valores moderados y altamente negativos de anomalías estandarizadas.



(a) SLP-AN03



(b) SLP-AN04

Figura 3-6: Mapas sinópticos característicos de los patrones sinópticos a) SLP-AN03 y b) SLP-AN04. Fuente: INSMET, Cuba.

SLP-AN03: Patrón sinóptico que tiene su mayor frecuencia de ocurrencia en el período seco (91 % de los casos) durante los trimestres DEF y MAM (47 % y 33 %, respectivamente), aunque se pue-

de encontrar con porcentajes de frecuencia similares en cualquier mes del período seco. Durante este patrón sinóptico persiste la influencia de anticiclones de origen continental migratorio provenientes de latitudes altas desplazándose hasta la región tropical (ver Fig.3.6(a)). Por lo general, estos anticiclones de origen continental migratorio se encuentran ubicados al oeste del continente americano y pueden trasladarse hasta la costa oriental de Estados Unidos y el norte de las Antillas Mayores. Se pueden desarrollar bajas extratropicales al suroeste (SW, por sus siglas en inglés) del continente americano y NW de México debido al movimiento de estos anticiclones (no se observa en la Fig.3.6(a)). Por otra parte, en la región del Atlántico Norte comienza a observarse un comportamiento más desarrollado del Anticiclón Subtropical del Atlántico Norte (NASH, por sus siglas en inglés), lo cual produce valores más cercanos a la media climatológica en dicha región. Sobre el centro de México predomina un débil gradiente bórico debido a la separación entre la baja extratropical ubicada al NW de México y la posición de los anticiclones de origen continental migratorio. Las temperaturas en superficie, como en otros patrones del período seco, tienen valores altos y moderadamente negativos de anomalías estandarizadas.

SLP-AN04: Este patrón sinóptico es característico del período seco (89 % de los casos), principalmente en los meses de marzo y abril dentro del trimestre MAM (49 % de los casos), aunque también es característico en el trimestre DEF (34 % de los casos). Durante este patrón sinóptico es notable la presencia de una baja extratropical sobre la región norte y centro-norte de México (ver Fig.3.6(b)), que se va desplazando hacia el NE del continente americano debido al movimiento de los anticiclones de origen continental migratorio que aún persisten en el fin del período invernal. Estos anticiclones de origen continental migratorio se encuentran ubicados, por lo general, sobre el oeste del continente americano y sobre el SE de los Estados Unidos. Durante el desplazamiento al NE de la baja extratropical, se forman sistemas frontales cuya trayectoria depende de la posición de los anticiclones de origen continental migratorio. Se presentan anomalías estandarizadas negativas en el campo de la temperatura sobre la región central de México, que van desde altas hasta ligeramente negativas. Sobre el centro de México, como fue mencionado anteriormente, se presenta la influencia de la baja extratropical que, independientemente de ser un centro de bajas presiones, sus anomalías estandarizadas presentan valores moderadamente negativos de SLP.

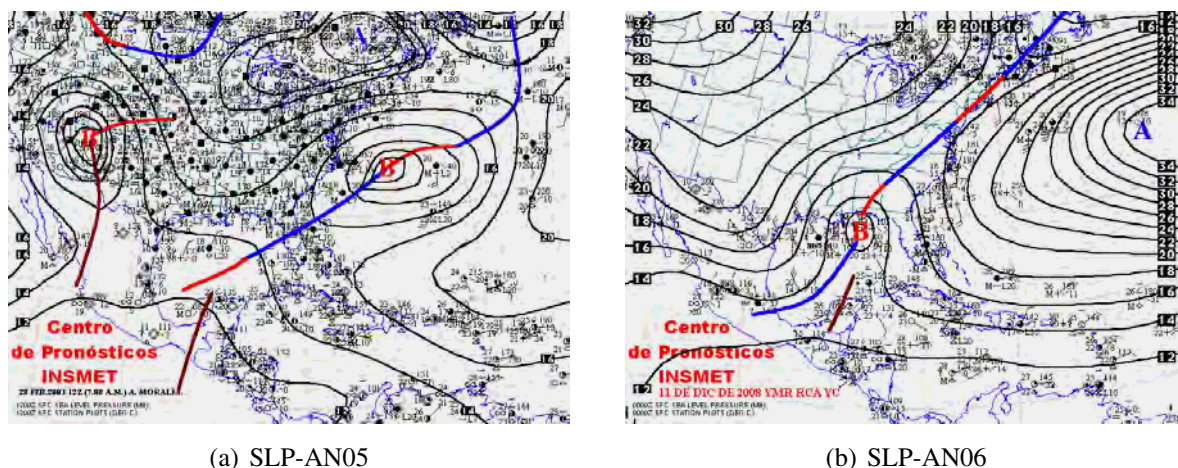


Figura 3-7: Mapas sinópticos característicos de los patrones sinópticos a) SLP-AN05 y b) SLP-AN06. Fuente: INSMET, Cuba.

SLP-AN05: Este patrón sinóptico se presenta mayormente dentro del período seco con un 93 % de ocurrencia y durante los meses de los trimestres DEF y MAM (51 % y 34 %, respectivamente), principalmente en los meses de marzo y diciembre. Se observa una baja extratropical bien desarrollada cerca de la Península de Nueva Escocia (ver Fig.3.7(a)), de la cual se desprenden sistemas frontales bien desarrollados sobre toda la costa oriental del continente americano. Se presentan bajas extratropicales sobre la región central de México y/o sobre el Golfo de México que se van desplazando al NE hasta adentrarse en la región central del continente americano. De estas bajas extratropicales se forman frentes fríos que pueden unirse a los formados por la baja extratropical sobre la Península de Nueva Escocia, de modo que se puedan presentar sistemas frontales estacionarios con una extensa configuración meridional. En la región del Atlántico Norte se presenta un comportamiento cada vez más desarrollado del NASH, fundamentalmente durante los meses de transición entre el período seco y el húmedo. En la región central de México predomina la influencia de la baja extratropical y la formación de sistemas frontales. Estos sistemas frontales provocan valores altamente negativos en las anomalías estandarizadas de S2T.

SLP-AN06: Patrón sinóptico característico del período seco (99 % de los casos) que se presenta mayormente en los meses del trimestre DEF (78 % de los casos), aunque no se puede despreciar su presencia en el trimestre MAM, fundamentalmente en el mes de marzo (12 % de los casos). Durante este patrón sinóptico se presenta una baja extratropical sobre el Golfo de México que se va desplazando por la llegada de anticiclones de origen continental migratorio al SW del continente americano (ver Fig.3.7(b)). Se observa también la presencia de anticiclones de origen continental migratorio sobre la región noroccidental del continente americano (no se observa su centro en la Fig.3.7(b)) y otro sobre la región del Atlántico Norte, de manera que la dirección del movimiento de la baja extratropical se presenta dentro del espacio que separa dichos anticiclones. Se forman sistemas frontales, poco desarrollados por lo general, asociados a esta baja extratropical y el mo-

vimiento de éstos presenta igual dirección que la misma. Asociados a esta baja extratropical se presentan vientos del N-NW sobre la región central de México que contribuyen a la presencia de valores moderadamente negativos de anomalías estandarizadas en el campo de la temperatura.

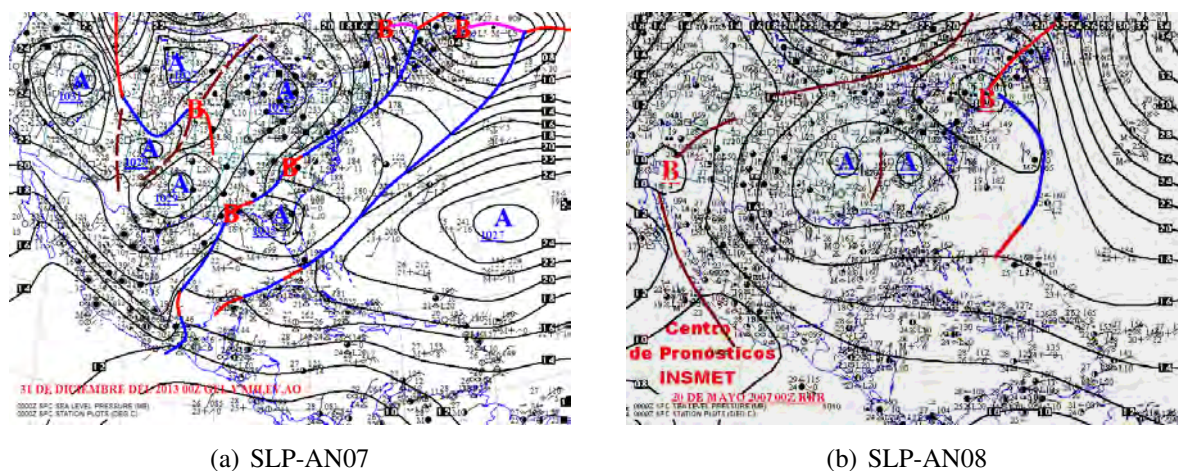


Figura 3-8: Mapas sinópticos característicos de los patrones sinópticos a) SLP-AN07 y b) SLP-AN08. Fuente: INSMET, Cuba.

SLP-AN07: Este patrón sinóptico se presenta en los meses del período seco (95 % de los casos) fundamentalmente en el trimestre DEF con el 54 % de los casos, aunque también es importante su presencia en el trimestre MAM durante el mes de marzo. La situación sinóptica general que describe es la presencia de sistemas frontales sobre la región central de México, relacionados con la presencia de bajas extratropicales sobre el centro-sur del continente americano. Estos sistemas frontales se encuentran asociados también, en ocasiones, por bajas extratropicales sobre el Golfo de México. Debido a la extensión de la baja extratropical sobre el centro-sur del continente, se pueden observar bien extendidos dichos sistemas frontales desde latitudes medias hasta el centro de México. Persiste el desplazamiento de anticiclones de origen continental migratorio sobre la región de estudio, pero esta vez ubicados principalmente al SE del continente americano y sobre la Península de la Florida. De esta forma, sobre el centro de México predomina la influencia de sistemas frontales, lo que conlleva a la presencia de anomalías estandarizadas altamente negativas de S2T.

Es importante aclarar que en los siguientes patrones, del SLP-AN08 al SLP-AN15, se presentan condiciones típicas de los trimestres de transición entre los períodos seco y húmedo que son MAM y SON. Debido a que en estos patrones las anomalías estandarizadas se encuentran entre el rango de ligeramente positivas y ligeramente negativas, por lo tanto son cercanos a la media climatológica en los valores de SLP. El algoritmo mostró deficiencias en la detección de dichos patrones. Por ejemplo, el algoritmo no logra diferenciar entre anticiclones de origen continental migratorio característicos de la etapa invernal y la presencia del NASH próximo al continente americano.

Al ser un lenguaje de inteligencia artificial no supervisado sin consideraciones físicas, no puede distinguir estos dos fenómenos sinópticos debido a sus configuraciones isobáricas similares. De la misma forma ocurre con la detección entre centros de bajas presiones típicos del período húmedo y las bajas extratropicales típicas del período seco. En estos meses, por ser de transición, pueden coexistir ambos fenómenos indistintamente. Este problema del algoritmo se logra corregir a partir de un análisis sinóptico realizado con métodos subjetivos llevado a cabo por meteorólogos, mediante el reconocimiento de patrones en los mapas sinópticos de altitud y superficie. Esta deficiencia del método SOM podrá ser resuelta removiendo la media anual en el cálculo de las anomalías estandarizadas, utilizando la media de los valores en escalas temporales menores como períodos, trimestres, meses, etc.

SLP-AN08: Este patrón sinóptico se presenta en ambos períodos del año, seco y húmedo, aunque es más frecuente encontrarlo en el período seco (68 % de los casos). Esto se debe a que se presenta en mayor medida durante los meses del trimestre MAM que constituye la transición entre ambos períodos, lo cual se comprueba al presentar su mayor frecuencia en abril y mayo (35 % y 30 %, respectivamente). De esta forma, este patrón sinóptico es bastante dinámico en su comportamiento debido al desplazamiento y movimiento relativo entre altas y bajas presiones en superficie (ver Fig.3.8(b)). Se evidencia un desplazamiento al norte de los centros de las bajas extratropicales en una relación de alternancia con el movimiento de anticiclones de origen continental migratorio que continúan desplazándose hasta latitudes bajas. La posición típica de los anticiclones de origen continental migratorio se presenta sobre el centro y centro-sur del continente americano, por lo que su configuración bérica se extiende hasta el Golfo de México y la costa oriental del territorio mexicano. Sobre el NW de México comienza a observarse un centro de bajas presiones. Sobre el centro de México se presenta circulación de vientos del S-SE y del SW, provenientes del Golfo de México y del Océano Pacífico que son importantes reservorios de humedad para el comienzo del período húmedo. La temperatura en superficie presenta valores de anomalías estandarizadas moderadas y altamente negativas sobre el centro de México. Este patrón sinóptico presenta anomalías estandarizadas ligeramente positivas de SLP, lo cual es típico en meses de transición en comparación con valores más extremos en invierno y verano.

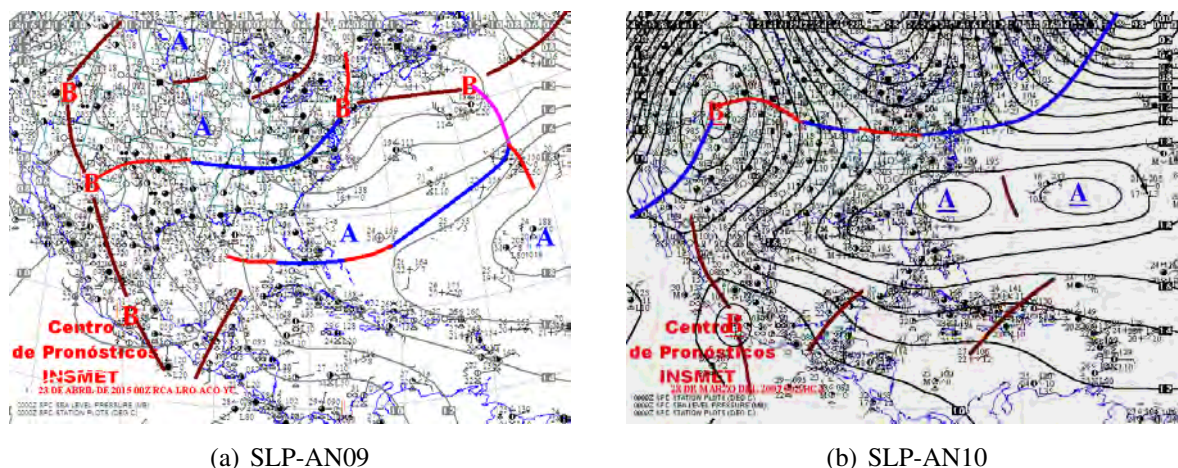
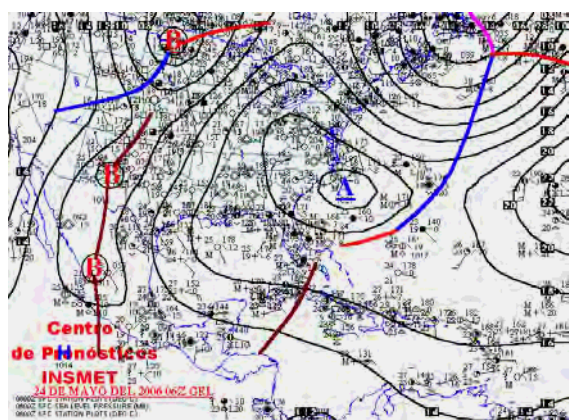


Figura 3-9: Mapas sinópticos característicos de los patrones sinópticos a) SLP-AN09 y b) SLP-AN10. Fuente: INSMET, Cuba.

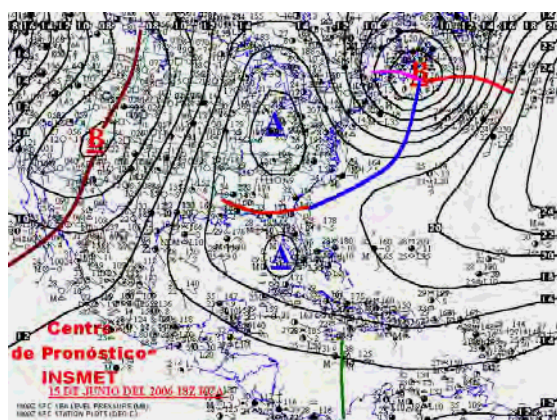
SLP-AN09: Patrón sinóptico que se presenta en ambos períodos del año, seco y húmedo. Su distribución en escalas temporales menores es similar a la del patrón SLP-AN08, con la diferencia de que en SLP-AN09 su presencia es mayor en el trimestre MAM (91 % de los casos). Este patrón representa condiciones típicas de la transición entre el período seco y el período húmedo. Comienza a observar el desplazamiento hacia el sur del NASH y el fortalecimiento del centro de bajas presiones sobre la región NW de México (ver Fig.3.9(a)). Sobre el territorio mexicano se observan bajas presiones asociadas a bajas extratropicales que van desplazándose al N-NE como parte del fin del período invernal. Sobre el centro de México se presenta una hondonada en superficie que se forma por la configuración extendida del centro de bajas presiones sobre el NW de México. En este patrón, similar al SLP-AN08, se presentan anomalías estandarizadas ligeramente positivas de SLP sobre el centro de México y valores moderados y altamente negativos de S2T.

SLP-AN10: Este patrón sinóptico ha sido detectado en ambos períodos del año, aunque con una mayor frecuencia de ocurrencia en el período seco que en el lluvioso (76 % y 24 %, respectivamente). Se puede presentar en trimestres como MAM, DEF y SON, siendo el trimestre MAM el que presenta mayor frecuencia de ocurrencia (51 % de los casos) siendo en los meses de abril y noviembre donde más se detecta (24 % y 15 %, respectivamente). Debido a lo antes mencionado, las anomalías estandarizadas de SLP presentan valores cercanos a cero, lo cual muestra que los valores de SLP son cercanos a la media histórica climatológica. Se presentan bajas presiones sobre todo el territorio mexicano (ver Fig.3.9(b)), destacándose algunos centros de bajas presiones, principalmente sobre el oeste del continente. Por otra parte, se presentan altas presiones sobre la costa este y centro de los EE.UU, que se deben a la presencia de anticiclones de origen continental migratorio y/o a la presencia del NASH cercano al continente americano. Como ya fue explicado anteriormente, esta es una deficiencia del algoritmo. Sobre el Mar Caribe y en el Atlántico Norte Tropical predominan las bajas presiones, que en los meses de verano permiten el desarrollo de

ciclones tropicales. Sobre el centro de México, como en el resto del territorio mexicano, predomina la presencia de centros de bajas presiones. Las anomalías estandarizadas de S2T presentan un comportamiento muy variado, pues presentan valores desde positivos hasta negativos, aunque por los general son moderadamente negativos.



(a) SLP-AN11



(b) SLP-AN12

Figura 3-10: Mapas sinópticos característicos de los patrones sinópticos a) SLP-AN11 y b) SLP-AN12. Fuente: INSMET, Cuba.

SLP-AN11: Patrón sinóptico que se presenta en ambos períodos del año, lluvioso y seco, aunque es más frecuente en el período húmedo (67 % de los casos). Su distribución por trimestres es bastante heterogénea, aunque es más probable encontrarlo en los trimestres MAM, JJA y SON (40 %, 30 % y 18 %, respectivamente), principalmente en los meses de mayo y junio. Durante este patrón sinóptico predominan las bajas presiones sobre el territorio mexicano (ver Fig.3.10(a)). Debido a la limitación del algoritmo, se agrupan en este patrón tanto el centro de bajas presiones sobre el NW de México como la presencia de bajas extratropicales sobre dicha región, lo que se puede validar con la distribución del patrón en varios meses del año. Sobre el continente americano predominan las altas presiones y, por lo general, centros de altas presiones que se mueven en dirección sur, aunque no se encuentran tan desarrollados en comparación con los patrones del período invernal. Se observa el NASH más desarrollado y más bajo en latitud sobre el centro del Atlántico Norte en comparación con los patrones SLP-AN01 al SLP-AN10. En la región del Mar Caribe comienzan a observarse ondas del este que pueden atravesar la parte sur del territorio mexicano, razón por la cual se puede presentar ciclogénesis tropical sobre el Pacífico mexicano sur. Sobre el Golfo de México predominan centros de altas presiones, que pueden extenderse hasta la costa oriental de México, Cuba y la Península de la Florida. Por otra parte, sobre el centro de México se observa la influencia de una hondonada en superficie proveniente del centro de bajas presiones ubicado sobre el NW de México. Las anomalías estandarizadas de S2T presentan valores moderadamente negativos de modo general.

SLP-AN12: Este patrón sinóptico es característico del período húmedo (84 % de los casos), principalmente en los meses de abril a julio, dentro de los trimestres MAM y JJA, teniendo su mayor presencia en el mes de junio (35 % de los casos). La situación sinóptica presente en este patrón se muestra como la influencia del NASH bien desarrollado y extendido desde latitudes medias sobre el Atlántico Norte hasta las regiones del Mar Caribe, Antillas Mayores, Golfo de México y su región periférica puede llegar hasta el territorio mexicano (ver Fig.3.10(b)). También se observan otros pequeños centros de altas presiones en la región periférica de la configuración isobárica del NASH. Se presenta un centro de bajas presiones sobre el NW de México, producto del contraste térmico océano-continente. Sobre la parte oriental del Mar Caribe se observa el avance de ondas del este, pero su movimiento no suele llegar hasta México y América Central. Sobre el centro de México predominan las altas presiones debido a la influencia del NASH sobre casi toda la región tropical. Los valores de anomalías estandarizadas de S2T se encuentran entre ligeramente negativos y moderadamente positivos, mostrando que sus valores de S2T no se encuentran alejados de la media climatológica.

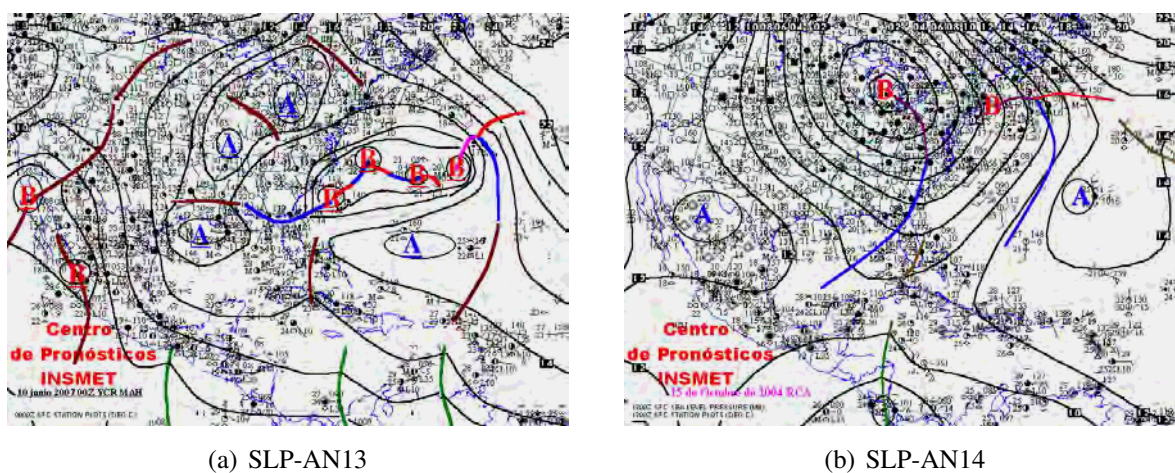
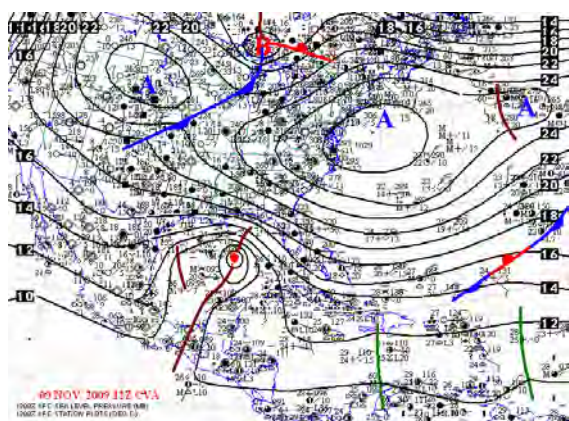


Figura 3-11: Mapas sinópticos característicos de los patrones sinópticos a)SLP-AN13 y b)SLP-AN14. Fuente: INSMET, Cuba.

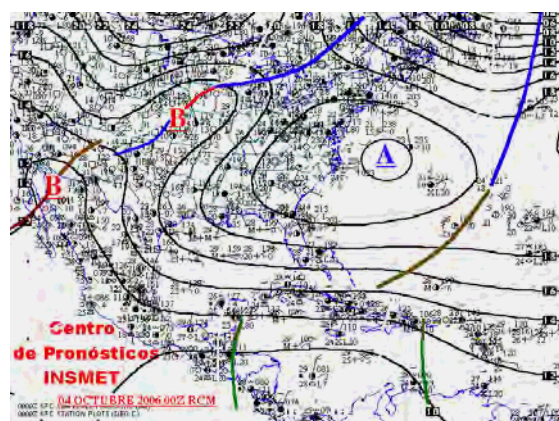
SLP-AN13: Este patrón sinóptico es característico del período húmedo (91 % de los casos), al presentarse en los trimestres MAM y JJA (43 % y 51 %, respectivamente), principalmente en mayo (35 %) y junio (39 %). Durante este patrón sinóptico se presentan centros de bajas presiones bien desarrollados sobre el Mar Caribe occidental, SW y NE de EE.UU. y sobre todo el territorio mexicano, principalmente sobre la Península de Baja California en la región NW (ver Fig.3.11(a)). Además, sobre la región del Mar Caribe se presentan ondas del este debido a la formación de vaguadas en la configuración isobárica de la periferia del NASH, el cual se encuentra bien desarrollado sobre la región. Por lo tanto, sobre la región central de México se presentan centros de bajas presiones como en el resto del territorio mexicano. En el campo de la temperatura se presentan valores más altos de anomalías estandarizadas con respecto a los patrones anteriores, aunque

continúan en el rango de ligeras y moderadamente negativas.

SLP-AN14: Patrón sinóptico que es característico del período húmedo (91 % de los casos) y se encuentra distribuido de manera heterogénea en los trimestres MAM, JJA y SON, aunque de manera más característica en el trimestre SON con el 51 % de los casos. Su comportamiento mensual es bastante variado dentro de los meses del período húmedo, pero el mayor porcentaje de ocurrencia se encuentra en octubre con el 31 % de los casos. Este patrón sinóptico representa la transición del período húmedo y seco, donde pueden observarse condiciones sinópticas híbridas. Comienza a observarse el desarrollo de la baja extratropical sobre la Península de Nueva Escocia, de la cual se pueden formar algunos sistemas frontales poco desarrollados que se extienden sobre la región oriental del continente americano (ver Fig.3.11(b)). Por otra parte, sobre el Mar Caribe se observa el débil avance de ondas del este, que pueden llegar a América Central, pero la mayoría de ellas pierde se disipan sobre el Mar Caribe central. Sobre la región SW de EE.UU. y NW de México se presentan centros de altas presiones que se extienden sobre toda esa región geográfica. Por su parte, sobre la región central de México predomina un débil gradiente de presión debido a la separación entre las altas presiones del NW de México y las altas presiones del Mar Caribe y Golfo de México, lo cual produce pequeños centros de bajas presiones que se encuentran afectados por la orografía de la región. Durante este patrón se presentan anomalías estandarizadas altamente positivas de S2T en el centro de México.



(a) SLP-AN15



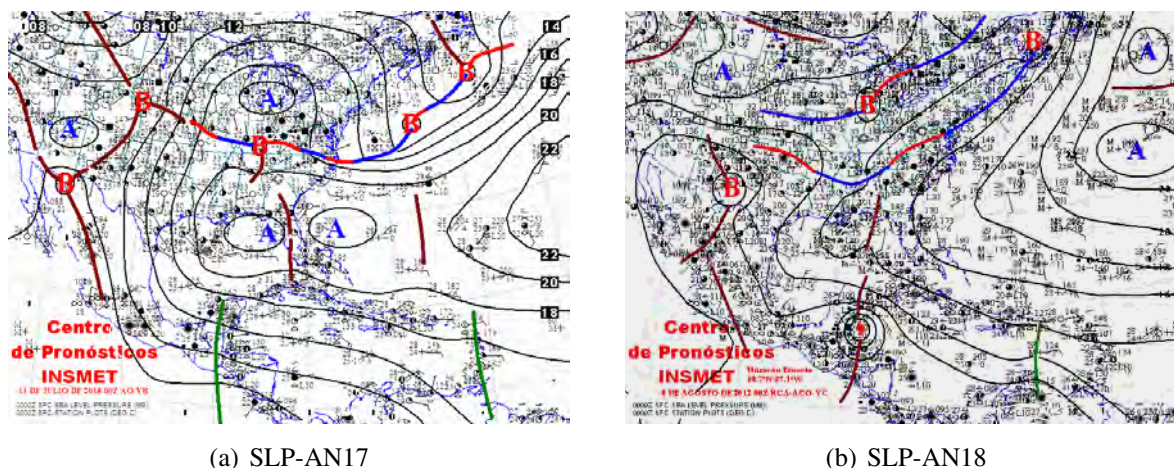
(b) SLP-AN16

Figura 3-12: Mapas sinópticos característicos de los patrones sinópticos a)SLP-AN15 y b)SLP-AN16. Fuente: INSMET, Cuba.

SLP-AN15: Este patrón sinóptico es característico de la transición entre el período húmedo y seco (40 % y 60 %, respectivamente), principalmente durante los meses de octubre (30 %) y noviembre (43 %) dentro del trimestre SON con el 79 % de su frecuencia de ocurrencia. De esta forma, este clúster también representa condiciones sinópticas híbridas. La situación sinóptica que describe este patrón es el comienzo de la influencia de anticiclones de origen continental migratorio con su

configuración isobárica extendida sobre el continente americano, Golfo de México y centro y norte del territorio mexicano (ver Fig.3.12(a)). Por lo general, el centro de estos anticiclones de origen continental migratorio se ubican sobre el oeste de los EE.UU. Se comienza a observar también la llegada de algunos sistemas frontales sobre el Golfo de México y que se extiende por el centro del continente americano, aunque no son muy desarrollados. Por otra parte, se observa ciclogénesis tropical sobre la región del Atlántico, estos coinciden con los ciclones tropicales próximos al fin de la temporada ciclónica en la cuenca del Atlántico (1 de junio al 30 de noviembre). Debido a la distancia entre las isobaras en la región periférica de los anticiclones de origen continental migratorio anteriormente mencionados, se pueden formar pequeños centros de bajas presiones sobre la región central de México. En dicha región, los valores de anomalías estandarizadas de temperatura se presentan moderadamente altos.

SLP-AN16: Patrón sinóptico característico del período húmedo con el 100 % de los casos, con su mayor ocurrencia en los meses del trimestre JJA (86 % de los casos), principalmente en el mes de julio con un 40 % de ocurrencia. Este patrón es característico de los meses estivales, por lo que se presenta la influencia del NASH bien desarrollado sobre latitudes tropicales y su configuración isobárica se extiende hasta el Golfo de México y el territorio mexicano (ver Fig.3.12(b)). También se presenta, de forma bien desarrollada, el centro de bajas presiones ubicado sobre el NW de México, más extendido de forma que abarca la Península de Baja California y parte del SW de los EE.UU. Es común que se presente también un centro de altas presiones sobre el Golfo de México, por el cierre de las isobaras en la periferia del NASH. Es bastante frecuente la formación de ciclones tropicales sobre el Arco de las Antillas y Antillas Mayores. Sobre el centro de México se observa una hondonada en superficie que se extiende desde el centro de bajas presiones. Los valores de anomalías estandarizadas de S2T son altamente positivos, lo cual es típico de los meses estivales.



(a) SLP-AN17

(b) SLP-AN18

Figura 3-13: Mapas sinópticos característicos de los patrones sinópticos a) SLP-AN17 y b) SLP-AN18. Fuente: INSMET, Cuba.

SLP-AN17: Este patrón sinóptico es característico del período húmedo al presentarse el 100 % de sus casos en él. Es característico, además del trimestre JJA (92 % de los casos) presentando condiciones típicas de verano, principalmente del mes de julio con el 42 % de su frecuencia de ocurrencia. Se representa durante este patrón sinóptico un frecuente movimiento de ondas del este por la región del Atlántico tropical, Mar Caribe y pueden llegar al sur de México y parte norte de América Central (ver Fig.3.13(a)); siendo común la ciclogénesis tropical sobre dichas áreas. Debido al paso de las ondas del este, es común encontrar hondonadas en superficie en toda la región, lo cual favorece la convección y el transporte de humedad en la región. Sobre el NW de México y Península de Baja California persiste un centro de bajas presiones que pudiera estar relacionado con el contraste térmico océano-continente. El NASH se encuentra en un amplio desarrollo sobre el Atlántico Norte, más bajo en latitud, lo cual modula el movimiento de las ondas del este y, posiblemente, las trayectorias de los ciclones tropicales que logran formarse. Por su parte, sobre el centro de México predomina la circulación de vientos del SE en superficie debido a la región periférica del NASH y el paso de las ondas del este por el sur del territorio mexicano. En el campo de temperatura en superficie se presentan valores moderados y altamente positivos en sus anomalías estandarizadas, lo cual es típico de los meses de verano donde es mayor la incidencia de radiación solar y las bajas presiones atmosféricas.

SLP-AN18: Patrón sinóptico característico del período húmedo (99 % de los casos), que se puede encontrar en los meses de los trimestres JJA y SON (71 % y 27 %, respectivamente), principalmente durante el mes de agosto con un 37 % de frecuencia. Es común encontrar, durante este patrón sinóptico, bajas presiones sobre todo el territorio mexicano, Golfo de México y Mar Caribe (ver Fig.3.13(b)). Se observa una fuerte ciclogénesis y formación de centros de bajas presiones sobre dichas áreas, donde las trayectorias más probables atraviesan el Arco de las Antillas, las Antillas Mayores, Mar Caribe Occidental y Golfo de México. Debido a estas áreas de bajas presiones, es

común observar ondas del este por el Atlántico y Mar Caribe, pero no es frecuente que lleguen hasta América Central y sur de México. Sobre la región central de México se presentan bajas presiones y una hondonada en superficie que se forma por el acoplamiento de la dorsal anticiclónica del NASH con la vaguada que se extiende del centro de bajas presiones sobre el NW de México. Los valores de anomalías estandarizadas de S2T, al igual que el resto de los patrones en los meses estivales, se encuentran en el rango de alta y moderadamente positivos.

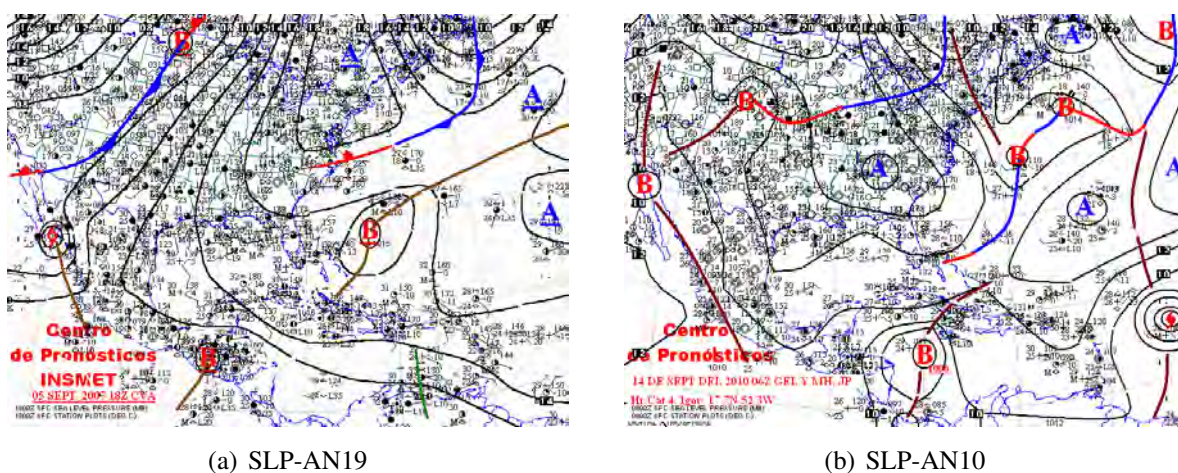


Figura 3-14: Mapas sinópticos característicos de los patrones sinópticos a)SLP-AN19 y b)SLP-AN20. Fuente: INSMET, Cuba.

SLP-AN19: Este patrón sinóptico se presenta durante los meses del período húmedo (98 % de los casos), principalmente durante los trimestres SON y JJA (65 % y 34 %, respectivamente) con una mayor frecuencia de ocurrencia en el mes de septiembre con el 50 % de los casos. Durante este patrón se presentan condiciones típicas del fin del período estival y el comienzo de la transición al período invernal. Persiste la influencia del NASH sobre la región del Atlántico Tropical, norte del Mar Caribe y Golfo de México (ver Fig.3.14(a)), pero con su centro más ubicado sobre las Bermudas, próximo a la costa oriental del continente americano (no se observa en detalle en este mapa). Se continúa observando la presencia del centro de bajas presiones sobre el NW de México y el movimiento de ondas del este sobre el Mar Caribe, pero estas últimas con menos frecuencia que durante otros patrones. Es importante destacar durante este patrón sinóptico se observa un alto desarrollo de ciclogénesis en el Pacífico Mexicano, principalmente sobre la costa noroccidental, cerca de los estados de Jalisco, Nayarit, Sinaloa y el Golfo de California. Sobre el centro de México predomina un débil gradiente bórico debido al ensanchamiento de las isobaras del NASH en su región periférica. Las temperaturas en superficie presentan valores altamente positivos de anomalías estandarizadas.

SLP-AN20: Patrón sinóptico característico del período húmedo (83 % de los casos), durante los meses del trimestre SON (92 % de los casos) principalmente en octubre con el 49 % de su fre-

cuencia de ocurrencia. Este patrón sinóptico, similar al patrón SLP-AN19, representa condiciones típicas de la transición del fin del período estival y el comienzo de la transición al período invernal. Persiste la influencia del NASH sobre la región, pero también se comienza a observar la llegada de anticiclones de origen continental migratorio al continente americano por la cercanía del período invernal (ver Fig.3.14(b)). En este patrón, como en otros de transición entre los períodos seco (húmedo) y húmedo (seco), se presenta la deficiencia del algoritmo del método SOMs para reconocer patrones con configuraciones isobáricas similares. También es importante destacar el desplazamiento al norte del NASH, lo cual es típico en la transición a los meses invernales. Se presenta ciclogénesis tropical en la cuenca del Atlántico, que puede estar relacionada con las condiciones cálidas presentes en el océano y por la acumulación de energía solar recibida durante los meses de verano. Persiste la presencia del centro de bajas presiones sobre el NW de México. Sobre el centro de México se observa un débil gradiente bórico y en ocasiones una hondonada por la extensión del centro de bajas presiones ubicado al NW del territorio mexicano.

3.2. Patrones sinópticos anuales en diferentes niveles de altitud sobre la región central de México

3.2.1. Comportamiento de frecuencia de los patrones sinópticos de altura geopotencial en diferentes niveles de presión.

Los patrones sinópticos de altura geopotencial en el nivel de 500 hPa, obtenidos mediante el método SOM, se presentan en la Fig.3-15.

El análisis de las anomalías estandarizadas de los clústeres de altura geopotencial en el nivel de 500 (G500, en lo adelante) muestra que la distribución del rango de valores es bastante heterogénea aunque abarca desde valores altamente negativos hasta altamente positivos (ver cuadro 3-9). Sin embargo, el algoritmo del método SOM fue capaz de detectar la estacionalidad de los clústeres en los períodos seco y húmedo (ver cuadro 3-10). Siguiendo el criterio de selección acordado, de modo que la frecuencia de ocurrencia sea mayor o igual al 80 % de los casos, se puede ver que muchos de los patrones responden a este criterio. Por ejemplo, G500-AN01, G500-AN02, G500-AN06, G500-AN07, G500-AN11, G500-AN12, G500-AN16 y G500-AN17 son característicos del período seco, con valores de anomalías estandarizadas moderados y altamente negativos. Por otra parte, los clústeres G500-AN04, G500-AN05, G500-AN09, G500-AN10, G500-AN14, G500-AN15, G500-AN19 y G500-AN20 son característicos del período húmedo y sus anomalías estandarizadas son altamente y moderadamente positivas, aunque G500-AN04 presenta valores ligeramente positivos. Otros clústeres como G500-AN03, G500-AN08, G500-AN13 y G500-AN18 se pueden presentar en cualquier período, indistintamente, y sus valores de anomalías estandarizadas se encuentran entre el rango de ligeramente positivas y negativas. Estos clústeres, que no presen-

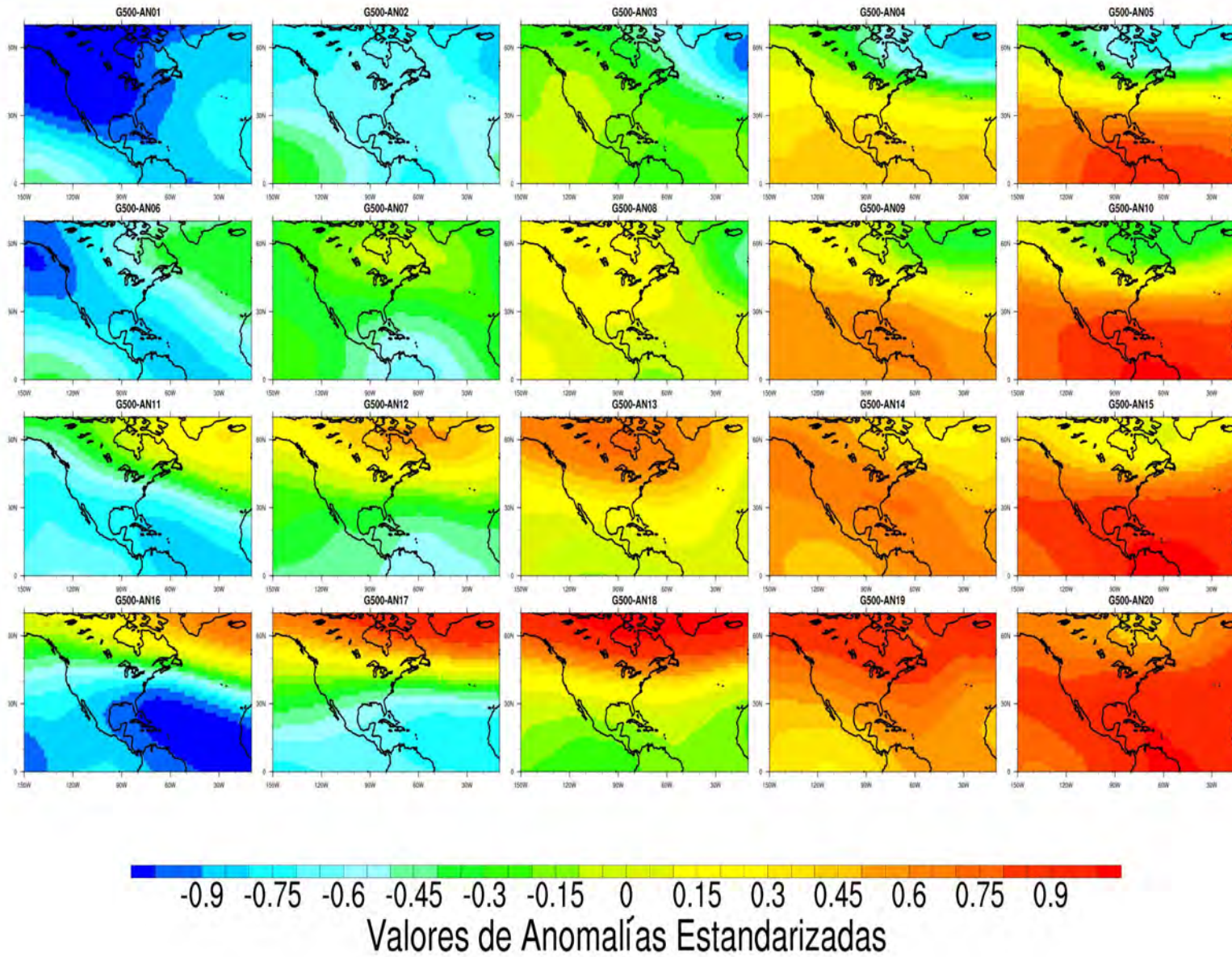


Figura 3-15: Clústeres generados a partir de los valores de anomalías estandarizadas de altura geopotencial en 500 hPa, obtenidos mediante el método SOM.

tan una estacionalidad bien definida, presentan valores de altura geopotencial cercanos a la media climatológica en el año.

Cuadro 3-9: Comportamiento de los valores de anomalías estandarizadas de los clústeres de G500

Patrón sinóptico	Valor de Anomalía Estandarizada	Patrón sinóptico	Valor de Anomalía Estandarizada
G500-AN01	-1 a -0.75	G500-AN11	-0.85 a -0.75
G500-AN02	-0.65 a -0.55	G500-AN12	-0.45 a -0.3
G500-AN03	-0.2 a -0.05	G500-AN13	0 a 0.15
G500-AN04	0.35 a 0.5	G500-AN14	0.5 a 0.65
G500-AN05	0.4 a 0.8	G500-AN15	0.85 a 1
G500-AN06	-0.85 a -0.75	G500-AN16	-1 a -0.8
G500-AN07	-0.55 a -0.3	G500-AN17	-0.7 a -0.5
G500-AN08	0 a 0.1	G500-AN18	-0.3 a 0
G500-AN09	0.5 a 1	G500-AN19	0.4 a 0.6
G500-AN10	0.7 a 0.95	G500-AN20	0.9 a 1

Cuadro 3-10: Comportamiento por periodos y trimestres de los patrones de G500, expresado en valores porcentuales.

Patrones G500	Periodos		Trimestres			
	Seco	Humedo	MAM	JJA	SON	DEF
G500-AN01	0	100	11	0	0	89
G500-AN02	2	98	35	0	19	46
G500-AN03	32	68	30	0	68	2
G500-AN04	100	0	9	5	86	0
G500-AN05	100	0	0	77	23	0
G500-AN06	0	100	14	0	2	84
G500-AN07	0	100	23	0	38	39
G500-AN08	54	46	20	0	80	0
G500-AN09	100	0	8	12	80	0
G500-AN10	100	0	0	86	14	0
G500-AN11	0	100	22	0	2	76
G500-AN12	1	99	49	0	24	27
G500-AN13	70	30	58	0	42	0
G500-AN14	100	0	21	34	45	0
G500-AN15	100	0	0	90	10	0
G500-AN16	0	100	37	0	1	62
G500-AN17	0		68	0	2	28
G500-AN18	56	44	92	0	8	1
G500-AN19	100	0	47	42	11	0
G500-AN20	100	0	0	90	10	0

Haciendo el análisis del comportamiento trimestral de estos clústeres de G500 (ver cuadro 3-10, se puede observar que los clústeres G500-AN01 y G500-AN06 son característicos del trimestre DEF por lo que sus valores de anomalías estandarizadas son altamente negativos, típico de los meses invernales. Los clústeres G500-AN10, G500-AN15 y G500-AN20 son típicos del trimestre JJA y, por ende de los meses invernales, por lo que sus valores de anomalías estandarizadas son altamente positivos. El trimestre MAM se encuentra representado mayormente por el clúster G500-AN18, mientras que el trimestre SON por los clústeres G500-AN04 y G500-AN08. Durante estos trimestres, MAM y SON, los valores de anomalías estandarizadas presentan valores ligeramente negativos y positivos, respectivamente; lo cual es típico de los meses de transición entre los períodos seco (húmedo) y húmedo (seco) con valores cercanos a la media climatológica. El resto de los clústeres se encuentran representados en dos trimestres del año, pero no son típicos de ninguno en específico; excepto los clústeres G500-AN07, G500-AN12 que se pueden encontrar en cualquier trimestre pero nunca en el trimestre JJA y el clúster G500-AN14 que nunca se observa

en el trimestre DEF.

Por su parte, en el nivel de altura de 700 hPa fueron obtenidos los siguientes patrones (ver Fig.3-16).

Se puede observar que el comportamiento de las anomalías estandarizadas de los valores de altura geopotencial en el nivel de 700 hPa sobre el centro de México (ver cuadro 3-12) presentan valores desde altamente negativos hasta altamente positivos; sin embargo la mayoría de los clústeres presentan valores ligeramente positivos y negativos. Haciendo un análisis de las distribución de estos clústeres en los períodos húmedo y seco, de acuerdo a sus valores de anomalías estandarizadas, mostró que durante el período húmedo se presentan valores positivos y para el período seco se presentaron los valores negativos. Los clústeres G700-AN01, G700-AN02, G700-AN06, G700-AN07, G700-AN11, G700-AN12, G700-AN16 y G700-AN17 son característicos de los meses del período seco con valores positivos de anomalías estandarizadas en todos los casos, excepto ligeramente negativo en el caso del clúster G700-AN02. Por su parte, los clústeres G700-AN04, G700-AN05, G700-AN09, G700-AN10, G700-AN14, G700-AN15, G700-AN19 y G700-AN20 son característicos del período húmedo y sus valores de anomalías estandarizadas se encuentran desde ligeros hasta altamente negativos. Otros clústeres como G700-AN03, G700-AN08, G700-AN13 y G700-AN18 no son característicos de algún período propiamente dicho, por lo que se presentan en todo el año. En el caso de estos clústeres, los valores de anomalías estandarizadas son ligeramente positivos y ligeramente negativos por lo que sus valores de altura geopotencial son muy cercanos a la media climatológica anual.

Cuadro 3-11: Comportamiento de los valores de anomalías estandarizadas en los clústeres de G700

Patrón sinóptico	Valor de Anomalía Estandarizada	Patrón sinóptico	Valor de Anomalía Estandarizada
G700-AN01	0.2 a 0.5	G700-AN11	0.7 a 0.9
G700-AN02	-0.3 a 0	G700-AN12	0.3 a 0.5
G700-AN03	-0.6 a -0.4	G700-AN13	0 a 0.2
G700-AN04	-1 a -0.8	G700-AN14	-0.3 a 0
G700-AN05	-1 a -0.9	G700-AN15	-0.5 a -0.2
G700-AN06	0.5 a 0.8	G700-AN16	0.8 a 1
G700-AN07	0.1 a 0.3	G700-AN17	0.4 a 0.5
G700-AN08	-0.1 a 0	G700-AN18	-0.2 a 0
G700-AN09	-0.5 a -0.2	G700-AN19	-0.4 a -0.2
G700-AN10	-0.6 a -0.4	G700-AN20	-0.5 a -0.3

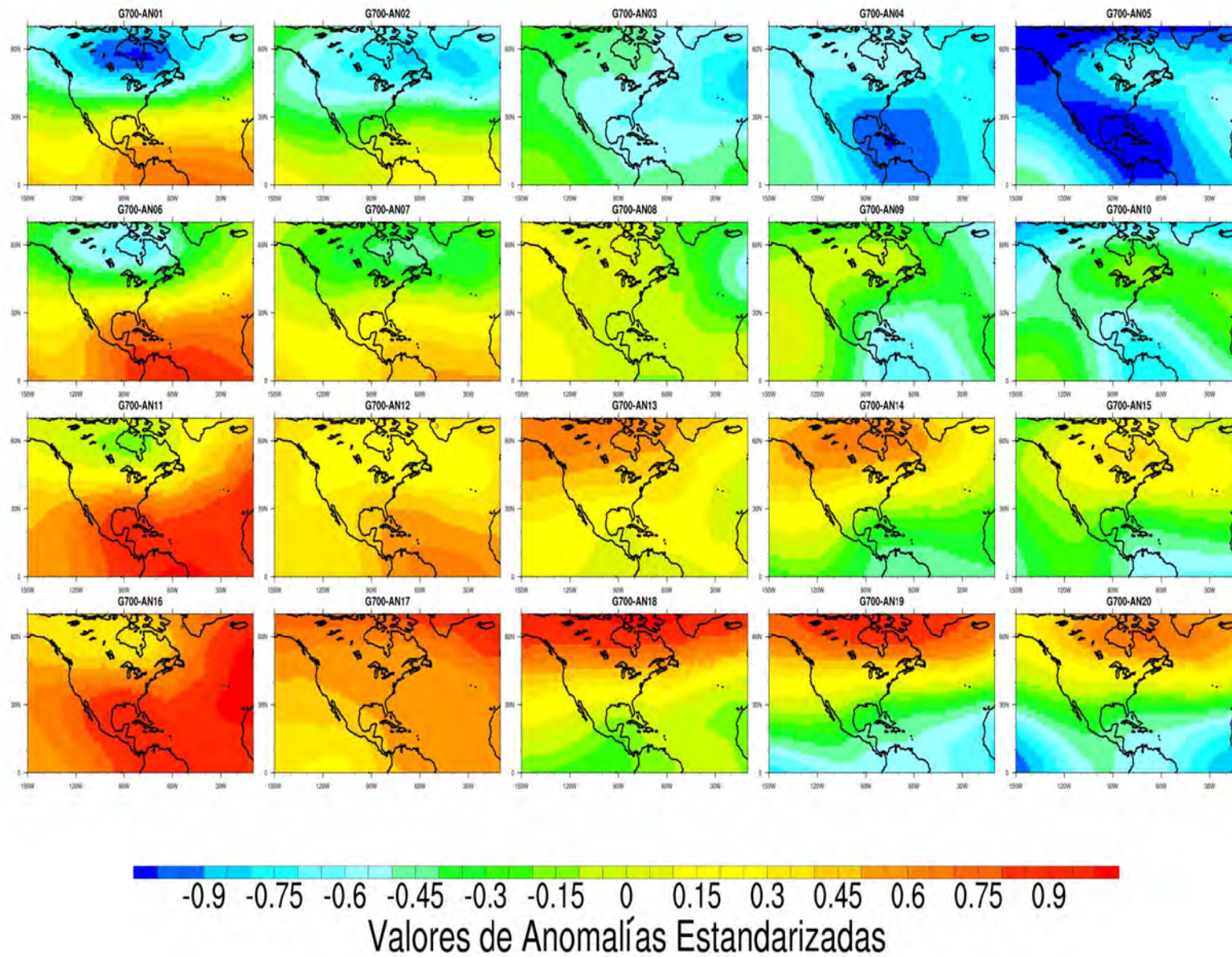


Figura 3-16: Clústeres de los valores de anomalías estandarizadas de altura geopotencial en 700 hPa, obtenidos mediante el método SOM.

Cuadro 3-12: Comportamiento por periodos y trimestres de los patrones de G700, expresado en valores porcentuales

Patrones G700	Periodos		Trimestres			
	Seco	Humedo	MAM	JJA	SON	DEF
G700-AN01	100	0	2	66	32	0
G700-AN02	94	6	35	7	58	0
G700-AN03	29	71	63	0	30	7
G700-AN04	1	99	39	0	11	50
G700-AN05	1	99	15	0	8	77
G700-AN06	100	0	0	86	14	0
G700-AN07	99	1	15	13	72	0
G700-AN08	53	47	26	0	73	1
G700-AN09	4	96	22	0	41	37
G700-AN10	1	99	10	0	17	73
G700-AN11	100	0	0	94	6	0
G700-AN12	100	0	19	34	47	0
G700-AN13	64	36	42	0	57	1
G700-AN14	2	98	39	0	21	40
G700-AN15	0	100	11	0	8	81
G700-AN16	100	0	0	95	5	0
G700-AN17	100	0	42	43	15	0
G700-AN18	56	44	80	1	18	1
G700-AN19	2	98	59	0	7	34
G700-AN20	0	100	19	0	4	77

El comportamiento trimestral de los G700 puede observarse en el cuadro 3-12. Atendiendo a la condición propuesta de considerar un clúster característico de un trimestre cuando su porcentaje de frecuencia sea mayor o igual al 80 % de los casos, se puede observar que los clústeres no presentan un comportamiento trimestral bien definido. El trimestre DEF está representado por el clúster G700-AN15; el trimestre MAM por el clúster G700-AN18; el trimestre JJA por los clústeres G700-AN06, G700-AN11 y G700-AN16; el trimestre SON no está representado por ningún clúster en particular. El resto de los clústeres se presentan en más de un trimestre en el año, sin embargo, son más frecuentes en algunos trimestres que en otros de acuerdo a sus valores de anomalías estandarizadas. De esta forma, se puede observar que los clústeres más frecuentes durante los trimestres DEF y SON presentan, fundamentalmente, valores negativos de anomalías estandarizadas; mientras que los más frecuentes en los trimestres JJA y MAM presentan valores predominantemente positivos de anomalías estandarizadas.

En el caso del nivel de 850 hPa, los patrones obtenidos mediante el método SOMs fueron que se muestran en la Fig.3-17.

En el cuadro 3-13 se puede observar que las anomalías estandarizadas en los patrones de altura geopotencial en 850 hPa presentan un comportamiento más homogéneo y cercanos a la media climatológica en la región central de México. Por otra parte, es importante destacar que en determinadas áreas dentro de la región central de México los valores de presión atmosférica en superficie son menores a 850 hPa; ejemplo de esas áreas es la Ciudad de México. La distribución de los valores de anomalías estandarizadas se encuentran en el rango de moderadamente negativos a moderadamente positivos, por lo que no se presentan valores altamente negativos ni positivos sobre la región de estudio. Con respecto al comportamiento por períodos (ver cuadro 3-14, se puede distinguir a los clústeres G850-AN01 al G850-AN03, G850-AN06, G850-AN07, G850-AN11, G850-AN12, G850-AN16 y G850-AN17 como característicos del período seco. En este comportamiento no se observa que los clústeres respondan a valores de anomalías estandarizadas positivas o negativas, por lo que se presentan indistintamente en el período. En el caso del período húmedo se presentan los clústeres G850-AN05, G850-AN09, G850-AN10, G850-AN14, G850-AN15, G850-AN19 y G850-AN20 como los característicos. Los valores de anomalías estandarizadas de estos clústeres del período húmedo son, por lo general, ligeramente positivos y negativos, lo cual indica que durante este período los valores son más cercanos a la media climatológica. En el caso de clústeres G850-AN04, G850-AN08, G850-AN13 y G850-AN18, su distribución no presenta un comportamiento típico de un período u otro, por lo que se pueden presentar indistintamente en ambos.

Cuadro 3-13: Comportamiento de los valores de anomalías estandarizadas en los clústeres de G850

Patrón sinóptico	Valor de Anomalía Estandarizada	Patrón sinóptico	Valor de Anomalía Estandarizada
G850-AN01	-0.6 a -0.4	G850-AN11	0.4 a 0.6
G850-AN02	-0.6 a -0.3	G850-AN12	0.4 a 0.6
G850-AN03	-0.5 a -0.3	G850-AN13	0.1 a 0.2
G850-AN04	-0.8 a -0.7	G850-AN14	-0.2 a 0
G850-AN05	-0.8 a -0.6	G850-AN15	0 a 0.3
G850-AN06	-0.2 a -0.1	G850-AN16	0.5 a 0.7
G850-AN07	0 a 0.15	G850-AN17	0.4 a 0.8
G850-AN08	-0.2 a -0.1	G850-AN18	0.1 a 0.4
G850-AN09	-0.5 a -0.3	G850-AN19	0.1 a 0.3
G850-AN10	-0.5 a -0.2	G850-AN20	0.2 a 0.4

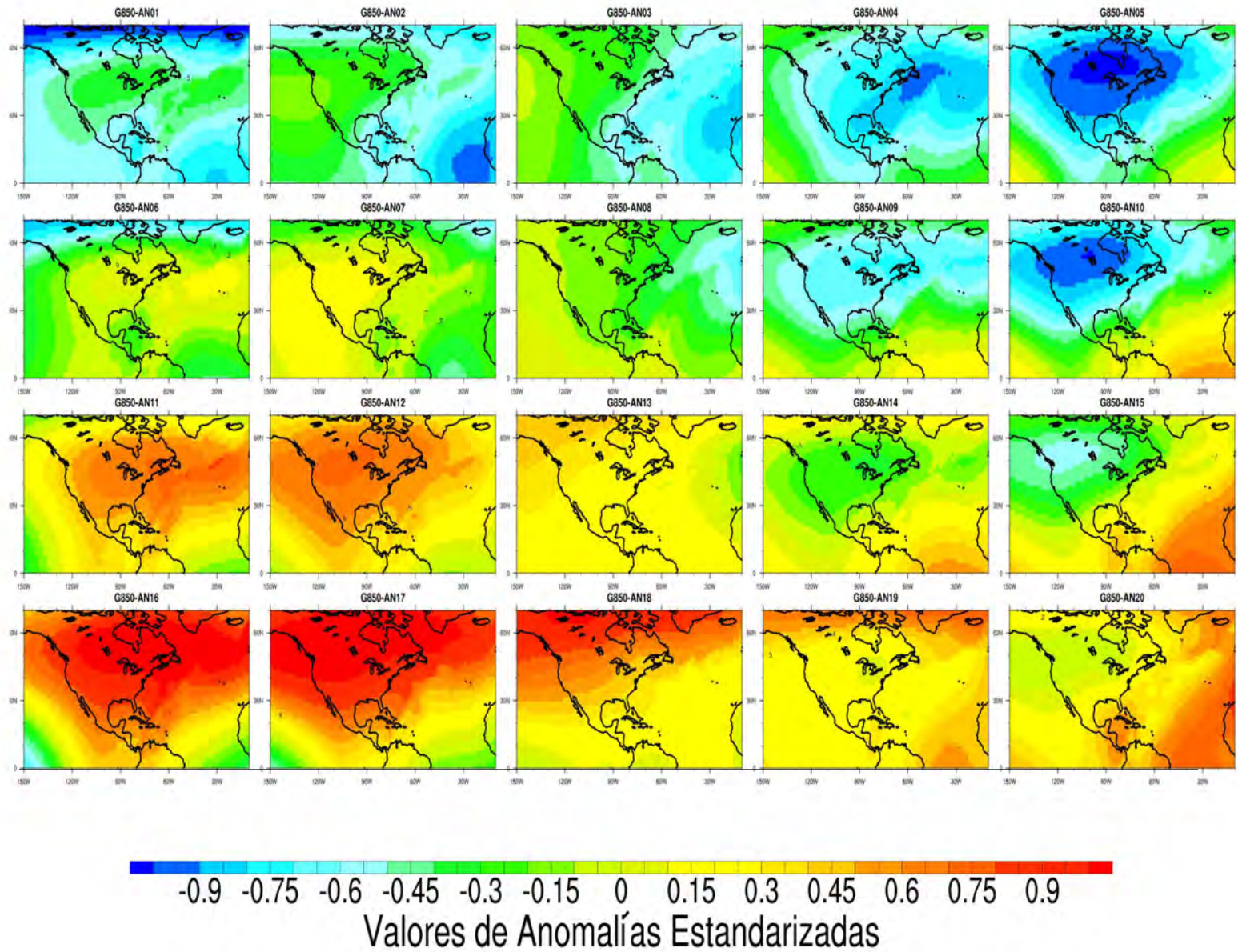


Figura 3-17: Clústeres de los valores de anomalías estandarizadas de altura geopotencial en 850 hPa, obtenidos mediante el método SOM.

Cuadro 3-14: Comportamiento por periodos y trimestres de los patrones de G850, expresado en valores porcentuales

Patrones G850	Periodos		Trimestres			
	Seco	Humedo	MAM	JJA	SON	DEF
G850-AN01	7	93	24	0	20	56
G850-AN02	5	95	30	0	20	50
G850-AN03	18	82	63	0	16	21
G850-AN04	66	34	59	6	31	4
G850-AN05	94	6	29	49	21	1
G850-AN06	3	97	15	0	19	66
G850-AN07	10	90	17	0	46	37
G850-AN08	48	52	42	1	53	4
G850-AN09	93	7	21	22	56	1
G850-AN10	99	1	7	70	23	0
G850-AN11	4	96	13	0	12	75
G850-AN12	9	91	21	0	32	47
G850-AN13	55	45	39	4	53	4
G850-AN14	96	4	17	40	42	1
G850-AN15	100	0	2	91	7	0
G850-AN16	1	99	13	0	6	81
G850-AN17	5	95	33	0	13	54
G850-AN18	54	46	56	4	35	5
G850-AN19	97	3	27	53	20	0
G850-AN20	100	0	2	94	4	0

Haciendo el análisis del comportamiento trimestral de los clústeres de G850, se muestra en el cuadro 3-14 que el clúster G850-AN16 es característico del trimestre DEF, con anomalías estandarizadas moderadamente positivas sobre el centro de México. Durante el trimestre JJA se muestra que el clústeres G850-AN15 y G850-AN20 son los más característicos, con anomalías estandarizadas ligeramente positivas. Otros clústeres como el G850-AN05 y G850-AN09 se presentan en cualquier trimestre del año, excepto en el trimestre DEF; mientras que el clúster G850-AN12 se presenta en cualquier trimestre del año excepto en el trimestre JJA. Los trimestres MAM y SON no presentan clústeres característicos, lo cual es consecuente con los valores de anomalías estandarizadas cercanas a cero. Durante estos trimestres las condiciones son híbridas al presentarse la transición entre los períodos seco y húmedo y viceversa, por lo que no es común encontrar valores extremos sean positivos o negativos.

3.2.2. Relación entre los patrones sinópticos de altura geopotencial en los niveles de altura con los patrones sinópticos de SLP

Análisis de los patrones sinópticos de SLP en el nivel de 500 hPa

El cuadro **3-15** muestra la relación porcentual de la frecuencia de ocurrencia de cada clúster de G500 cuando se presenta cada uno de los patrones sinópticos de SLP.

Como se puede observar, un patrón de SLP puede estar relacionado con varios patrones de G500, con un mayor o menor porcentaje de frecuencia. Es importante notar una relación inversa entre el comportamiento de las anomalías estandarizadas de SLP con las de G500, de modo que los patrones con anomalías positivas (negativas) de SLP están relacionados con patrones de anomalías negativas (positivas) en G500. Esta relación inversa podría estar relacionada con las condiciones baroclínicas en los niveles de altitud respecto a la superficie, demostrando el cierre de la circulación de las masas de aire en la columna vertical de la atmósfera (Holton y Hakim, 2012). Por otra parte, mediante el balance hidrostático se puede explicar la relación anterior debido a la disminución de la presión por bajos valores de densidad de los gases a medida que se aumenta en la altura (Lackmann, 2011).

Realizando un análisis sinóptico de los patrones en los diferentes niveles de altura analizados (G500, G700 y G850) se determinó el comportamiento de cada patrón sinóptico de SLP en la vertical. Cabe destacar que este análisis mostró una relación estrecha entre los patrones sinópticos de altura y los de superficie, de modo que los patrones sinópticos de SLP corresponden al reflejo de los patrones sinópticos G500, G700 y G850 en superficie.

A continuación se muestra la descripción de cada uno de los patrones sinópticos de SLP en el nivel de 500 hPa. Este análisis se realizó determinando cada uno de los patrones de SLP con los patrones de G500 más relacionados. El criterio para definir esta mayor relación se basó en el criterio anteriormente explicado: aquellos cuya suma porcentual sea mayor o igual al 80 % de la frecuencia del patrón de SLP. Esta metodología se utilizará también para el análisis sinóptico de los patrones de SLP en los niveles de 700 y 850 hPa.

Cuadro 3-15: Relaciones porcentuales entre los patrones SLP y G500

SLP	G500-AN01	G500-AN02	G500-AN03	G500-AN04	G500-AN05	G500-AN06	G500-AN07	G500-AN08	G500-AN09	G500-AN10	G500-AN11	G500-AN12	G500-AN13	G500-AN14	G500-AN15	G500-AN16	G500-AN17	G500-AN18	G500-AN19	G500-AN20
SLP-AN01	12	0	0	0	0	29	5	1	0	0	28	6	1	0	0	14	2	1	0	0
SLP-AN02	13	4	0	0	0	18	13	3	1	0	16	12	4	0	0	7	6	2	0	0
SLP-AN03	13	14	2	0	0	4	13	6	0	0	5	14	5	1	0	5	12	4	1	0
SLP-AN04	11	18	5	1	0	1	5	4	0	0	4	6	6	1	0	12	16	7	2	0
SLP-AN05	19	17	4	0	0	1	3	2	0	0	5	4	3	0	0	24	11	5	1	0
SLP-AN06	19	1	1	0	0	28	9	2	0	0	25	5	0	0	0	7	2	1	0	0
SLP-AN07	19	4	2	0	0	17	15	5	0	0	13	9	4	0	0	5	6	2	0	0
SLP-AN08	4	7	4	1	0	2	7	6	1	0	3	9	14	4	0	4	13	17	6	0
SLP-AN09	2	12	10	1	0	1	3	5	1	0	1	6	15	4	0	3	12	19	4	0
SLP-AN10	8	18	19	3	0	2	4	5	1	0	3	3	7	2	0	5	6	7	0	0
SLP-AN11	3	1	0	0	2	3	1	2	8	6	5	5	7	6	11	4	4	11	13	8
SLP-AN12	1	0	1	1	8	2	2	2	4	10	2	2	6	8	12	1	2	7	13	14
SLP-AN13	1	1	2	4	10	0	0	1	6	9	0	1	10	16	7	1	2	9	18	3
SLP-AN14	0	1	4	16	15	0	1	10	13	6	0	1	9	9	4	1	2	5	3	0
SLP-AN15	5	15	25	10	3	2	10	14	3	1	1	3	5	2	0	0	1	1	1	0
SLP-AN16	0	0	0	0	6	0	0	0	0	16	0	0	1	5	29	0	0	1	11	30
SLP-AN17	0	0	0	0	13	0	0	0	2	24	0	0	0	4	27	0	0	0	6	23
SLP-AN18	0	0	0	2	23	0	0	0	7	25	0	0	1	7	21	0	0	0	3	9
SLP-AN19	0	0	0	12	19	0	0	2	14	19	0	0	3	13	10	0	0	1	2	5
SLP-AN20	0	1	9	19	9	1	4	19	15	2	0	2	9	6	2	0	0	1	1	0

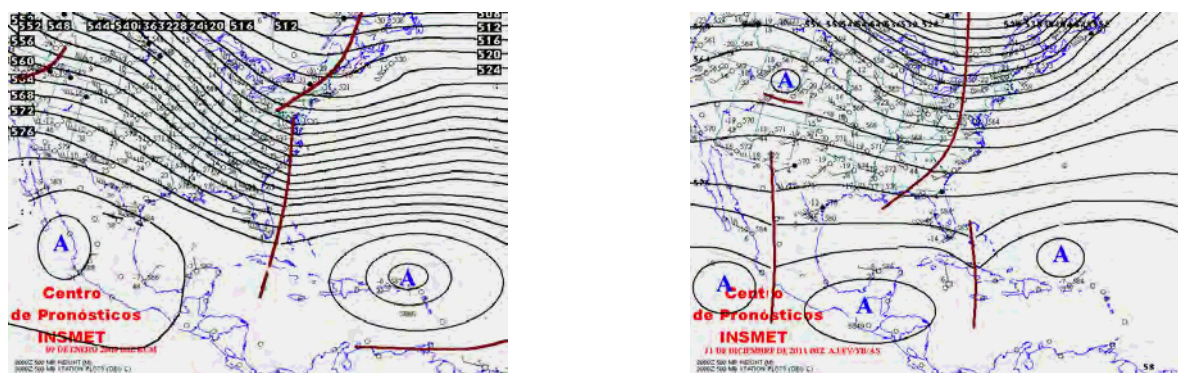


Figura 3-18: Mapas de altitud en el nivel de 500 hPa que ejemplifica a los patrones sinópticos: a) SLP-AN01 y b) SLP-AN02

SLP-AN01: Durante este patrón sinóptico, en el nivel de 500 hPa se observa la presencia de centros de alto geopotencial (CAG) sobre la región central de México y otro CAG extendido sobre Cuba, la Península de la Florida y las Antillas Mayores (ver ??). También se observa una vaguada extendida por la costa oriental del continente americano, el Golfo de México y puede llegar hasta el norte de la Península de Yucatán. Esta vaguada extendida está asociada con el frente frío en superficie. Por otra parte, se observa una vaguada al NW de México, relacionada con la baja extratropical en superficie.

SLP-AN02: Este patrón sinóptico se caracteriza, en el nivel de 500 hPa, por la presencia de CAGs sobre el territorio mexicano, principalmente en la región central (ver ??). Se observa una vaguada extendida sobre La Española y Cuba, y en muchas ocasiones forman centros de bajo geopotencial (CBG) desprendidos de la propia vaguada. Sobre la Península de Nueva Escocia se presencia un CBG bien desarrollado, del cual se origina una vaguada que se extiende por el continente americano hasta el NW de México.

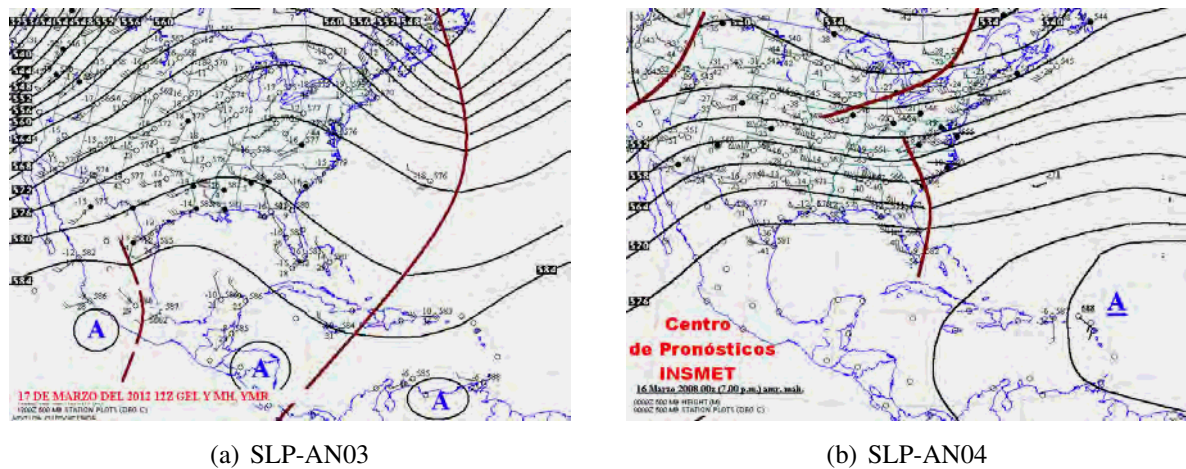


Figura 3-19: Mapas de altitud en el nivel de 500 hPa que ejemplifica a los patrones sinópticos SLP-AN03 y SLP-AN04

SLP-AN03: Durante este patrón se presenta una configuración de CAGs sobre el Mar Caribe occidental y el centro-oeste del territorio mexicano en el nivel de 500 hPa (ver 3.19(a)). Entre estos CAGs se forman vaguadas que pueden extenderse varios kilómetros. Estas vaguadas se observan principalmente en tres regiones: 1) Desde un CBG sobre la Península de Nueva Escocia, pasando por Cuba y la Península de la Florida hasta adentrarse en el Mar Caribe occidental; 2) Sobre la región central y oriental de México y 3) Sobre la Península de Baja California, relacionada con la baja extratropical presente en superficie.

SLP-AN04: Este patrón sinóptico está caracterizado por un CAG ubicado sobre el Mar Caribe Oriental, de manera que existe un débil gradiente de geopotencial sobre las Antillas Mayores y el territorio mexicano en el nivel de 500 hPa (ver 3.19(b)). Se observa una vaguada sobre el NW de México y SW de los Estados Unidos. Por otra parte, también se observa una vaguada sobre el NW de México que puede extenderse por el centro del continente americano. Sobre la costa oriental del continente americano se observa también una vaguada, que en ocasiones produce la formación de CBGs sobre dicha región.

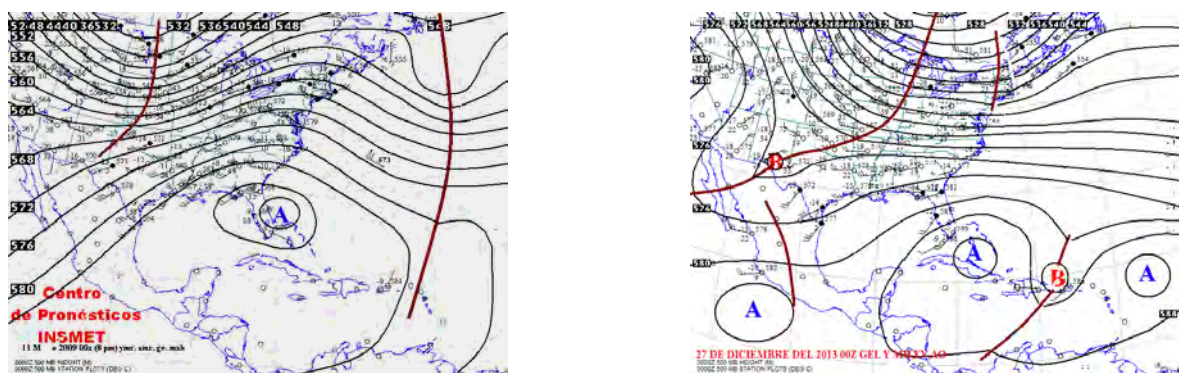


Figura 3-20: Mapas de altitud en el nivel de 500 hPa que ejemplifica a los patrones sinópticos: a) SLP-AN05 y b) SLP-AN06

SLP-AN05: Durante este patrón sinóptico, en el nivel de 500 hPa, se observa la presencia de un CAG sobre Cuba y Golfo de México que se va desplazando hasta el E-SE. En este nivel de altitud predomina la circulación del SE sobre la región central de México. Por otra parte, se observa una vaguada bien definida sobre la costa oriental y centro de los EE.UU, relacionado con los sistemas frontales en superficie.

SLP-AN06: Este patrón sinóptico está representado por la presencia de CBGs sobre el NW de México en el nivel de 500 hPa, relacionado con la baja extratropical presente en superficie. Sobre el centro de México se observa una vaguada que se extiende desde el Golfo de México hasta el territorio mexicano. Predomina la presencia de CAGs sobre la región del Mar Caribe y el Arco de las Antillas y, en ocasiones, otro sobre la Península de Yucatán.

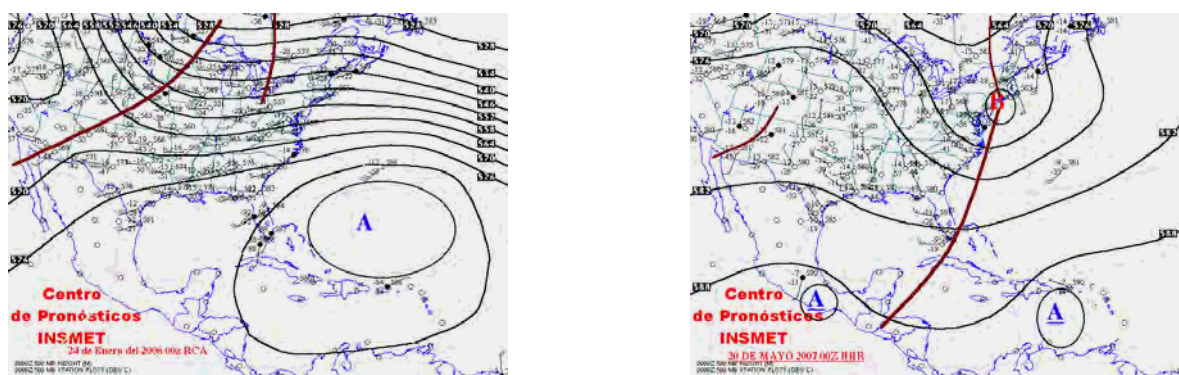


Figura 3-21: Mapas de altitud en el nivel de 500 hPa que ejemplifica a los patrones sinópticos: a) SLP-AN07 y b) SLP-AN08

SLP-AN07: Durante este patrón, en el nivel de 500 hPa, se observa una vaguada extendida desde un CBG sobre la Península de Nueva Escocia hasta el NW el territorio mexicano, el cual se va desplazando hasta el centro de México y el Golfo de México. Cuando se presenta esta vaguada,

se observa un débil gradiente bórico sobre el centro de México. También se observa un CAG bien definido y extendido sobre Cuba y el resto de las Antillas Mayores. Sobre el Mar Caribe central se observa un CBG que tiene asociadas vaguadas sobre toda la región del Caribe.

SLP-AN08: Este patrón sinóptico está representado, en el nivel de 500 hPa, por la presencia de un CAG sobre el centro y norte de México, así como de otros dos CAGs sobre el Golfo de México próximo a la costa sur del continente americano y el otro al norte del Mar Caribe. Se observa también un CBG bien desarrollado sobre la Península de Nueva Escocia, del cual se desprende una vaguada que se extiende por la costa oriental del continente americano hasta la Península de la Florida. Por otra parte, se presencia una vaguada sobre el NW de México y otra pequeña situada entre los dos CAGs sobre el centro de México y el Golfo de México.

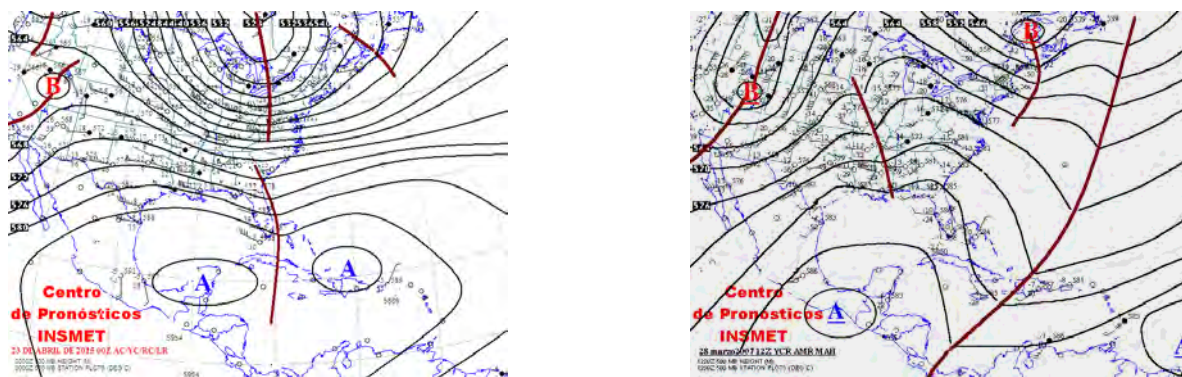


Figura 3-22: Mapas de altitud en el nivel de 500 hPa que ejemplifica a los patrones sinópticos: a) SLP-AN09 y b) SLP-AN10

SLP-AN09: Durante este patrón sinóptico se presenta, en el nivel de 500 hPa, un CAG sobre el sur de México y otro CAG bien definido sobre Cuba y la Española. Se observa también una vaguada sobre la costa oriental del continente americano, que puede llegar hasta el Golfo de México. Sobre el NW de México se presenta un CBG, el cual se refleja en superficie, mostrando un buen acople en la vertical.

SLP-AN10: Este patrón sinóptico está representando, en el nivel de 500 hPa, la presencia de un CAG que abarca gran parte de la región cercana al territorio mexicano, extendiéndose por el centro de México, sur de México, Golfo de México y Cuba. Por otra parte, se presenta una vaguada bien desarrollada que se extiende desde la Península de Nueva Escocia hasta el Mar Caribe central. Sobre el Mar Caribe occidental se observa un CBG que puede estar asociado con la ciclogénesis en superficie.

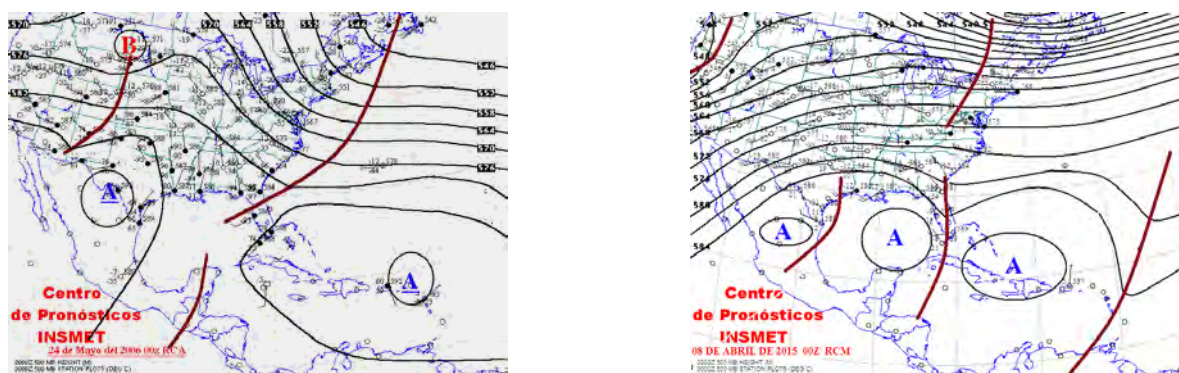


Figura 3-23: Mapas de altitud en el nivel de 500 hPa que ejemplifica a los patrones sinópticos: a) SLP-AN11 y b) SLP-AN12

SLP-AN11: Durante este patrón sinóptico, en el nivel de 500 hPa, comienza a observarse la influencia de la Vaguada Tropical Troposférica Superior (TUTT, por sus siglas en inglés) sobre la costa oriental del continente americano hasta la Península de la Florida y Golfo de México. Sobre la región central y sur de México se observa un CBG, mientras que sobre el NW de México se observa un CAG que cierra la circulación vertical del centro de bajas presiones en superficie. Por otra parte, comienzan a observarse vaguadas invertidas sobre el SW de EE.UU., principalmente en Arizona y Nuevo México. Sobre el Mar Caribe se observa un débil gradiente bórico y, en ocasiones, la formación de un pequeño CAG sobre Cuba.

SLP-AN12: Este patrón sinóptico está representado, en el nivel de 500 hPa, por la presencia de pequeños CAGs sobre el NW de México, centro de México y Cuba. En el espacio correspondiente a la separación entre estos CAGs se encuentran vaguadas ubicadas, fundamentalmente, sobre el NE de México, Golfo de México y la Península de la Florida. Sobre el Mar Caribe se observan vaguadas extendidas con dirección NE-SW. Se observa, además, la presencia de la TUTT sobre el Atlántico Occidental, cercano a la costa oriental de los EE.UU.

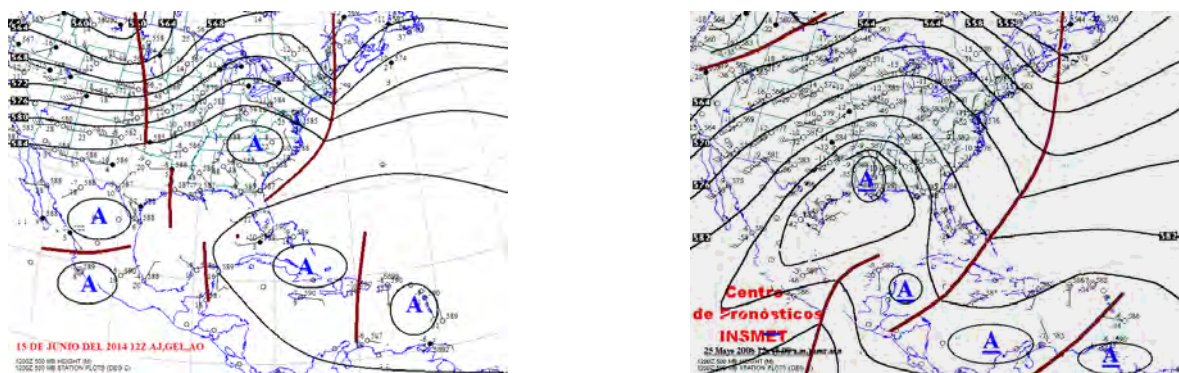


Figura 3-24: Mapas de altitud en el nivel de 500 hPa que ejemplifica a los patrones sinópticos: a) SLP-AN13 y b) SLP-AN14

SLP-AN13: Durante este patrón sinóptico, en el nivel de 500 hPa, se observan pequeños CAGs sobre Cuba, Mar Caribe, Golfo de México, centro de México y NW de México. Estas altas presiones sobre el Mar Caribe se asocian con el cierre de la circulación vertical de los centros de bajas presiones en superficie. Debido a la presencia de estos pequeños CAGs sobre la región, se pueden encontrar vaguadas en el espacio comprendido entre ellos.

SLP-AN14: Este patrón sinóptico está representado, en el nivel de 500 hPa, por la presencia de vaguadas invertidas sobre el centro de México. Estas vaguadas invertidas presentan un movimiento al SE debido a la presencia de un CAG ubicado al NW de México. Sobre el Golfo de México, Cuba y la Península de la Florida se observa la presencia de la TUTT. Por su parte, sobre el Mar Caribe se presentan altos valores de geopotencial, que en ocasiones pueden formar CAGs.

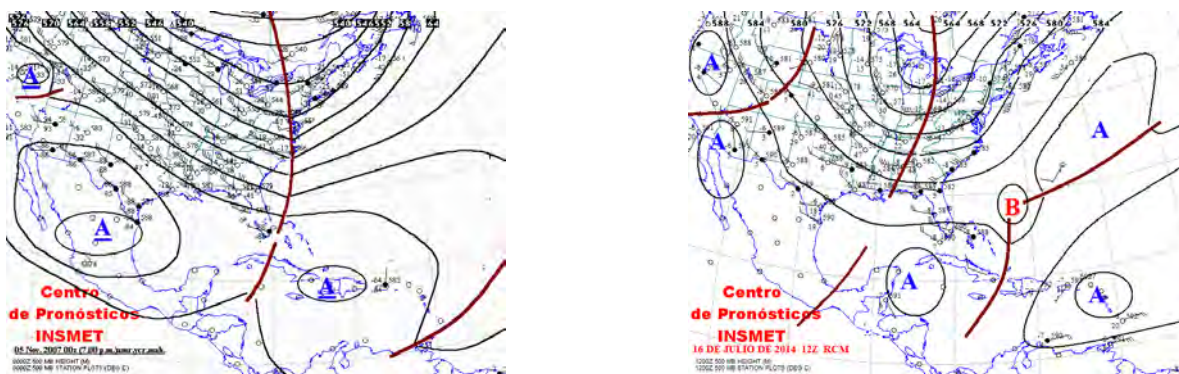


Figura 3-25: Mapas de altitud en el nivel de 500 hPa que ejemplifica a los patrones sinópticos: a) SLP-AN15 y b) SLP-AN16

SLP-AN15: Patrón sinóptico que se encuentra representado, en el nivel de 500 hPa, por las condiciones promedio de los valores de altura geopotencial en el año. Se observa un CAG bien desarrollado sobre el territorio mexicano, que se extiende hasta el Golfo de México. Otro CAG se encuentra extendido sobre Cuba, el Arco de las Antillas y el NE del mar Caribe. Se observa una vaguada bien extendida por toda la costa oriental de los EE.UU. y puede llegar hasta la parte norte de América Central.

SLP-AN16: Durante este patrón sinóptico se presenta un débil gradiente bórico sobre el territorio mexicano, Golfo de México y el Arco de las Antillas en el nivel de 500 hPa. Sobre el Mar Caribe se observa un CAG que se puede asociar a la ciclogénesis asociada en superficie. Por otra parte, se presenta un CAG sobre el NW de México, mientras que en el continente americano predominan altos valores de altura geopotencial.

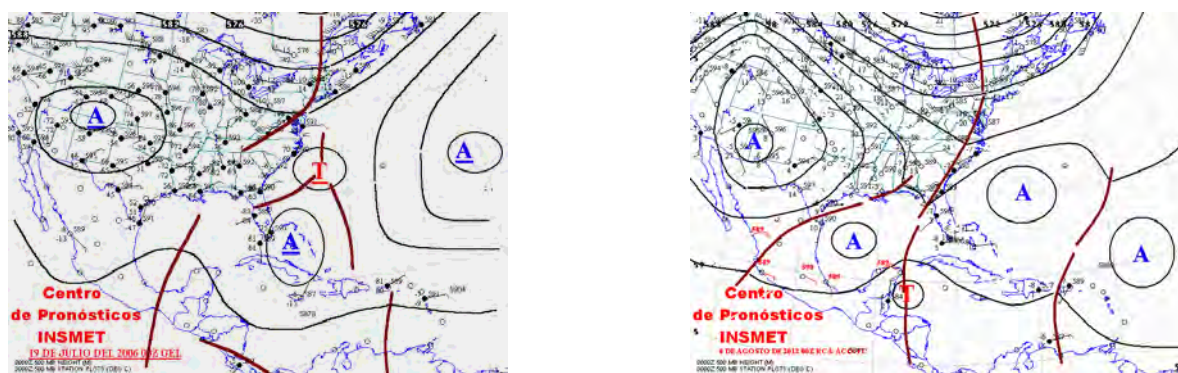


Figura 3-26: Mapas de altitud en el nivel de 500 hPa que ejemplifica a los patrones sinópticos: a) SLP-AN17 y b) SLP-AN18

SLP-AN17: Patrón sinóptico representado, en el nivel de 500 hPa, por la presencia de altos valores de altura geopotencial en el continente americano, donde frecuentemente se forman pequeños CAGs. Se observa una vaguada extendida sobre la parte occidental del Atlántico Tropical, la cual se extiende por el Mar Caribe y el Arco de las Antillas hasta América Central. Debido a la presencia de esta vaguada sobre el Mar Caribe, se presentan CBGs que se asocian con la presencia de ciclones tropicales en superficie. Por otra parte, sobre el centro de México y el Golfo de México se presenta un débil gradiente bórico.

SLP-AN18: Durante este patrón sinóptico se presentan bajos valores de altura geopotencial en el nivel de 500 hPa sobre el territorio mexicano, Mar Caribe, Golfo de México y las Antillas Mayores. Se observa un acople vertical de los ciclones tropicales definidos en superficie, de manera que se presentan CBGs en la región o bien una vaguada extendida. Sobre el NW de México se presenta un CAG que se encuentra asociado con el centro de bajas presiones debido al contraste térmico océano-continente en superficie.

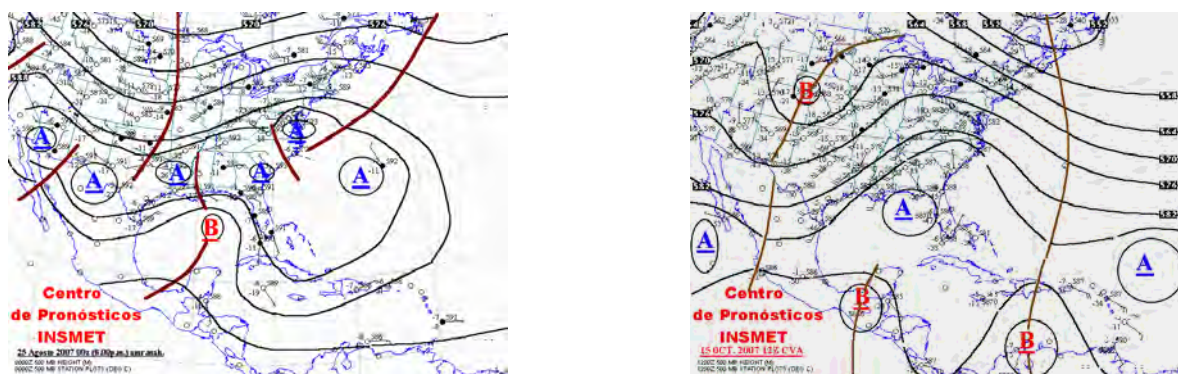


Figura 3-27: Mapas de altitud en el nivel de 500 hPa que ejemplifica a los patrones sinópticos: a) SLP-AN19 y b) SLP-AN20

SLP-AN19: Patrón sinóptico representado, en el nivel de 500 hPa, por la presencia de vaguadas invertidas sobre el Golfo de México, sudeste y sur de México, que pueden llegar hasta la región del Océano Pacífico próximo a la región sur de México. Estas vaguadas invertidas podrían estar asociadas a la ciclogénesis sobre dicha región. Por su parte, sobre Cuba, Mar Caribe y el Atlántico Occidental se presentan CAGs, así como también en el NW de México. Por el centro del continente americano se extiende una vaguada que puede llegar hasta el norte del territorio mexicano.

SLP-AN20: Este patrón sinóptico presenta, en el nivel de 500 hPa, una alternancia entre altos y bajos valores de altura geopotencial sobre el Mar Caribe. Esta configuración variante permite reconocer que los CBGs formados estén asociados a los ciclones tropicales en la cuenca del Atlántico durante este patrón sinóptico. Se observan, además, pequeños CAGs sobre el centro de México y el Golfo de México. En el mapa de anomalías estandarizadas de los clústeres de G500 asociados a este patrón sinóptico, se puede ver una marcada coherencia entre la distribución de las anomalías estandarizadas y la posición de los CAGs.

Análisis de los patrones sinópticos de SLP en el nivel de 700 hPa

El análisis de la relación porcentual de ocurrencia de cada uno de los clústeres de G700 con cada uno de los clústeres de SLP se presenta en el cuadro 3-16. Se puede observar una relación inversa el comportamiento de los valores de anomalías estandarizadas de SLP con los de G700, aunque el rango de valores de ligero a altamente positivo o negativo no es tan definido como en el caso de G500.

La descripción sinóptica de los patrones de SLP en el nivel de 700 hPa se muestra a continuación, basándose en la relación porcentual existente anteriormente explicada (ver cuadro 3-16).

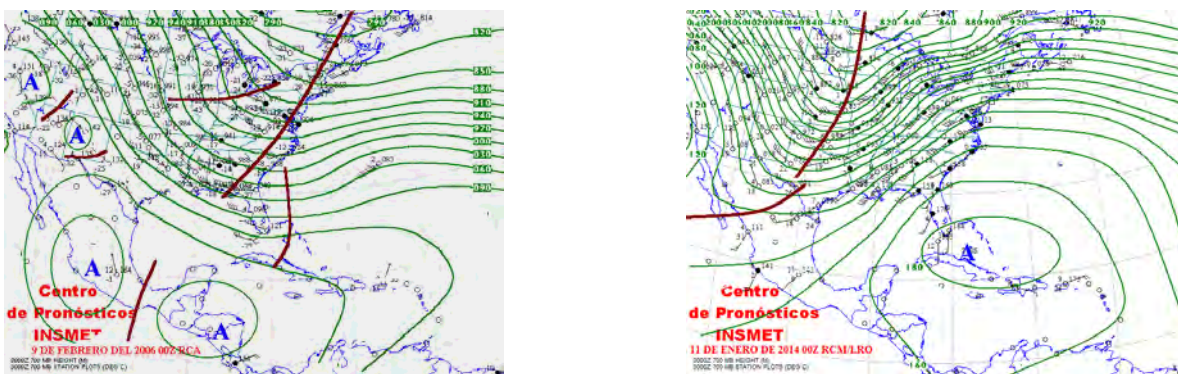


Figura 3-28: Mapas de altitud en el nivel de 700 hPa que ejemplifica a los patrones sinópticos: a) SLP-AN01 y b) SLP-AN02

SLP-AN01: Patrón sinóptico representado por la presencia de altos valores de altura geopotencial en el nivel de 700 hPa sobre la región central de México. Se presentan en la región correspondiente

Cuadro 3-16: Relaciones entre los patrones SLP y G700, expresado en valores porcentuales

SLP	G700-AN01	G700-AN02	G700-AN03	G700-AN04	G700-AN05	G700-AN06	G700-AN07	G700-AN08	G700-AN09	G700-AN10	G700-AN11	G700-AN12	G700-AN13	G700-AN14	G700-AN15	G700-AN16	G700-AN17	G700-AN18	G700-AN19	G700-AN20
SLP-AN01	0	0	0	0	3	0	0	0	1	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SLP-AN02	0	0	0	0	2	0	0	4	19	13	0	1	7	7	23	0	0	0	0	3
SLP-AN03	0	0	0	2	2	0	0	3	3	0	0	10	20	36	3	0	0	1	6	12
SLP-AN04	0	0	4	12	4	0	0	11	1	0	0	6	9	9	1	0	3	11	22	3
SLP-AN05	0	1	16	38	13	0	1	4	0	0	0	2	2	2	0	0	1	7	16	2
SLP-AN06	0	1	1	1	17	0	1	2	32	0	0	2	3	3	30	0	0	1	18	18
SLP-AN07	0	1	1	0	16	0	1	5	28	0	0	2	8	3	10	0	0	1	1	8
SLP-AN08	0	1	2	3	4	0	2	7	11	1	3	14	8	2	0	5	2	15	10	2
SLP-AN09	1	10	24	14	3	0	2	8	4	0	0	7	2	0	0	0	2	17	6	0
SLP-AN10	0	7	23	18	14	0	4	4	4	1	0	3	0	0	0	0	3	3	1	0
SLP-AN11	0	0	0	0	3	0	2	1	0	0	4	3	3	1	1	4	6	6	2	3
SLP-AN12	10	5	1	0	5	13	7	3	0	2	11	8	4	0	0	9	3	0	1	1
SLP-AN13	18	13	4	0	2	9	10	2	0	0	4	12	2	0	0	13	9	1	1	1
SLP-AN14	12	16	4	1	0	2	6	5	0	0	3	1	1	0	0	1	3	3	0	0
SLP-AN15	6	15	15	9	14	0	4	23	25	9	1	0	2	2	0	0	0	0	0	0
SLP-AN16	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	25	8	1	0	64	32	2	0	0	0
SLP-AN17	2	0	0	0	0	21	1	0	0	0	26	5	1	0	18	8	1	0	0	0
SLP-AN18	18	2	0	0	0	27	9	0	0	0	20	15	1	0	5	8	1	0	0	0
SLP-AN19	24	12	0	0	0	19	32	3	0	0	7	32	9	0	4	9	5	1	1	0
SLP-AN20	9	16	4	0	0	2	27	8	8	2	0	4	20	5	1	1	3	1	1	0

al territorio mexicano, fundamentalmente sobre el centro de México y la parte norte de América Central y sudeste de México. Debido a la separación entre estos CAGs se presenta una vaguada que se extiende desde el Golfo de México hasta el Pacífico Sur mexicano. Sobre la costa oriental se observa una vaguada extendida hasta el Golfo de México.

SLP-AN02: Este patrón sinóptico está representado, en el nivel de 700 hPa, por la presencia de un CAG sobre Cuba cuya configuración isohéptica se extiende por toda la región del Mar Caribe, Península de Yucatán y Golfo de México. Se presenta circulación de los oestes sobre México. Por el centro del continente americano hasta la región Norte y NW de México se extiende una vaguada, la cual está relacionada con la presencia de los sistemas frontales en superficie.

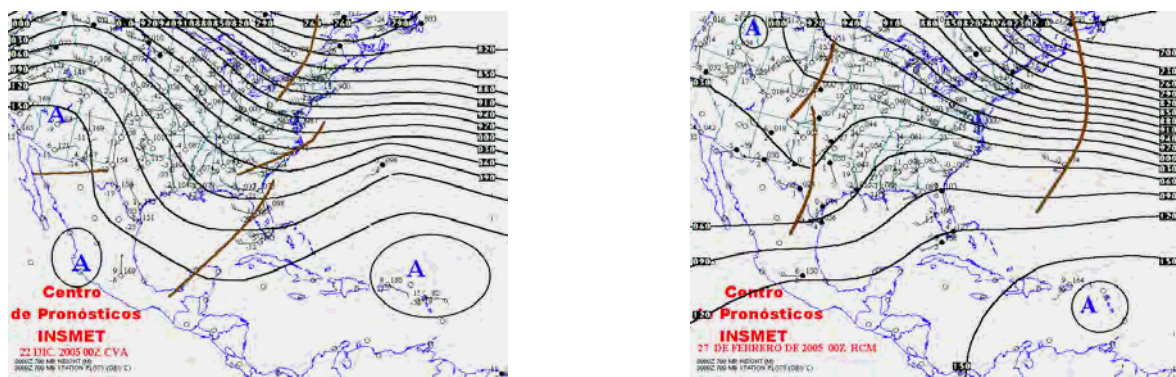


Figura 3-29: Mapas de altitud en el nivel de 700 hPa que ejemplifica a los patrones sinópticos: a) SLP-AN03 y b) SLP-AN04

SLP-AN03: Patrón sinóptico representado, en el nivel de 700 hPa, por la presencia de altos valores de geopotencial sobre la región central de México y los alrededores. Se observa la presencia de CAGs sobre el centro de México y la parte norte del Arco de las Antillas. Se observan vaguadas sobre el Golfo de México y la costa oriental del continente americano. Además, se presenta una vaguada sobre el NW de México, el cual está relacionado con la presencia de bajas extratropicales en superficie.

SLP-AN04: Patrón sinóptico representado por la presencia de circulación zonal del oeste sobre el centro de México en el nivel de 700 hPa. Sobre la región norte de México se presentan vaguadas que perturban la circulación zonal y están asociadas a la presencia de bajas extratropicales en superficie. Sobre el Mar Caribe predomina un débil gradiente bórico, aunque pueden observarse CAGs. Se presenta una vaguada extendida sobre el Atlántico Norte occidental, próximo al continente americano.

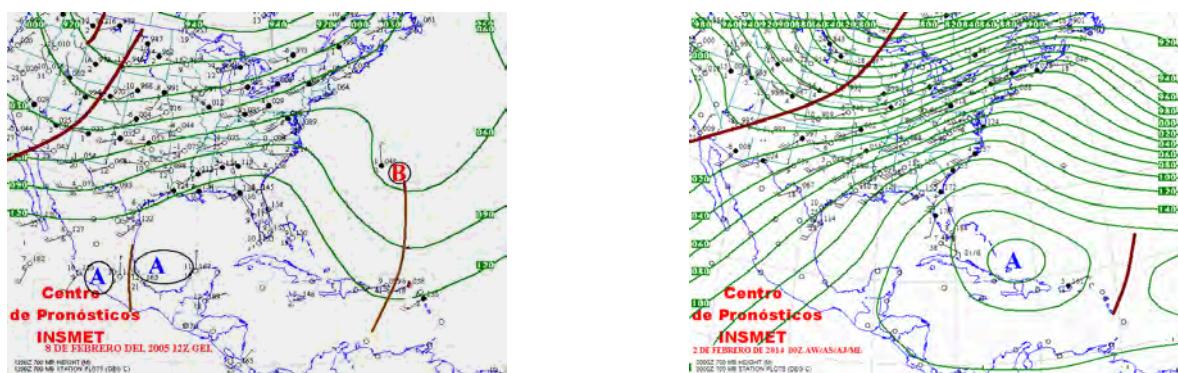


Figura 3-30: Mapas de altitud en el nivel de 700 hPa que ejemplifica a los patrones sinópticos: a) SLP-AN05 y b) SLP-AN06

SLP-AN05: Este patrón sinóptico está representado, en el nivel de 700 hPa, por la presencia de un débil gradiente bórico sobre la región de Mar Caribe, Golfo de México y los alrededores del territorio mexicano. Sobre la región central de México predominan los altos valores de geopotencial, con la presencia de dos CAGs separados por una vaguada en dirección N-S. Sobre el Atlántico Norte se presenta un CBG del cual se extiende una vaguada que modula el comportamiento de la circulación atmosférica sobre dicha área y el Mar Caribe oriental. Una vaguada extendida con dirección NE-SW se puede observar sobre el oeste de los EE.UU y permite la circulación de los oestes sobre el norte de México.

SLP-AN06: Patrón sinóptico representado por la circulación de vientos del SW-NE sobre el territorio mexicano en el nivel de 700 hPa. Sobre Cuba, La Española y el Mar Caribe predominan altos valores de geopotencial, con la presencia de un CAG que abarca gran parte de dicha región. Sobre el centro y oeste del continente americano se extiende una vaguada en la altura que está relacionada con los sistemas frontales en superficie.

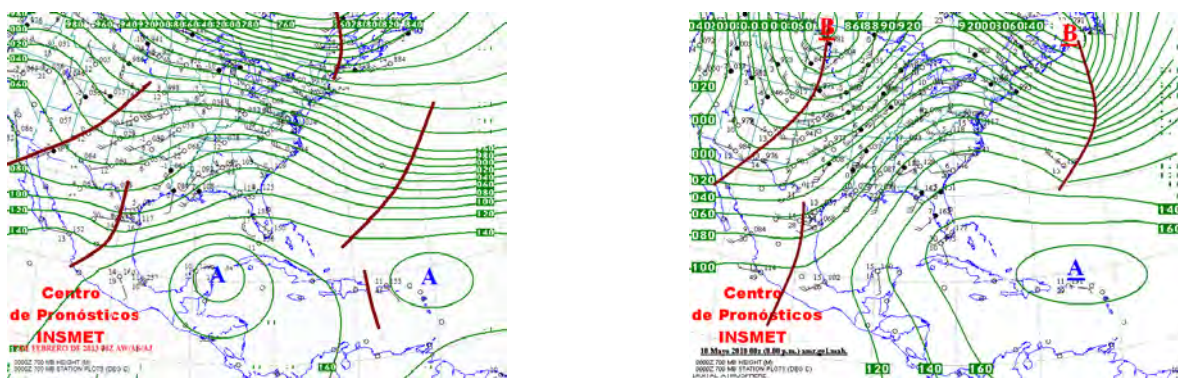


Figura 3-31: Mapas de altitud en el nivel de 700 hPa que ejemplifica a los patrones sinópticos: a) SLP-AN07 y b) SLP-AN08

SLP-AN07: Durante este patrón sinóptico, en el nivel de 700 hPa, se presentan CAGs sobre el sudeste de México, sur del Golfo de México y Cuba, los cuales abarcan parte del Mar Caribe y América Central. Se observan dos vaguadas sobre el territorio mexicano, una sobre el centro del país y otra que se extiende desde el centro-oeste del continente americano hasta el norte de México, principalmente sobre la Península de Baja California. Sobre el Atlántico Norte se presentan vaguadas en la circulación de los oestes.

SLP-AN08: Patrón sinóptico representado por una vaguada en dirección N-S sobre el centro de México en el nivel de 700 hPa. Se observa una diferencia notable en la circulación atmosférica sobre el territorio mexicano; mientras que el norte predomina la circulación de los oestes, en el sur del país se presentan vientos provenientes del sur. Estos cambios en la circulación producen que se observe un área de débil gradiente bórico sobre el centro-sur del territorio mexicano. Sobre el Arco de las Antillas y Mar Caribe oriental predominan los CAGs, mientras que en el norte del continente americano se observan CBGs del cual se extienden vaguadas que modulan la circulación de los oestes en dicha región.

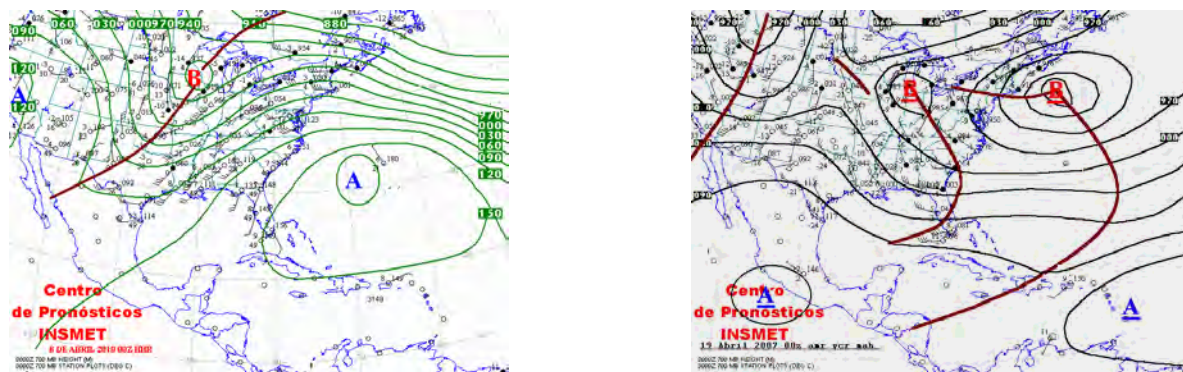


Figura 3-32: Mapas de altitud en el nivel de 700 hPa que ejemplifica a los patrones sinópticos: a) SLP-AN09 y b) SLP-AN10

SLP-AN09: Durante este patrón sinóptico se presenta, en el nivel de 700 hPa, un débil gradiente bórico sobre el territorio mexicano, Mar Caribe y Golfo de México. Sobre el Atlántico Norte, próximo a la costa oriental del continente americano, se presentan CAGs también con un débil gradiente en su configuración isobárica. Sobre el centro del continente americano se presenta un CBG del cual se origina una vaguada, en dirección NE-SW, se presenta una vaguada que se extiende hasta el norte de México.

SLP-AN10: Patrón sinóptico que representa, en el nivel de 700 hPa, la presencia de un CAG sobre el centro y sur de México, que se extiende hasta la parte norte de América Central y el Pacífico sur mexicano. Sobre las Antillas Mayores se extiende una vaguada desde el Atlántico Norte hasta el norte del Mar Caribe. Predomina el flujo de los oestes sobre la región de estudio, con una mayor

zonalidad en el norte de México y en el continente americano.

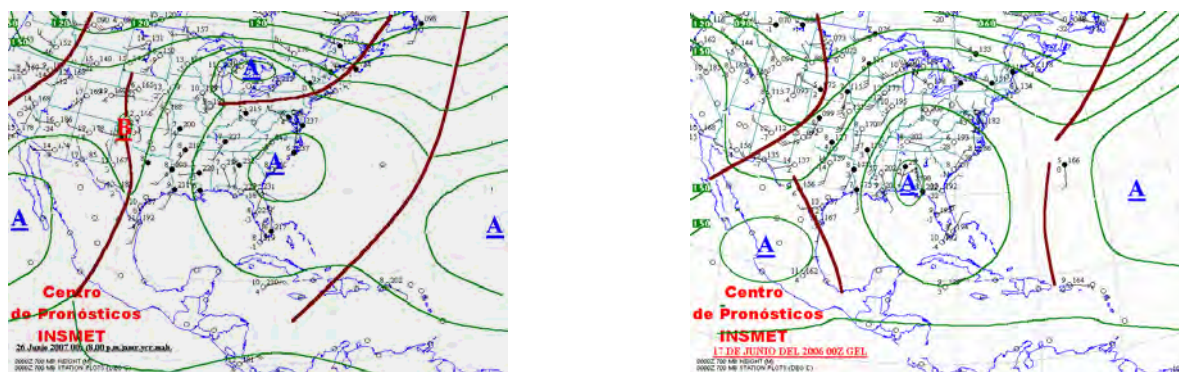


Figura 3-33: Mapas de altitud en el nivel de 700 hPa que ejemplifica a los patrones sinópticos: a) SLP-AN11 y b) SLP-AN12

SLP-AN11: Durante este patrón sinóptico, en el nivel de 700 hPa, se presenta un flujo perturbado en la circulación zonal en la región adyacente al territorio mexicano al no distinguirse el típico flujo del oeste en este nivel de altura. Se presentan tres CAGs desarrollados, uno al NW de la costa pacífica mexicana, otro sobre la costa oriental del continente americano y otro en el centro del Atlántico próximo a latitudes bajas. Entre estos CAGs se presentan vaguadas bien definidas como consecuencia del cambio del giro del viento en la circulación de estos centros, una de ellas se extiende de N-S por todo el territorio mexicano. Por lo general, se presentan altos valores de geopotencial en toda la región.

SLP-AN12: Este patrón sinóptico es bastante similar al SLP-AN11 en el nivel de 700 hPa, con la diferencia de que los CAGs se encuentran más desplazados al oeste. Por otra parte, se observa una mayor organización en el flujo de los oestes sobre latitudes medias, aunque con componentes más meridionales en la circulación del viento. Se mantienen los altos valores de altura geopotencial en la región y presencia de vaguadas, una de ellas sobre la costa oriental de México.

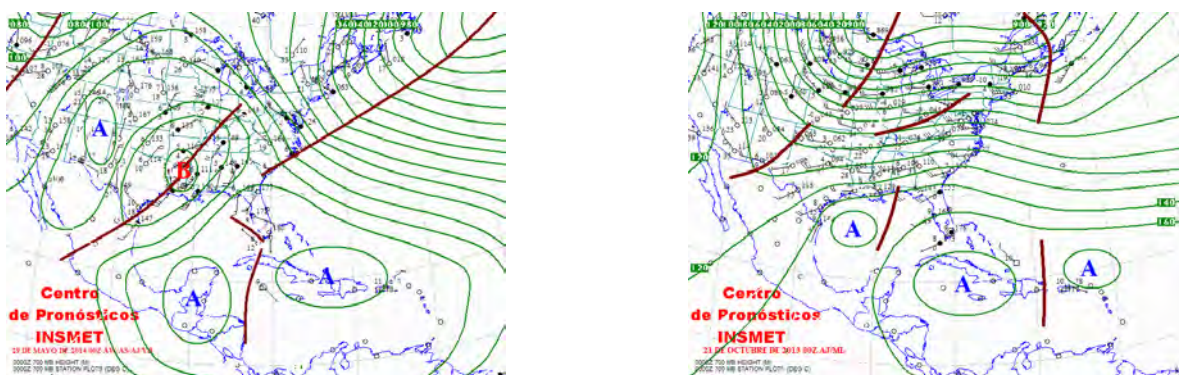


Figura 3-34: Mapas de altitud en el nivel de 700 hPa que ejemplifica a los patrones sinópticos: a) SLP-AN13 y b) SLP-AN14

SLP-AN13: Patrón sinóptico que muestra una relación de alternancia entre CAGs y CBGs en la región de estudio en el nivel de 700 hPa. Se observa una vaguada sobre el centro de México, la cual se origina en un CBG sobre el centro-sur del continente americano y su posición NE-SW está modulada por la presencia de un CAG sobre el SW de los EE.UU y otro CAG sobre el sur y sudeste de México. Sobre el Mar Caribe se observan altos valores de geopotencial.

SLP-AN14: Durante este patrón sinóptico se presentan, en el nivel de 700 hPa, CAGs que dominan la circulación isohípica en la región de estudio. Sobre el centro de México predomina un débil gradiente bórico debido al cierre de la circulación de los CAGs ubicados en zonas aledañas. En la región NW de México se presenta una vaguada, la cual está asociada al centro de bajas presiones que se observa en superficie.

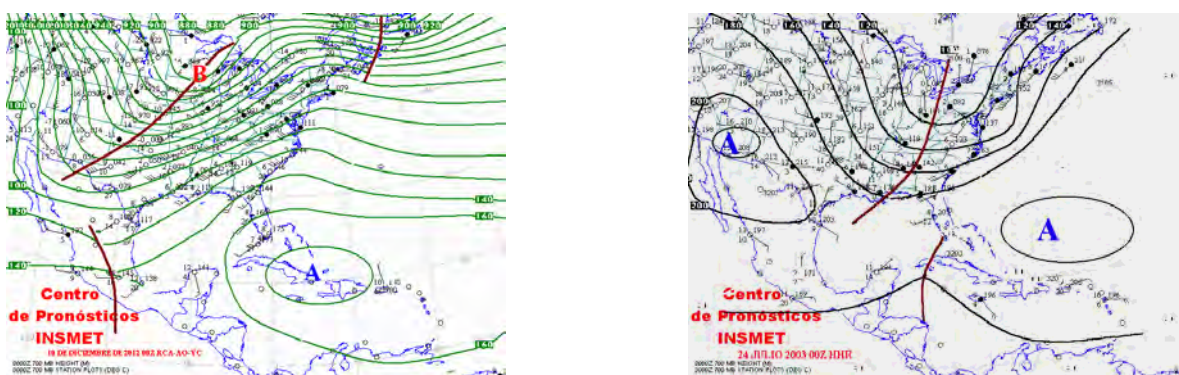


Figura 3-35: Mapas de altitud en el nivel de 700 hPa que ejemplifica a los patrones sinópticos: a) SLP-AN15 y b) SLP-AN16

SLP-AN15: Patrón sinóptico representado, en el nivel de 700 hPa, por la presencia de flujo del viento proveniente del SW sobre el territorio mexicano. Sobre el centro de México se observa una pequeña vaguada producto de la curvatura de las isohipsas de dicho flujo. Una vaguada se extiende

por el centro del continente americano hasta el NW de México. La región del Mar Caribe presenta un débil gradiente bórico y sobre las Antillas Mayores se observan pequeños CAGs.

SLP-AN16: Durante este patrón sinóptico se presenta un débil gradiente bórico sobre todo el territorio mexicano, Golfo de México y Mar Caribe, en el nivel de 700 hPa. Se observa un CAG sobre el NW de México, el cual está asociado con el centro de bajas presiones en superficie, y otro CAG sobre el norte de las Antillas Mayores y Arco de las Antillas. Entre estos dos CAGs se presentan vaguadas, lo cual produce inestabilidad y desarrollo convectivo.

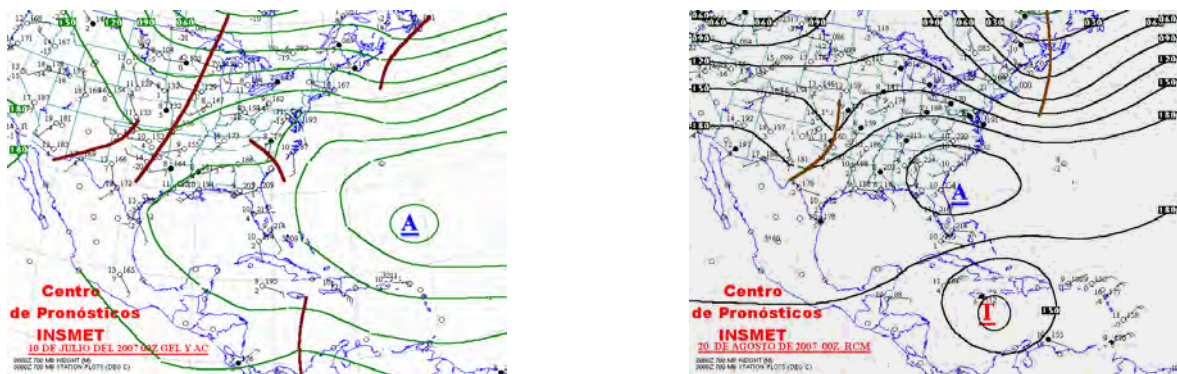


Figura 3-36: Mapas de altitud en el nivel de 700 hPa que ejemplifica a los patrones sinópticos: a) SLP-AN17 y b) SLP-AN18

SLP-AN17: Patrón sinóptico que se representa, en el nivel de 700 hPa, por un débil gradiente bórico sobre el territorio mexicano. Se observa el acople vertical del NASH desarrollado sobre la región del Atlántico, con su configuración isobárica extendida sobre toda la región del Mar Caribe, Golfo de México y México. Esta influencia del NASH, con la distancia de las isohipsas en la región periférica, es lo que provoca el débil gradiente bórico sobre México. Se observan vaguadas sobre el continente americano y el NW de México, así como vaguadas sobre el Mar Caribe, los cuales se pueden asociar con el acople vertical de las ondas del este en superficie.

SLP-AN18: Durante este patrón sinóptico se continúa observando un débil gradiente bórico sobre el territorio mexicano en el nivel de 700 hPa como en los patrones sinópticos SLP-AN16 y SLP-AN17. Se observa el acople vertical de la ciclogénesis en superficie, representado por CBGs en las zonas adyacentes al territorio mexicano como Mar Caribe, Golfo de México y Océano Pacífico próximo al sur de México.

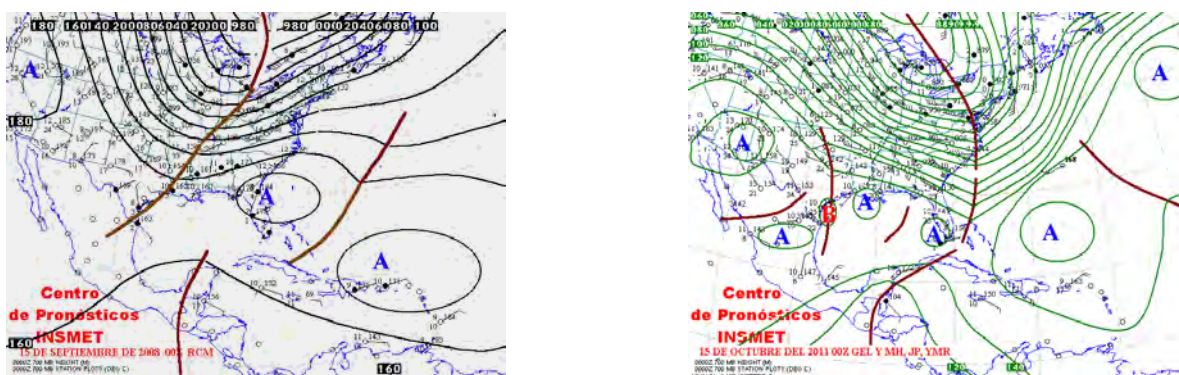


Figura 3-37: Mapas de altitud en el nivel de 700 hPa que ejemplifica a los patrones sinópticos: a) SLP-AN19 y b) SLP-AN20

SLP-AN19: Patrón sinóptico que presenta un débil gradiente bórico sobre el territorio mexicano en el nivel de 700 hPa como en los patrones sinópticos SLP-AN16 al SLP-AN18, pero esta vez con la débil influencia de vaguadas provenientes del continente americano. Predominan bajos valores de geopotencial sobre el Mar Caribe, Golfo de México y zonas aledañas al territorio mexicano, lo que conlleva al desarrollo de vaguadas. Es importante destacar en este patrón sinóptico el desacople vertical en la estructura de las ondas del este. Mientras que en superficie las ondas del este se disipan, por lo general, antes de llegar a América Central y sudeste de México, en este nivel es común observar vaguadas sobre estas áreas. Sobre el Océano Atlántico predominan pequeños CAGs que están asociados a la presencia del NASH en superficie.

SLP-AN20: Durante este patrón sinóptico se observa la presencia de pequeños CAGs sobre el centro de México, en el nivel de 700 hPa. Se presentan condiciones de inestabilidad atmosférica, al presentarse la alternancia entre CAGs y CBGs sobre el territorio mexicano, Golfo de México y Mar Caribe. Abunda la presencia de vaguadas, lo cual está relacionado con la presencia de bajas presiones en superficie, desplazamiento de ondas del este y la existencia de vaguadas. Se observa, con marcada frecuencia, la presencia de CBGs sobre el Golfo de México y un CAG sobre el NW de México, relacionado con el centro de bajas presiones sobre dicha región.

Análisis de los patrones sinópticos de SLP en el nivel de 850 hPa

En el caso de la relación porcentual de ocurrencia de cada uno de los clústeres de G850 con cada uno de los clústeres de SLP (ver cuadro 3-17), se puede observar una relación directa en el comportamiento de los valores de anomalías estandarizadas de SLP con los de G850. Cuando se presentan valores positivos (negativos) de anomalías estandarizadas de SLP, se pueden observar valores valores positivos (negativos) de anomalías estandarizadas de G850. Esta relación posee un amplio sentido físico ya que muestra un mayor acople vertical de los patrones en superficie con los patrones en el nivel de altura de 850, a unos 1.17 km aproximadamente.

Cuadro 3-17: Relaciones entre los patrones SLP y G850, expresado en valores porcentuales.

SLP	G850-AN01	G850-AN02	G850-AN03	G850-AN04	G850-AN05	G850-AN06	G850-AN07	G850-AN08	G850-AN09	G850-AN10	G850-AN11	G850-AN12	G850-AN13	G850-AN14	G850-AN15	G850-AN16	G850-AN17	G850-AN18	G850-AN19	G850-AN20
SLP-AN01	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	27	6	1	0	0	0	0	0	0	0
SLP-AN02	1	0	0	0	0	3	2	0	0	0	13	17	0	0	0	32	28	4	0	0
SLP-AN03	1	2	0	0	0	0	7	0	0	0	0	31	6	0	0	0	41	11	2	0
SLP-AN04	1	16	12	1	0	0	5	0	0	0	10	10	11	1	0	0	16	18	3	0
SLP-AN05	4	25	42	9	0	0	4	5	1	0	2	2	1	0	0	2	3	2	0	0
SLP-AN06	8	0	0	1	0	38	3	0	1	1	30	4	2	1	0	0	0	1	1	0
SLP-AN07	18	0	0	0	0	44	6	1	2	1	13	5	3	2	0	3	1	0	0	0
SLP-AN08	9	8	1	2	2	1	14	2	3	0	1	5	18	7	0	0	2	20	4	0
SLP-AN09	2	13	28	25	4	0	3	12	4	0	0	0	5	3	0	0	0	1	1	0
SLP-AN10	12	22	29	13	1	1	4	13	3	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
SLP-AN11	5	0	0	1	3	4	0	0	2	2	3	0	1	9	0	1	8	17	0	0
SLP-AN12	7	0	0	1	22	4	0	1	3	27	0	0	1	3	0	0	0	3	5	0
SLP-AN13	3	1	1	10	42	0	0	1	7	13	0	0	1	6	4	3	0	6	0	0
SLP-AN14	3	2	5	29	11	1	1	6	20	11	0	0	2	6	1	0	1	0	0	0
SLP-AN15	11	12	5	2	0	4	36	22	11	1	0	2	3	0	0	0	0	0	0	0
SLP-AN16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	5	0	0	2	27	65
SLP-AN17	0	0	0	0	3	0	0	0	0	5	0	0	0	2	53	0	0	1	8	27
SLP-AN18	0	0	0	1	10	0	0	0	2	25	0	0	0	0	22	0	0	2	15	3
SLP-AN19	1	0	0	4	5	0	0	0	18	8	0	1	6	35	2	0	0	9	10	0
SLP-AN20	2	2	2	1	0	3	11	13	23	1	1	10	22	5	0	0	2	3	0	0

La descripción sinóptica de los patrones de SLP en el nivel de 850 hPa se muestra a continuación, basándose en la relación porcentual existente anteriormente explicada (ver cuadro 3-17).

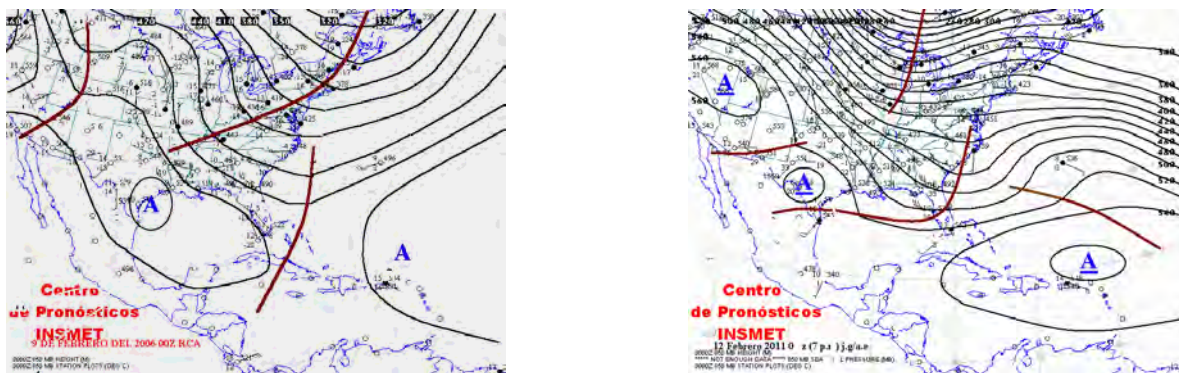


Figura 3-38: Mapas de altitud en el nivel de 850 hPa que ejemplifica a los patrones sinópticos: a) SLP-AN01 y b) SLP-AN02

SLP-AN01: Patrón sinóptico representado, en el nivel de 850 hPa, por la presencia de un débil gradiente bórico sobre el centro de México. Se observa la presencia de un CAG sobre el NE de México y un CBG sobre el NW, los cuales están relacionado con las bajas extratropicales en superficie. Por otra parte, se presentan vaguadas extendidas sobre la región del Golfo de México, Antillas Mayores y la costa oriental del continente americano, relacionadas con la presencia de sistemas frontales en superficie. También se observan CAGs sobre el oeste del continente americano, que están asociadas a la presencia de anticiclones de origen continental migratorio en superficie.

SLP-AN02: Durante este patrón sinóptico se muestra la presencia de CAGs sobre todo el territorio mexicano, en el nivel de 850 hPa. Estos CAGs están relacionados con la presencia de anticiclones de origen continental migratorio en superficie, provenientes de latitudes medias y altas. Entre estos CAGs se presentan vaguadas, con constituyen el reflejo en la altura de los sistemas frontales en superficie, ejemplo de ello es la situada en la costa oriental del continente americano.

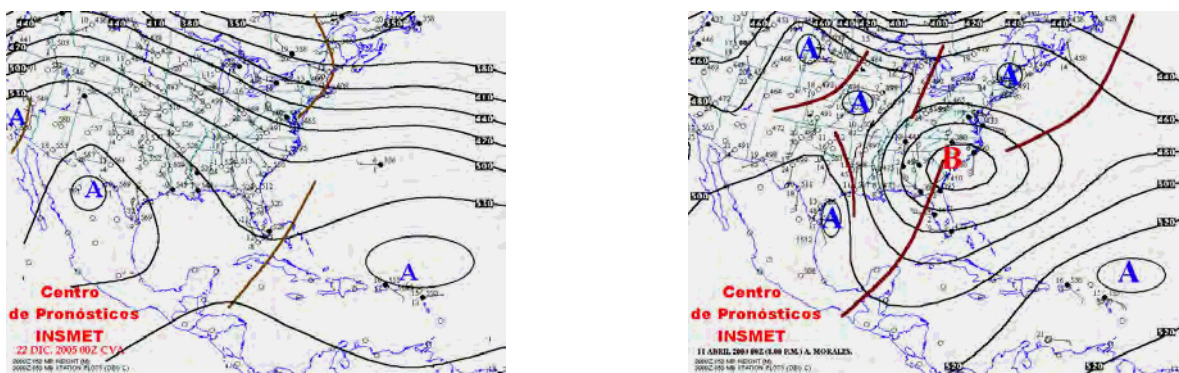


Figura 3-39: Mapas de altitud en el nivel de 850 hPa que ejemplifica a los patrones sinópticos: a) SLP-AN03 y b) SLP-AN04

SLP-AN03: Patrón sinóptico representado por la influencia de CAGs sobre el centro de México en el nivel de 850 hPa. Estos CAGs se encuentran ubicados, por lo general, sobre la región norte de México o SW del continente americano. De manera general este patrón sinóptico corresponde a anomalías positivas de altura geopotencial en 850 hPa, por lo que es común observar un alto gradiente de geopotencial en las configuraciones de las isohipsas y la formación de CAGs.

SLP-AN04: Durante este patrón sinóptico se presenta la influencia de un CBG sobre casi toda la región de estudio en el nivel de 850 hPa. Dicho CBG, asociado a bajas extratropicales en superficie, se encuentra ubicado sobre la parte oriental del continental del continente americano y sus isohipsas se extienden hasta el norte del Mar Caribe, Península de Yucatán y Golfo de México. Asociado a este CBG se observan vaguadas que se extienden hasta el centro y sur de México, que se visualizan en superficie como sistemas frontales. Por lo general predomina un débil gradiente bórico sobre el territorio mexicano.

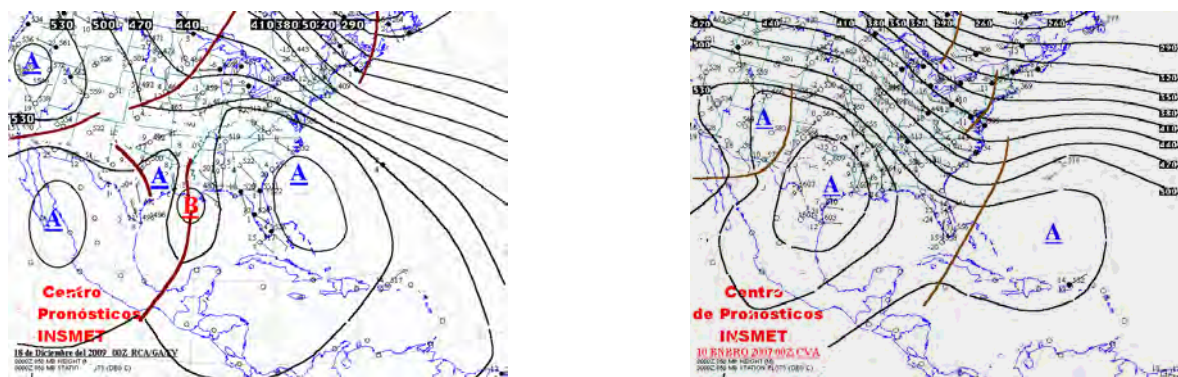


Figura 3-40: Mapas de altitud en el nivel de 850 hPa que ejemplifica a los patrones sinópticos: a) SLP-AN05 y b) SLP-AN06

SLP-AN05: Patrón sinóptico que muestra la presencia de CAGs sobre la región de estudio en el nivel de 850 hPa, que corresponden en superficie con al influencia de los anticiclones de origen continental migratorio. Se presentan, además, ejemplos de bajas de corte debido al fuerte gradiente de geopotencial generado por la cercanía de los CAGs. Permanece la presencia de vaguadas, originadas por estos CBGs, las cuales están asociados con los sistemas frontales en superficie. Sobre el centro y sur de México se presenta la influencia de estas vaguadas y sobre el NW del país la presencia de CAGs bien desarrollados.

SLP-AN06: Este patrón sinóptico muestra la presencia de una vaguada en la altura en dirección N-S sobre el centro de México, en el nivel de 850 hPa. Dicha vaguada se origina debido a la convergencia del viento provocado por la presencia de dos CAGs, uno sobre la costa pacífica central de México y otro sobre la parte NW del Golfo de México. Sobre el Mar Caribe, Antillas Mayores y Atlántico Occidental predominan los altos valores de geopotencial, por lo que se pueden observar CAGs. La circulación de los oestes se presenta marcadamente sobre el continente americano, aun-

que en la costa oriental se observa una vaguada que puede estar relacionada con débiles sistemas frontales en superficie.

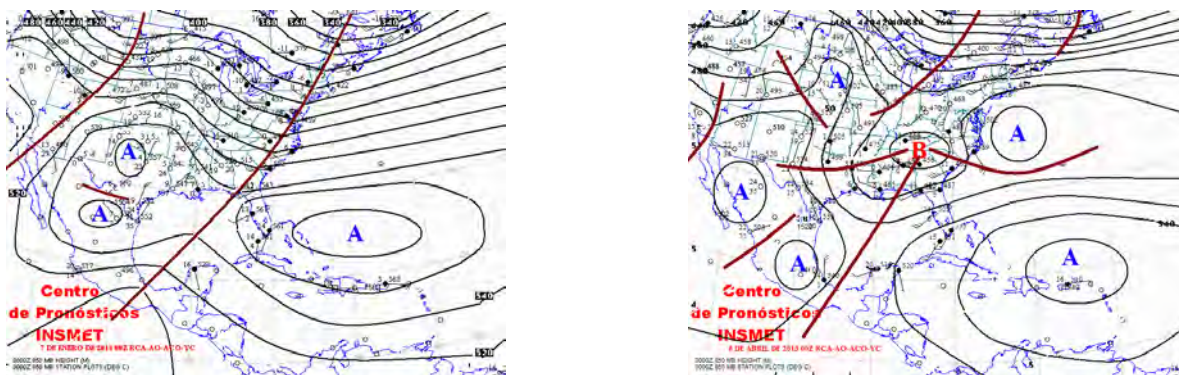


Figura 3-41: Mapas de altitud en el nivel de 850 hPa que ejemplifica a los patrones sinópticos: a) SLP-AN07 y b) SLP-AN08

SLP-AN07: Patrón sinóptico que representa la presencia de una vaguada en la altura en dirección NE-SW sobre el centro de México, en el nivel de 850 hPa. La configuración sinóptica de este patrón muestra la presencia de CAGs sobre el norte y nordeste de México, así como en la parte norte del Mar Caribe, norte de Cuba y Atlántico occidental próximo a Las Bahamas. Es importante destacar que la vaguada que tiene su paso sobre el centro de México, se extiende desde altas latitudes. Por otra parte se presenta una vaguada sobre el NW de México y el occidente del continente americano. Estas vaguadas están asociadas sistemas frontales y la presencia de bajas extratropicales en superficie.

SLP-AN08: Este patrón sinóptico muestra la influencia de CAGs sobre el territorio mexicano con la presencia de vaguadas en la zona de separación de dichos CAGs, en el nivel de 850 hPa. Lo más característico de este patrón, en este nivel de 850 hPa, consiste en la presencia de un CBG sobre el SE del continente americano, del cual se extienden varias vaguadas que están relacionadas con sistemas frontales en superficie. Sobre el Mar Caribe, Antillas Mayores y el Atlántico Tropical predominan los altos valores de geopotencial, con un CAG ubicado sobre el norte del Arco de las Antillas por lo general.

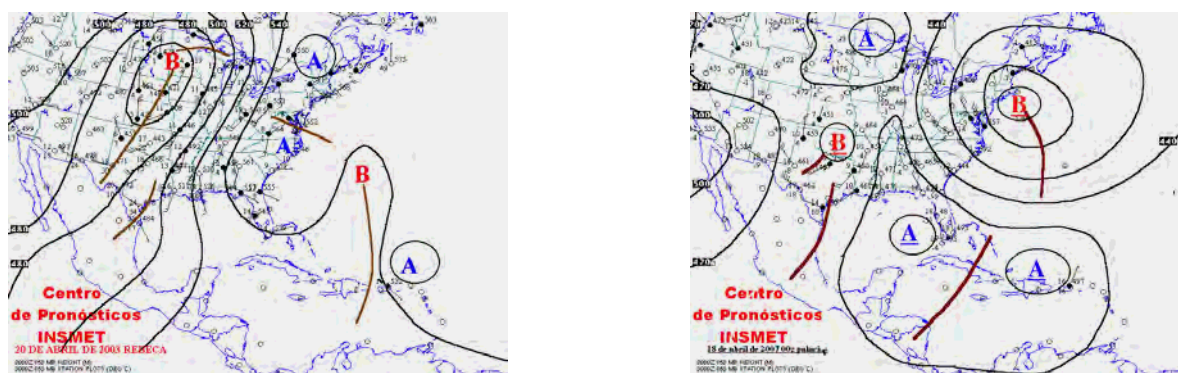


Figura 3-42: Mapas de altitud en el nivel de 850 hPa que ejemplifica a los patrones sinópticos: a) SLP-AN09 y b) SLP-AN10

SLP-AN09: Patrón sinóptico representado por la presencia de un CBG sobre el centro de México en el nivel de 850 hPa. Se muestran CBGs bien definidos sobre el continente americano y el Atlántico Norte central. Estos CBGs influyen en la formación de vaguadas, las cuales se relacionan con la presencia de hondonadas en superficie o centros de bajas presiones. En la mayor parte del continente mexicano predomina un débil gradiente de geopotencial.

SLP-AN10: Este patrón sinóptico está representado por la presencia de una vaguada sobre el centro de México en el nivel de 850 hPa. Se observan dos áreas de alto geopotencial bien desarrolladas, una sobre el Mar Caribe y las Antillas Mayores, y otra sobre el Océano Pacífico próximo a la costa NW de México. Estas áreas de alto geopotencial influyen en la formación de la vaguada en la zona central de México. Por otra parte, se presentan CBGs, principalmente sobre el centro-sur del continente americano y sobre la Península de Nueva Escocia.

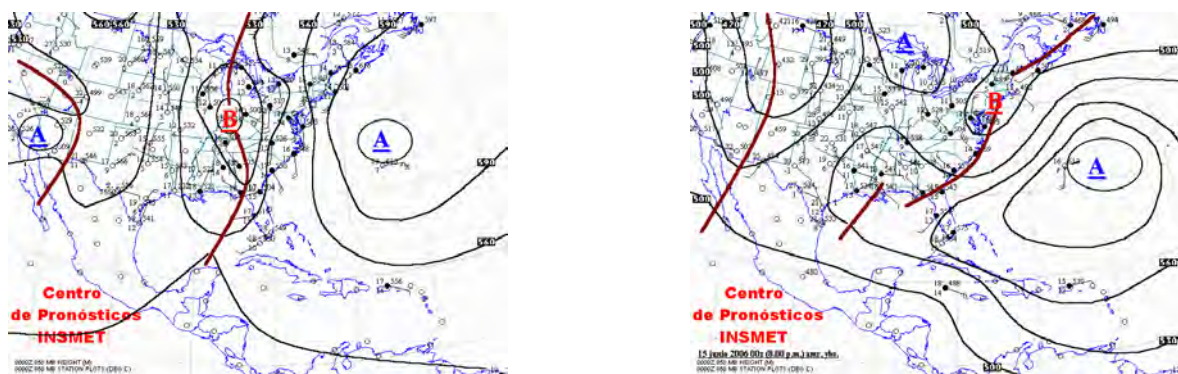


Figura 3-43: Mapas de altitud en el nivel de 850 hPa que ejemplifica a los patrones sinópticos: a) SLP-AN11 y b) SLP-AN12

SLP-AN11: Patrón sinóptico representado por un débil gradiente de geopotencial sobre el centro de México en el nivel de 850 hPa. Este débil gradiente de geopotencial se debe a la separación de las isohipsas debido a la presencia de un CAG sobre el NW de México y un CBG sobre el

centro-este de los EE.UU. Se observan vaguadas en las circulaciones de ambos centros. En las zonas aledañas al territorio mexicano predomina un débil gradiente de geopotencial.

SLP-AN12: Durante este patrón sinóptico se presenta la débil influencia del NASH sobre el territorio mexicano en el nivel de 850 hPa. Se observa la presencia de un CAG sobre el Atlántico que corresponde al desarrollo vertical del NASH en superficie. Debido a la distancia del NASH hasta el territorio mexicano, se puede observar un débil gradiente bórico sobre la región. Sobre el NW de México se presenta una vaguada que está relacionada con el centro de bajas presiones en superficie.

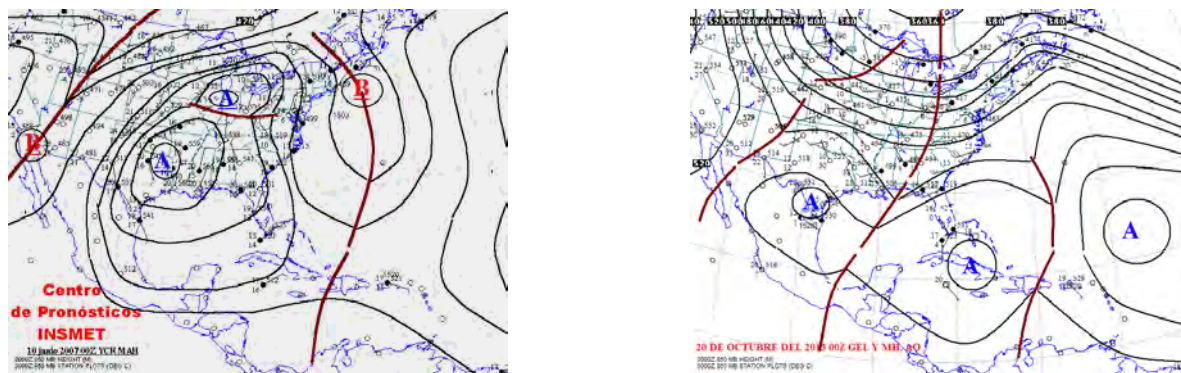


Figura 3-44: Mapas de altitud en el nivel de 850 hPa que ejemplifica a los patrones sinópticos: a) SLP-AN13 y b) SLP-AN14

SLP-AN13: Patrón sinóptico representado por la presencia de CAGs sobre el territorio mexicano y una vaguada que los separa sobre el centro de México en dirección NW-SE, en el nivel de 850 hPa. La presencia de estos CAGs está relacionada con los centros de bajas presiones en superficie, de manera que cierran la circulación vertical en los niveles bajos de la atmósfera. Sobre el Mar Caribe, Antillas Mayores y Atlántico Occidental se observa la presencia de vaguadas, lo cual puede estar relacionada con la convección característica de los meses estivales.

SLP-AN14: Este patrón sinóptico está representado por la influencia de CAGs sobre la región de estudio en el nivel de 850 hPa y, por ende, sobre el centro de México. Estos CAGs corresponden al cierre de la circulación de los centros de bajas presiones en superficie, mostrando poco acople en la vertical. Se presentan vaguadas extendidas meridionalmente, que pueden ser las responsables de organizar la convección y estar asociadas a las ondas del este observadas en superficie.

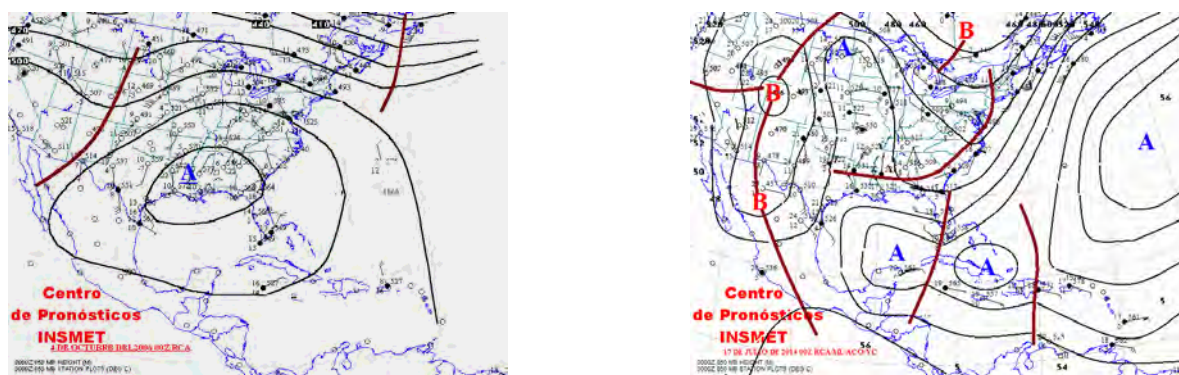


Figura 3-45: Mapas de altitud en el nivel de 850 hPa que ejemplifica a los patrones sinópticos: a) SLP-AN15 y b) SLP-AN16

SLP-AN15: Patrón sinóptico representado por la influencia de altos valores de geopotencial sobre todo el continente mexicano en el nivel de 850 hPa. Se observa un CAG sobre el SE del continente americano que su gradiente de geopotencial se extiende por el Golfo de México y el territorio mexicano. Este CAG se encuentra asociado a un centro de altas presiones en superficie, mostrando buen acople vertical. Sobre el NW de México predomina la presencia de una vaguada, relacionada con centros de bajas presiones en superficie. Por otra parte, se observan vaguadas sobre el Mar Caribe, que pueden estar relacionadas con la ciclogénesis en superficie.

SLP-AN16: Durante este patrón sinóptico se observa una vaguada sobre el centro de México en el nivel de 850 hPa, que se extiende desde un CBG sobre el N-NW de México. Este CBG corresponde al centro de bajas presiones en superficie. Esta vaguada presenta un acople vertical con la hondonada que se presenta en superficie. Sobre el Atlántico, Mar Caribe y Golfo de México predominan los altos valores de geopotencial, como reflejo del NASH en la altura.

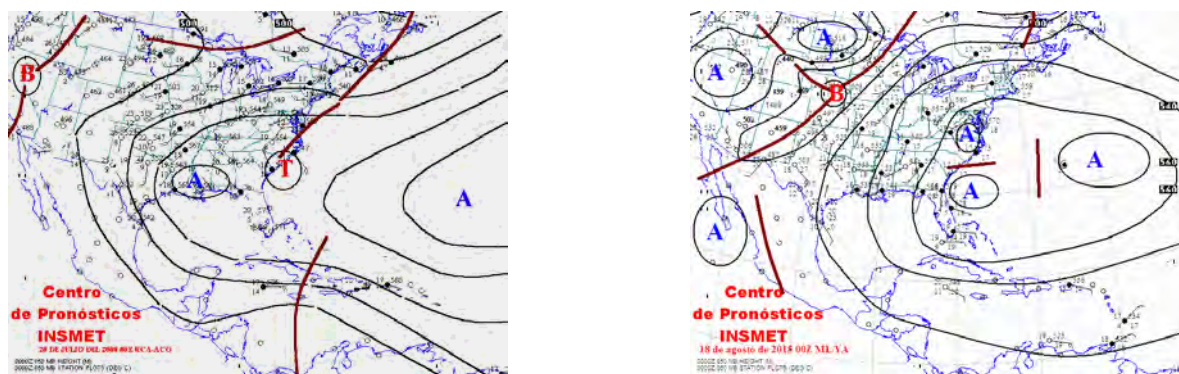


Figura 3-46: Mapas de altitud en el nivel de 850 hPa que ejemplifica a los patrones sinópticos: a) SLP-AN17 y b) SLP-AN18

SLP-AN17: Patrón sinóptico representado por la influencia de CAGs sobre el territorio mexicano en el nivel de 850 hPa, ubicados sobre el continente americano. De modo general se observa la

influencia de altos valores de geopotencial sobre toda la región de estudio, lo cual constituye un reflejo del NASH en superficie. Se observan CBGs relacionados con la presencia de ciclones tropicales en superficie, pero con cierto grado de desacople en la vertical. Sobre el centro de México predomina la influencia de los altos valores de geopotencial, con un fuerte gradiente en su configuración sinóptica.

SLP-AN18: Durante este patrón sinóptico se observa una vaguada sobre el centro de México en el nivel de 850 hPa. Esta vaguada se forma debido a la separación entre la configuración de un CAG asociado al NASH en superficie y otro CAG sobre el NW de México que corresponde al cierre de la circulación vertical del centro de bajas presiones en superficie sobre dicha región. Esta vaguada condiciona el desarrollo de centros de bajas presiones en superficies. Se observa, además, otra vaguada sobre el SW del continente americano que se forma por la separación entre el CAG sobre el NW de México y otra sobre el NW de los EE.UU. Dicha vaguada domina el comportamiento del tiempo en la región norte de México, próxima a los EE.UU.

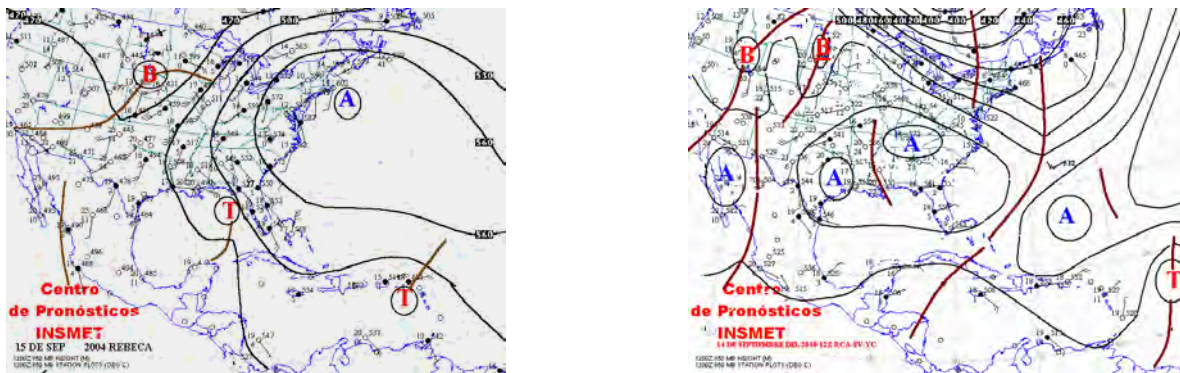


Figura 3-47: Mapas de altitud en el nivel de 850 hPa que ejemplifica a los patrones sinópticos: a) SLP-AN19 y b) SLP-AN20

SLP-AN19: Patrón sinóptico representado por la presencia de una vaguada sobre la costa occidental del territorio mexicano, que modula las condiciones del tiempo sobre el centro del país, en el nivel de 850 hPa. Esta vaguada está relacionada con la presencia de la ciclogénesis en superficie que se presenta dura este patrón sinóptico. Se evidencia también desarrollo de ciclones tropicales sobre el Mar Caribe y Golfo de México. La presencia de estos CBGs bien desarrollados sobre las áreas adyacentes al territorio mexicano condicionan un débil gradiente de geopotencial sobre gran parte del país en este nivel de altura.

SLP-AN20: Durante este patrón sinóptico se presentan condiciones similares al patrón sinóptico SLP-AN19 en el nivel de 850 hPa, pero con una mayor influencia de los CAGs asociados al NASH en superficie. Se observa la presencia de CAGs sobre el centro y sur del continente americano, mientras que sobre el centro-norte predominan los CBGs. Estas circulaciones diferentes, con poca distancia entre ellos, propicia la formación de vaguadas que están relacionadas con la presencia de

centros de bajas presiones en superficie. Sobre la cuenca del Atlántico se presentan CBGs asociados al buen acople en la vertical de los ciclones tropicales que son bien definidos en superficie. Por otra parte, se observa un buen acople vertical del NASH, de modo que el gradiente de geopotencial en este nivel de altura se extiende hasta el territorio mexicano.

3.3. Comportamiento de la persistencia y las transiciones entre los patrones sinópticos en superficie y altura

La persistencia de los patrones sinópticos de SLP permite conocer cuántos días puede permanecer la misma situación sinóptica influyendo sobre una región de estudio dada, en este caso la región central de México. La utilidad de este análisis radica en conocer qué probabilidades existen de que dicho patrón sinóptico pueda permanecer en una determinada escala temporal. De esta forma, el estudio de la persistencia se puede utilizar como una herramienta para el pronóstico del tiempo. El cuadro 3-18 muestra la persistencia de los 20 patrones sinópticos de SLP. Como se puede observar, las filas representan los patrones sinópticos de SLP y las columnas la cantidad de días consecutivos en los cuales se presentaron. De esta forma, los valores representan el número de casos donde fue persistente cada patrón sinóptico de SLP en determinada cantidad de días.

Cuadro 3-18: Persistencia en días de los patrones sinópticos de SLP

Clústeres/Días	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22			
SLP-AN01	104	67	36	15	15	5	5	4	1	5	1	1				1		1							
SLP-AN02	126	66	48	25	15	5	5	4	2	1	2	1													
SLP-AN03	145	76	42	28	7	7	4	4	4	1	1			1											
SLP-AN04	186	81	27	18	7	2		2																	
SLP-AN05	80	50	36	16	20	4	2	5	2	2	2	2	2	1	1	1					1				
SLP-AN06	102	72	40	20	16	12	10	4	3		2	2	1	1		1									
SLP-AN07	138	67	28	24	10	3	1	2	4				1												
SLP-AN08	165	82	23	18	4	5	1	3			1														
SLP-AN09	146	61	41	20	15	6	3	2	2																
SLP-AN10	118	64	33	15	7	5	1		1	1															
SLP-AN11	98	49	20	1	4	1	1																		
SLP-AN12	137	62	33	9	10	3	5	3	2	2		1								1					
SLP-AN13	161	76	29	18	12	5	5	1	1								1								
SLP-AN14	141	39	14	8	3		2													1					
SLP-AN15	93	88	44	28	11	12	8	4	2		1	1		1		1									
SLP-AN16	95	101	57	21	7	12	9	7	2	5	2	5	2		1	1	1			2	2		2		
SLP-AN17	211	98	35	14	5	4	3	3	2																
SLP-AN18	172	107	45	21	11	5	4		2	2	1														
SLP-AN19	151	86	36	22	14	12	10	10	7	4	2	1					1			1					
SLP-AN20	131	81	49	26	11	7		5		2		1						1			1				

Se puede observar en el cuadro 3-18 que todos los patrones sinópticos presentan casos en los que su persistencia es mayor o igual a siete días. Otros patrones como SLP-AN01, SLP-AN05, SLP-

AN06, SLP-AN12 al SLP-AN16, SLP-AN19 y SLP-AN20, muestran casos en que su persistencia es mayor o igual a 15 días. Por su parte, el patrón sinóptico SLP-AN16 presenta la mayor persistencia al presentar dos casos donde permaneció consecutivamente durante 22 días.

La información anterior puede ser verificada mediante la persistencia promedio de cada patrón sinóptico. Este valor se determinó promediando los días en que se presentó cada patrón sinóptico y que permaneció consecutivamente. La figura 3-48 muestra los valores de persistencia promedio de los patrones sinópticos de SLP.

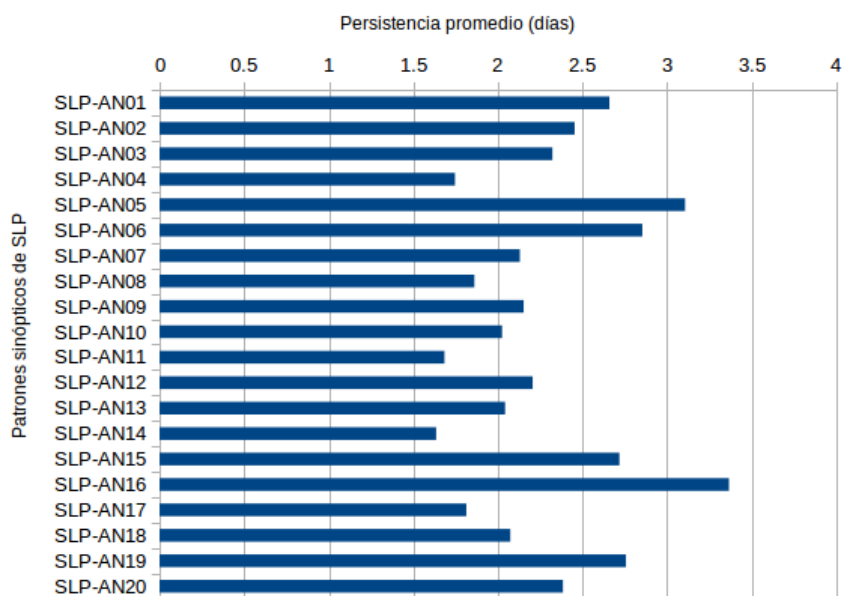
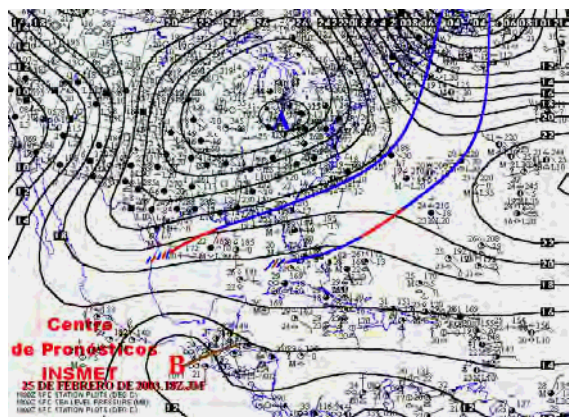


Figura 3-48: Persistencia promedio de los patrones sinópticos de SLP

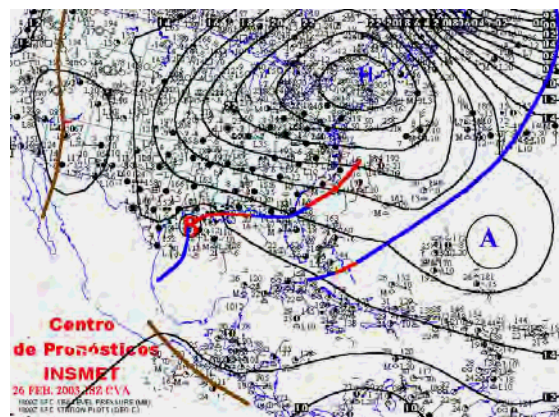
Se puede observar que el patrón sinóptico SLP-AN16 presenta la mayor persistencia promedio, con un valor de 3.37 días. De este modo, se puede decir que cuando se presenta este patrón es muy probable que tenga una duración entre 3 y 4 días, aunque como se muestra en el cuadro 3-18, hay casos en que dure en los que dura más de 15 días. Este patrón sinóptico corresponde a la influencia del NASH sobre toda la región del Atlántico, Mar Caribe y puede extender su configuración isobárica hasta el territorio mexicano. El NASH es considerado uno de los centros de acción permanentes en el Hemisferio Norte, por lo que es muy común que se presente con una mayor persistencia, principalmente en el período húmedo.

Otro patrón sinóptico que supera el valor de persistencia de 3 días es el SLP-AN05, con 3.11 días. Este patrón sinóptico es característico del período seco, fundamentalmente en los trimestres DEF y MAM. Su caracterización sinóptica consiste en la presencia de sistemas frontales estacionarios sobre el continente americano, que su extensión meridional puede llegar hasta el territorio mexicano,

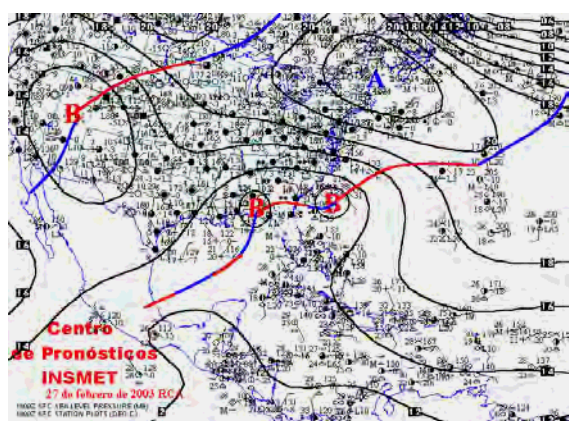
Golfo de México y las Antillas Mayores (ver 3-49).



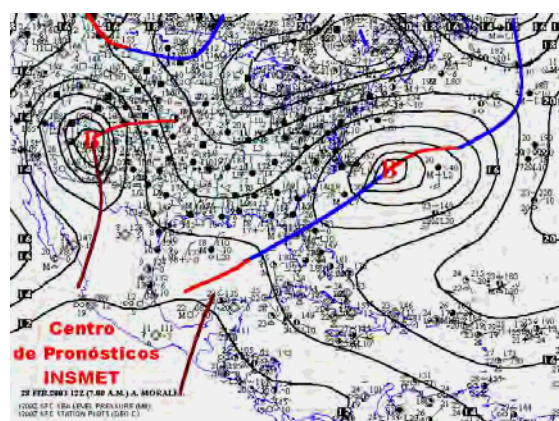
(a) 25 de febrero del 2003



(b) 26 de febrero del 2003



(c) 27 de febrero del 2003



(d) 28 de febrero del 2003

Figura 3-49: Ejemplos de la persistencia del patrón sinóptico SLP-AN05 para los días del 25 al 28 de febrero del 2003. Fuente: INSMET, Cuba.

Por otra parte, el estudio de las posibles transiciones entre los patrones sinópticos permite reconocer la probabilidad de ocurrencia de un patrón sinóptico determinado una vez que se haya presentado otro. De esta forma, conociendo las probabilidades estadísticas de las transiciones y las salidas de modelos de circulación general que sean utilizados para el pronóstico del tiempo, se puede pronosticar la situación sinóptica de los siguientes días con un mayor grado de exactitud.

El cuadro 3-19 muestra el porcentaje de ocurrencia de las posibles transiciones entre los patrones sinópticos de SLP. Puede observarse una estructura parecida a una matriz diagonal, lo cual valida el cumplimiento de la función de vecindad del método SOM. Las transiciones más probables entre los patrones sinópticos tienen su mayor porcentaje basados en las neuronas más similares del mapa bidimensional creado durante el algoritmo del método SOM. No obstante, se observan algunas

Cuadro 3-19: Transiciones entre patrones sinópticos de SLP en cifras porcentuales. Las filas representan los patrones sinópticos antecedentes y las columnas los patrones sinópticos sucesores

Patrones SLP	SIP-AN01	SIP-AN02	SIP-AN03	SIP-AN04	SIP-AN05	SIP-AN06	SIP-AN07	SIP-AN08	SIP-AN09	SIP-AN10	SIP-AN11	SIP-AN12	SIP-AN13	SIP-AN14	SIP-AN15	SIP-AN16	SIP-AN17	SIP-AN18	SIP-AN19	SIP-AN20
SIP-AN02	21	-45	36	5	2	1	7	21	4	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0
SIP-AN03	2	19	28	1	1	4	22	4	2	2	0	0	0	0	7	1	0	0	1	6
SIP-AN04	3	2	19	24	2	2	7	18	7	1	0	2	2	4	1	0	0	1	0	3
SIP-AN05	11	3	4	32	12	3	0	6	18	3	0	1	0	4	0	0	0	0	0	1
SIP-AN06	47	19	5	3	6	23	1	12	3	5	0	0	0	3	0	0	0	0	0	1
SIP-AN07	0	1	14	11	0	0	7	12	2	4	1	8	15	3	4	1	2	1	0	1
SIP-AN08	0	0	3	10	10	0	1	19	24	3	3	14	7	5	1	0	0	0	0	0
SIP-AN09	0	0	1	6	23	9	6	2	21	1	1	2	6	20	0	0	0	0	0	1
SIP-AN10	4	4	5	4	0	14	2	7	2	1	18	5	2	0	16	6	2	5	4	0
SIP-AN11	0	0	0	0	1	3	8	9	3	3	13	19	2	1	10	24	1	1	1	1
SIP-AN12	0	0	0	0	2	0	1	9	12	0	26	11	1	0	0	0	0	0	0	0
SIP-AN13	0	0	0	0	2	0	1	2	6	3	36	3	3	12	11	0	0	0	0	0
SIP-AN14	1	1	4	4	4	4	5	11	2	3	17	0	3	3	0	0	2	2	2	27
SIP-AN15	0	0	2	1	0	0	0	6	1	0	6	3	4	0	0	40	23	11	1	1
SIP-AN16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	13	9	0	0	0	46	23	4	0
SIP-AN17	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	2	8	4	0	15	28	5	36	1	1
SIP-AN18	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	2	1	2	9	2	5	1	35	1	40
SIP-AN19	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	2	1	2	9	2	5	1	35	1	40
SIP-AN20	0	4	5	4	0	0	0	2	1	0	0	0	0	11	31	0	0	3	37	0

transiciones con altos valores de ocurrencia donde los patrones sinópticos involucrados no son tan cercanos topológicamente, pero sí presentan sentido físico en el análisis meteorológico sinóptico.

La transición del patrón sinóptico SLP-AN01 al patrón sinóptico SLP-AN02 resultó la del mayor porcentaje de ocurrencia, con un 48 % (ver cuadro **3-19**). Al analizar la situación sinóptica del patrón SLP-AN01 se puede observar que es más probable la presencia de un anticiclón de origen continental migratorio ubicado en el centro del continente americano como característica fundamental. Por su parte, el patrón sinóptico SLP-AN02 representa también la presencia de un anticiclón de origen continental migratorio pero ubicado, fundamentalmente, sobre la costa oriental del continente americano. Es notable la transición entre estos patrones, al ser muy probable que sea el mismo anticiclón de origen continental migratorio pero con una ubicación diferente de su centro debido al movimiento hacia latitudes más bajas y en dirección W-E.

Otra transición con un valor alto de frecuencia de ocurrencia, con respecto a otras, se presenta en el caso de los patrones sinópticos SLP-AN06 y SLP-AN01 con un 47 % de frecuencia (ver cuadro **3-19**). El patrón SLP-AN06, en su situación sinóptica, presenta el desplazamiento al norte de bajas extratropicales principalmente ubicadas sobre el centro-oeste de México, mientras que el patrón SLP-AN01 muestra una baja extratropical ubicada sobre el NW de México. Debido a que estas bajas extratropicales se desplazan en dependencia de la posición de los anticiclones de origen continental migratorio y en dirección SW-NE, es común que después de presentarse el patrón SLP-AN06 se presente el patrón SLP-AN01.

En el caso de los patrones sinópticos más característicos del período húmedo, las principales transiciones se presentan entre los patrones SLP-AN17 al SLP-AN16, del SLP-AN16 al SLP-AN17 y una alta probabilidad de transición entre los patrones SLP-AN18, SLP-AN19 y SLP-AN20 pero poco determinada por sus características sinópticas (ver cuadro **3-19**). Las principales situaciones presentes durante estos patrones se basan en la influencia del NASH bien desarrollado sobre el Atlántico, el movimiento de ondas del este por el Mar Caribe hasta adentrarse al Océano Pacífico, la presencia de hondonadas en superficie y la formación de ciclones tropicales. De esta forma, al ser sistemas en continuo movimiento, son muy probables las transiciones entre estos patrones con un alto grado de probabilidad debido a que son muy similares sinópticamente y sus diferencias consisten en las diferentes posiciones de estos sistemas meteorológicos.

4 Conclusiones

El desarrollo de este trabajo de investigación permitió obtener algunas conclusiones acerca de la metodología empleada y los resultados obtenidos. De manera general, se dio cumplimiento a la hipótesis planteada y al problema de investigación, ya que quedaron identificados veinte patrones sinópticos anuales y de los centros principales de la circulación atmosférica a gran escala que influyen en el comportamiento de tiempo en el centro de México. Mediante el empleo de las anomalías estandarizadas respecto a la media anual del comportamiento de las variables analizadas se pudo identificar los principales centros cuasi-permanentes de la circulación planetaria sobre el territorio mexicano, como el NASH y la influencia de anticiclones de origen continental migratorio de origen continental. A continuación se presentan algunas conclusiones importantes del estudio realizado.

Estudios anteriores, próximos a la región de estudio, mostraron resultados importantes en relación con este trabajo. Sáenz y Durán-Quesada (2015) reconocieron los principales patrones de gran escala que influyen en el comportamiento del viento en bajos niveles sobre América Central, sin considerar el comportamiento de los centros de altas y bajas presiones en superficie, que determinan las condiciones de tiempo sinóptico sobre la región. Por su parte, Díaz-Esteban y Raga (2018) analizaron los regímenes de tiempo que influyen en el comportamiento de la precipitación sobre el SE de México, centrandó su estudio en los centros cuasi-permanentes de la circulación atmosférica de la región y de índices de teleconexión atmosféricos como ENSO. De esta forma, tanto Díaz-Esteban y Raga (2018) como Cavazos (1999), para el caso de la región del NE de México, reconocieron la influencia de los patrones de gran escala en diferentes regiones del territorio mexicano sin realizar un análisis detallado de las condiciones de tiempo sinóptico. En el presente trabajo se realizó el análisis de los patrones sinópticos detectados considerando los centros cuasi-permanentes y la influencia de los fenómenos de la circulación atmosférica a gran escala en ellos sobre México, principalmente sobre la región central. Además, se tomaron en cuenta los mapas sinópticos de los días seleccionados para el análisis de los patrones sinópticos, lo cual constituye una novedad en el territorio mexicano.

El método SOM permitió reconocer una marcada estacionalidad en el comportamiento de los patrones sinópticos de SLP, temperatura en superficie y en los diferentes niveles de altura. Por lo tanto, la clasificación sinóptica obtenida mostró una relación coherente entre la distribución de los patrones en escalas temporales menores con la situación sinóptica que representa. Se observó que los 20 patrones detectados por el método SOM se distribuyeron casi de manera equitativa entre los períodos seco y húmedo.

El patrón sinóptico anual con mayor frecuencia de ocurrencia en el período húmedo fue el SLP-AN16 que representa la influencia del NASH sobre la región del Mar Caribe y Golfo de México, la presencia de un centro de bajas presiones sobre el NW de México y una hondonada en superficie sobre el centro de México. Por otra parte, durante el período seco se detectó el patrón sinóptico SLP-AN06 como el más frecuente, representando la presencia de bajas extratropicales sobre el Golfo de México que conlleva al paso de sistemas frontales por la región central de México.

El uso del ciclo anual de los valores de las variables meteorológicas empleadas (SLP, temperatura en superficie y altura geopotencial en los niveles de presión de 850, 700 y 500 hPa) no permitió que el método SOM detectara las principales diferencias entre patrones sinópticos correspondientes a los meses de transición entre los períodos seco y húmedo y viceversa. Estos patrones regularmente se presentan durante los trimestres MAM y SON, donde los valores de anomalías estandarizadas son más cercanos a cero, y por ende, muy cercanos a la media climatológica de las variables. De este modo, al no remover el ciclo anual, al algoritmo no le fue posible diferenciar entre situaciones sinópticas como anticiclones de origen continental migratorio ubicados en la costa oriental del continente americano con la presencia del NASH próximo a esa región, ya que ambas pueden presentarse en estos trimestres. Por otra parte, el uso del ciclo anual permitió detectar algunos fenómenos de escala planetaria que influyen en las condiciones de tiempo sinóptico, tales como el NASH, que deben ser tomados en cuenta para un adecuado análisis sinóptico sobre la región de estudio.

Los problemas de diferenciación entre dos patrones sinópticos distintos con configuraciones isobáricas similares también se observaron cuando hubo presencia de bajas extratropicales y de centros de bajas presiones, principalmente en los trimestres MAM y SON, al tener valores similares de anomalías estandarizadas pero son patrones sinópticamente diferentes. La utilización de métodos subjetivos de análisis sinóptico y el conocimiento adecuado de los fenómenos meteorológicos en la zona de estudio ayudan a mejorar la detección de patrones y complementar el trabajo hecho por método SOM. De forma objetiva podría ser resuelta con un mejor filtrado de los datos dentro de estos meses de transición y obteniendo los valores de anomalías estandarizadas con el cálculo de la media y la desviación estándar en escalas temporales menores como períodos, trimestres, meses, etc.

Los patrones sinópticos con mayor persistencia en días consecutivos de ocurrencia fueron SLP-AN05 (3.11 días) durante el período seco y el SLP-AN16 durante el período húmedo (ver sección 3.3). El patrón SLP-AN05 representa la presencia de sistemas frontales estacionarios sobre el territorio mexicano (Fig.3-49), mientras que el SLP-AN16 (3.37 días) muestra la influencia de la configuración isobárica del NASH hasta el Golfo de México y próximo a la región central de México.

El análisis de las transiciones entre los patrones sinópticos de SLP validó el cumplimiento de la función de vecindad del método SOM como una de sus ventajas fundamentales. La transición más frecuente se observó entre los patrones sinópticos SLP-AN01 y SLP-AN02, con un 48 % de probabilidad. El patrón sinóptico SLP-AN01 representa la presencia de un anticiclón de origen continental migratorio ubicado en el centro de EE.UU. como característica fundamental; mientras que el patrón sinóptico SLP-AN02 representa la presencia de dicho anticiclón de origen continental migratorio pero más ubicado, fundamentalmente, sobre la costa oriental del continente norteamer-

ricano.

5 Recomendaciones

Después de realizar este trabajo de investigación se proponen las siguientes recomendaciones con el objetivo de dar continuidad a la resolución del problema científico y la exploración de nuevas metodologías. Por lo tanto, se propone:

- ✓ Mejorar el reconocimiento de los patrones sinópticos encontrados mediante el uso de las anomalías estandarizadas de los datos respecto a la media de los valores en escalas temporales menores como períodos, trimestres, meses, etc. Además, obtener una mejor diferenciación entre ellos mediante técnicas de filtrado espectral donde se puedan reconocer mejor las diferencias entre patrones sinópticamente similares típicos de los meses de transición entre los períodos seco y húmedo y viceversa.
- ✓ Analizar la variabilidad interanual y el comportamiento en escenarios climáticos futuros de los patrones sinópticos detectados para el centro de México mediante modelos climáticos.
- ✓ Validar el comportamiento de los patrones sinópticos detectados con datos de reanálisis de mayor resolución y con el valor agregado de utilizar modelos atmosféricos regionales basados en los reanálisis sobre la región de estudio.
- ✓ Comparar los resultados obtenidos mediante el método SOM con otros métodos de detección de patrones sinópticos, objetivos y subjetivos, para disminuir las deficiencias encontradas y obtener una mejor aproximación a las situaciones sinópticas representadas en los patrones.
- ✓ Aplicar esta propuesta de climatología sinóptica a diferentes estudios interdisciplinarios como comportamiento de fenómenos sinópticos, mesoescalares, de calidad del aire, hidrometeorológicos, bioclimáticos, etc. De este modo se podrá validar la utilidad de esta climatología sinóptica para diferentes fenómenos y en diferentes escalas temporales.

6 Referencias bibliográficas

Referencias

- Alessandro, A. P. (1998). *Contribuciones al estudio de la climatología sinóptica en la argentina* (Tesis Doctoral no publicada). Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires.
- Alexander, L. V., Uotila, P., Nicholls, N., y Lynch, A. (2010). A new daily pressure dataset for australia and its application to the assessment of changes in synoptic patterns during the last century. *Journal of Climate*, 23(5), 1111–1126.
- Asnani, G. (1993). Tropical meteorology vol-1.
- Azorín Molina, C., Serrano, V., Martín, S., Chen, D., Connell, B. H., Domínguez Durán, M. Á., ... López Moreno, J. I. (2014). Climatología sinóptica de la nubosidad a partir de datos avhrr en la península ibérica y baleares durante el semestre cálido mayo-octubre (1997-2011). *Publicaciones de la Asociación Española de Climatología. Serie A*; 9.
- Bakri, T., Jackson, P., y Doherty, F. (2017). A synoptic climatology of strong along-channel winds on the coast of british columbia, canada. *International Journal of Climatology*, 37(5), 2398–2412.
- Bárdossy, A., Stehlík, J., y Caspary, H.-J. (2002). Automated objective classification of daily circulation patterns for precipitation and temperature downscaling based on optimized fuzzy rules. *Climate Research*, 23(1), 11–22.
- Barry, R. G., y Carleton, A. M. (2001). *Synoptic and dynamic climatology*. Psychology Press.
- Barry, R. G., y Perry, A. H. (1973). *Synoptic climatology; methods and applications*. Routledge Kegan & Paul.
- Betts, N., Orford, J., White, D., y Graham, C. (2004). Storminess and surges in the south-western approaches of the eastern north atlantic: the synoptic climatology of recent extreme coastal storms. *Marine Geology*, 210(1-4), 227–246.
- Blair, D. (1998). The kirchhofer technique of synoptic typing revisited. *International journal of climatology*, 18(14), 1625–1635.
- Brown, D., Brownrigg, R., Haley, M., y Huang, W. (2012). The near command language (ncl)(version 6.0. 0). *UCAR/NCAR Computational and Information Systems Laboratory, Boulder, CO.*[Available online at <http://dx. doi. org/10.5065/D6WD3XH5>.].
- Businger, S. (1987). The synoptic climatology of polar-low outbreaks over the gulf of alaska and the bering sea. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 39(4), 307–325.
- Cannon, A. J., Whitfield, P. H., y Lord, E. R. (2002). Synoptic map-pattern classification using recursive partitioning and principal component analysis. *Monthly Weather Review*, 130(5), 1187–1206.

- Cassano, E. N., Glisan, J. M., Cassano, J. J., Gutowski Jr, W. J., y Seefeldt, M. W. (2015). Self-organizing map analysis of widespread temperature extremes in alaska and canada. *Climate Research*, 62(3), 199–218.
- Cassano, J. J., Uotila, P., y Lynch, A. (2006). Changes in synoptic weather patterns in the polar regions in the twentieth and twenty-first centuries, part 1: Arctic. *International Journal of Climatology*, 26(8), 1027–1049.
- Cavazos, T. (1999). Large-scale circulation anomalies conducive to extreme precipitation events and derivation of daily rainfall in northeastern mexico and southeastern texas. *Journal of Climate*, 12(5), 1506–1523.
- Chen, Kuo, Y.-H., Zhang, P.-Z., y Bai, Q.-F. (1991). Synoptic climatology of cyclogenesis over east asia, 1958-1987. *Monthly Weather Review*, 119(6), 1407–1418.
- Chen, Li, J., Guo, X., Wang, W., y Chen, D. (2008). Relationship between atmospheric pollution processes and synoptic pressure patterns in northern china. *Atmospheric Environment*, 42(24), 6078–6087.
- Coggins, J. H., McDonald, A. J., y Jolly, B. (2014). Synoptic climatology of the ross ice shelf and ross sea region of antarctica: k-means clustering and validation. *International journal of climatology*, 34(7), 2330–2348.
- Collins, M. J., Kirk, J. P., Pettit, J., DeGaetano, A. T., McCown, M. S., Peterson, T. C., ... Zhang, X. (2014). Annual floods in new england (usa) and atlantic canada: synoptic climatology and generating mechanisms. *Physical Geography*, 35(3), 195–219.
- Compagnucci, R. H. (1988). *Climatología sinóptica de las precipitaciones en cuyo* (Tesis Doctoral no publicada). Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires.
- Comrie, A. C., y Glenn, E. C. (1998). Principal components-based regionalization of precipitation regimes across the southwest united states and northern mexico, with an application to monsoon precipitation variability. *Climate Research*, 10(3), 201–215.
- Coronel, A. S. (2001). *Climatología sinóptica de las masas de aire que afectan a la república argentina* (Tesis Doctoral no publicada). Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires.
- Crimmins, M. A. (2006). Synoptic climatology of extreme fire-weather conditions across the southwest united states. *International Journal of Climatology*, 26(8), 1001–1016.
- Dahni, R. R. (2003). 7.1 an automated synoptic typing system using archived and real-time nwp model output.

- Dahni, R. R., y Ebert, E. E. (1998). Automated objective synoptic typing to characterize errors in nwp model qpfs. En *Conference on weather analysis and forecasting* (Vol. 16, pp. J115–J118).
- Davis, R. E., y Walker, D. R. (1992). An upper-air synoptic climatology of the western united states. *Journal of Climate*, 5(12), 1449–1467.
- Dee, D. P., Uppala, S., Simmons, A., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., ... others (2011). The era-interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the royal meteorological society*, 137(656), 553–597.
- De Foy, B., Caetano, E., Magana, V., Zitácuaro, A., Cárdenas, B., Retama, A., ... Molina, M. (2005). Mexico city basin wind circulation during the mcma-2003 field campaign. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 5(3), 2503–2558.
- Demuzere, M., Kassomenos, P., y Philipp, A. (2011). The cost733 circulation type classification software: an example for surface ozone concentrations in central europe. *Theoretical and applied climatology*, 105(1-2), 143–166.
- Devoli, G., Jørandli, L., Engeland, K., y Tallaksen, L. M. (2017). Large-scale synoptic weather types and precipitation responsible for landslides in southern norway. En *Workshop on world landslide forum* (pp. 159–167).
- Díaz-Esteban, Y., y Raga, G. B. (2018). Weather regimes associated with summer rainfall variability over southern mexico. *International Journal of Climatology*, 38(1), 169–186.
- Diem, J. E., Stauber, C. E., y Rothenberg, R. (2017). Heat in the southeastern united states: Characteristics, trends, and potential health impact. *PloS one*, 12(5), e0177937.
- Domínguez, E. (1941). Elementos de previsión del tiempo en méxico. *Centro de Previsión del Golfo, Veracruz, mimeografiado.[Links]*.
- Englehart, P., y Douglas, A. (2002). Mexico's summer rainfall patterns: an analysis of regional modes and changes in their teleconnectivity. *Atmósfera*, 15(3), 147–164.
- Esteban, P., Jones, P. D., Martín-Vide, J., y Mases, M. (2005). Atmospheric circulation patterns related to heavy snowfall days in andorra, pyrenees. *International Journal of Climatology*, 25(3), 319–329.
- Fariñas, E. P., y Pedroso, C. G. (2011). Climatología sinóptica de las bajas extratropicales que influyen en el archipiélago cubano. *Revista Cubana de Meteorología*, 17(2), 71–86.
- Fernández, A., y Díaz, Y. (2005). Catálogo de procesos sinópticos del archipiélago cubano en el período 1979-1993. *Centro Meteorológico Provincial de Cienfuegos, Cuba*.

- Fiddes, S., Pezza, A., Mitchell, T., Kozyniak, K., y Mills, D. (2016). Synoptic weather evolution and climate drivers associated with winter air pollution in new zealand. *Atmospheric Pollution Research*, 7(6), 1082–1089.
- Frakes, B., y Yarnal, B. (1997). A procedure for blending manual and correlation-based synoptic classifications. *International Journal of climatology*, 17(13), 1381–1396.
- Fujita, T. T. (1985). The downburst: Microburst and macroburst. *SMRP Res. Paper*, 210, 112.
- Gibson, P. B., y Cullen, N. J. (2015). Synoptic and sub-synoptic circulation effects on wind resource variability—a case study from a coastal terrain setting in new zealand. *Renewable Energy*, 78, 253–263.
- Gibson, P. B., Uotila, P., Perkins-Kirkpatrick, S. E., Alexander, L. V., y Pitman, A. J. (2016). Evaluating synoptic systems in the cmip5 climate models over the australian region. *Climate dynamics*, 47(7-8), 2235–2251.
- Gueye, A., Janicot, S., Niang, A., Sawadogo, S., Sultan, B., Diongue-Niang, A., y Thiria, S. (2011). Weather regimes over senegal during the summer monsoon season using self-organizing maps and hierarchical ascendant classification. part i: synoptic time scale. *Climate dynamics*, 36(1-2), 1–18.
- Gutiérrez Quevedo, E., Varga, C. I., y Fernández, A. (2008). Procesos sinópticos objetivos extremos de la estación lluviosa venezolana en los períodos 1956-1977 y 1978-1999. *Terra Nueva Etapa*, 24(35).
- Harrison, M. S. J. (2015). *A synoptic climatology of south african rainfall variations* (Tesis Doctoral no publicada).
- Hay, L. E., McCabe, G. J., Wolock, D. M., y Ayers, M. A. (1991). Simulation of precipitation by weather type analysis. *Water Resources Research*, 27(4), 493–501.
- Hewitson, B., y Crane, R. (2002). Self-organizing maps: applications to synoptic climatology. *Climate Research*, 22(1), 13–26.
- Heywood, G. S. P. (1953). *Surface pressure-patterns and weather around the year in hong kong*. Government Printer, South Africa.
- Holton, J. R., y Hakim, G. J. (2012). *An introduction to dynamic meteorology* (Vol. 88). Academic press.
- Huth, R. (2000). A circulation classification scheme applicable in gcm studies. *Theoretical and applied climatology*, 67(1-2), 1–18.

- Huth, R., Beck, C., Philipp, A., Demuzere, M., Ustrnul, Z., Cahynová, M., . . . Tveito, O. E. (2008). Classifications of atmospheric circulation patterns. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1146(1), 105–152.
- James, P. (2007). An objective classification method for hess and brezowsky grosswetterlagen over europe. *Theoretical and Applied Climatology*, 88(1-2), 17–42.
- Jankowski, D., y Amanowicz, M. (2015). Intrusion detection in software defined networks with self-organized maps. *Journal of Telecommunications and Information Technology*.
- Jáuregui, E. (1971). Variaciones de largo periodo de los tipos de tiempo de superficie en méxico. *Boletín Instituto de Geogr. UNAM*, 4, 9–22.
- Jenkinson, A., y Collison, F. (1977). An initial climatology of gales over the north sea. *Synoptic climatology branch memorandum*, 62, 18.
- Jiang, N. (2011). A new objective procedure for classifying new zealand synoptic weather types during 1958–2008. *International Journal of Climatology*, 31(6), 863–879.
- Jiang, N., Cheung, K., Luo, K., Beggs, P. J., y Zhou, W. (2012). On two different objective procedures for classifying synoptic weather types over east australia. *International Journal of Climatology*, 32(10), 1475–1494.
- Jones, Davis, R. E., y cols. (2000). Using a synoptic climatological approach to understand climate-viticulture relationships. *International Journal of Climatology*, 20(8), 813–837.
- Jones, Hulme, M., y Briffa, K. (1993). A comparison of lamb circulation types with an objective classification scheme. *International Journal of Climatology*, 13(6), 655–663.
- Kalkstein, L. S., y Corrigan, P. (1986). A synoptic climatological approach for geographical analysis: assessment of sulfur dioxide concentrations. *Annals of the Association of American Geographers*, 76(3), 381–395.
- Kidson, J. W. (2000). An analysis of new zealand synoptic types and their use in defining weather regimes. *International journal of climatology*, 20(3), 299–316.
- Kirchhofer, W. (1974). *Classification of european 500 mb patterns*. Swiss Meteorological Institute.
- Kirk, J. P., Sheridan, S. C., y Schmidlin, T. W. (2017). Synoptic climatology of the early 21st century drought in the colorado river basin and relationships to reservoir water levels. *International Journal of Climatology*, 37(5), 2424–2437.
- Kohonen, T. (2001). Self-organizing maps, vol. 30 of springer series in information sciences. *ed: Springer Berlin*.

- Kohonen, T., y Maps, S.-o. (1995). *Springer series in information science*, vol. 30. Springer, Berlin.
- Lackmann, G. (2011). *Midlatitude synoptic meteorology: dynamics, analysis, and forecasting*. American Meteorological Society Boston.
- Lamb, H. (1972). *British isles weather types and a register of daily sequence of circulation patterns. geophys mem 116*. HMSO, London.
- Lapinel, B. (1988). *La circulación atmosférica y las características espacio-temporales de las lluvias en cuba* (Tesis Doctoral no publicada). Tesis para la obtención del grado científico de candidato a Doctor en Ciencias Geográficas.
- Lee, C. C., y Sheridan, S. C. (2012). A six-step approach to developing future synoptic classifications based on gcm output. *International Journal of Climatology*, 32(12), 1792–1802.
- Leighton, R. M., y Spark, E. (1997). Relationship between synoptic climatology and pollution events in sydney. *International Journal of Biometeorology*, 41(2), 76–89.
- Littmann, T. (2000). An empirical classification of weather types in the mediterranean basin and their interrelation with rainfall. *Theoretical and Applied Climatology*, 66(3-4), 161–171.
- Llop, J., y Alomar, G. (2012). Clasificación sinóptica automática de jenkinson y collison para los días de precipitación mayor o igual a 100 mm en la franja litoral catalana e islas baleares. *Publicaciones de la Asociación Española de Climatología. Serie A*; 8.
- López, E. (1926). Climatología de la república. *Capítulo V de la Geografía Física de Jesús Galindo y Villa, Librería Franco-Americana, antigua de Bouret, México*.
- Lynch, A., Uotila, P., y Cassano, J. J. (2006). Changes in synoptic weather patterns in the polar regions in the twentieth and twenty-first centuries, part 2: Antarctic. *International Journal of Climatology*, 26(9), 1181–1199.
- Markle, B., Bertler, N., Sinclair, K., y Sneed, S. (2012). Synoptic variability in the ross sea region, antarctica, as seen from back-trajectory modeling and ice core analysis. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D2).
- Maunder, W. (1968). Synoptic weather patterns in the pacific northwest. *Northwest Science*, 42(2), 80–88.
- McCabe, G., Hay, L., Ayers, M., y Wolock, D. (1989). Assessment of climate change using weather type analysis. En *National conference on hydraulic engineeringam. soc. of civ. eng. new orleans, la*.
- Mckendry, I. G. (1994). Synoptic circulation and summertime ground-level ozone concentrations at vancouver, british columbia. *Journal of applied meteorology*, 33(5), 627–641.

- Michaelides, S., Tymvios, F., y Charalambous, D. (2010). Investigation of trends in synoptic patterns over europe with artificial neural networks. *Advances in Geosciences*, 23, 107–112.
- Michelangeli, P.-A., Vautard, R., y Legras, B. (1995). Weather regimes: Recurrence and quasi stationarity. *Journal of the atmospheric sciences*, 52(8), 1237–1256.
- Moore, R., y McKendry, I. (1996). Spring snowpack anomaly patterns and winter climatic variability, british columbia, canada. *Water Resources Research*, 32(3), 623–632.
- Moron, V., Robertson, A. W., Ward, M. N., y Ndiaye, O. (2008). Weather types and rainfall over senegal. part i: Observational analysis. *Journal of Climate*, 21(2), 266–287.
- Morris, C., y Simmonds, I. (2000). Associations between varying magnitudes of the urban heat island and the synoptic climatology in melbourne, australia. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 20(15), 1931–1954.
- Mosiño, P. (1958). Una clasificación de las configuraciones del flujo aéreo en la república mexicana. *Revista de Ingeniera Hidraulica*, 12(2).
- Mullens, E. D., Leslie, L. M., y Lamb, P. J. (2016). Synoptic pattern analysis and climatology of ice and snowstorms in the southern great plains, 1993–2011. *Weather and Forecasting*, 31(4), 1109–1136.
- Nicholls, N., Uotila, P., y Alexander, L. (2010). Synoptic influences on seasonal, interannual and decadal temperature variations in melbourne, australia. *International Journal of Climatology*, 30(9), 1372–1381.
- Nigro, M. A., Cassano, J. J., y Seefeldt, M. W. (2011). A weather-pattern-based approach to evaluate the antarctic mesoscale prediction system (amps) forecasts: Comparison to automatic weather station observations. *Weather and Forecasting*, 26(2), 184–198.
- Nowotarski, C. J., y Jensen, A. A. (2013). Classifying proximity soundings with self-organizing maps toward improving supercell and tornado forecasting. *Weather and Forecasting*, 28(3), 783–801.
- OMM. (2011). Guía de prácticas climatológicas. <https://goo.gl/hupgHV>.
- Organization, W. M. (1977). *Manual on the global data-processing and forecasting system*. Secretariat of the World Meteorological Organization. Descargado de <https://books.google.com.mx/books?id=zMTiAAAAMAAJ>
- Orlanski, I. (1975). A rational subdivision of scales for atmospheric processes. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 527–530.
- Otero, N., Sillmann, J., y Butler, T. (2018). Assessment of an extended version of the jenkinson–collison classification on cmip5 models over europe. *Climate Dynamics*, 50(5-6), 1559–1579.

- Paschalidou, A., y Kassomenos, P. (2016). What are the most fire-dangerous atmospheric circulations in the eastern-mediterranean? analysis of the synoptic wildfire climatology. *Science of the Total Environment*, 539, 536–545.
- Pezza, A. B., Van Rensch, P., y Cai, W. (2012). Severe heat waves in southern australia: synoptic climatology and large scale connections. *Climate Dynamics*, 38(1-2), 209–224.
- Philippopoulos, K., y Deligiorgi, D. (2012). A self-organizing maps multivariate spatio-temporal approach for the classification of atmospheric conditions. En *International conference on neural information processing* (pp. 544–551).
- Putniković, S., y Tošić, I. (2017). Relationship between atmospheric circulation weather types and seasonal precipitation in serbia. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 1–11.
- Rasilla Álvarez, D. F. (2003). Aplicación de un método de clasificación sinóptica a la península ibérica. *Investigaciones Geográficas (Esp)*(30).
- Ribeiro, B. Z., Seluchi, M. E., y Chou, S. C. (2016). Synoptic climatology of warm fronts in southeastern south america. *International Journal of Climatology*, 36(2), 644–655.
- Sáenz, F., y Durán-Quesada, A. M. (2015). A climatology of low level wind regimes over central america using a weather type classification approach. *Frontiers in Earth Science*, 3, 15.
- Sánchez, L. M. A. (1976). Climatología dinámica, sinóptica o sintética. origen y desarrollo. *Revista de geografía*, 10(1), 140–157.
- Sang, H., Gelfand, A. E., Lennard, C., Hegerl, G., Hewitson, B., y cols. (2008). Interpreting self-organizing maps through space–time data models. *The Annals of Applied Statistics*, 2(4), 1194–1216.
- Saunders, I., y Byrne, J. (1996). Generating regional precipitation from observed and gcm synoptic-scale pressure fields, southern alberta, canada. *Climate Research*, 237–249.
- Schoof, J. T., y Pryor, S. (2006). An evaluation of two gcms: Simulation of north american teleconnection indices and synoptic phenomena. *International Journal of Climatology*, 26(2), 267–282.
- Seim, A., Schultz, J. A., Leland, C., Davi, N., Byambasuren, O., Liang, E., . . . Pederson, N. (2017). Synoptic-scale circulation patterns during summer derived from tree rings in mid-latitude asia. *Climate Dynamics*, 49(5-6), 1917–1931.
- Senkbeil, J. C., Saunders, M. E., y Taylor, B. (2017). Changes in summer weather type frequency in eastern north america. *Annals of the American Association of Geographers*, 107(5), 1229–1245.

- Serra, Y. L., Kiladis, G. N., y Hodges, K. I. (2010). Tracking and mean structure of easterly waves over the intra-americas sea. *Journal of Climate*, 23(18), 4823–4840.
- Shahgedanova, M., y Lamakin, M. (2005). Trends in aerosol optical depth in the russian arctic and their links with synoptic climatology. *Science of the total environment*, 341(1-3), 133–148.
- Sheridan, S. C. (2002). The redevelopment of a weather-type classification scheme for north america. *International journal of climatology*, 22(1), 51–68.
- Siegert, C., Leathers, D., y Levia, D. (2017). Synoptic typing: interdisciplinary application methods with three practical hydroclimatological examples. *Theoretical and applied climatology*, 128(3-4), 603–621.
- Simmons, A. (2006). Era-interim: New ecmwf reanalysis products from 1989 onwards. *ECMWF newsletter*, 110, 25–36.
- Simmons, A., Uppala, S., y Dee, D. (2007). Update on erainterim. ecmwf newsletter, no. 111, ecmwf. Reading, United Kingdom, 5.
- Sinclair, K., Bertler, N., y Trompeter, W. (2010). Synoptic controls on precipitation pathways and snow delivery to high-accumulation ice core sites in the ross sea region, antarctica. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(D22).
- Skinner, W. R., Flannigan, M. D., Stocks, B. J., Martell, D. L., Wotton, B. M., Todd, J. B., ... Bosch, E. M. (2002). A 500 hpa synoptic wildland fire climatology for large canadian forest fires, 1959–1996. *Theoretical and Applied Climatology*, 71(3-4), 157–169.
- Souri, A. H., Choi, Y., Li, X., Kotsakis, A., y Jiang, X. (2016). A 15-year climatology of wind pattern impacts on surface ozone in houston, texas. *Atmospheric Research*, 174, 124–134.
- Stahl, K., Moore, R. D., y Mckendry, I. G. (2006). The role of synoptic-scale circulation in the linkage between large-scale ocean–atmosphere indices and winter surface climate in british columbia, canada. *International Journal of Climatology*, 26(4), 541–560.
- Suriano, Z. J., y Leathers, D. J. (2017). Synoptic climatology of lake-effect snowfall conditions in the eastern great lakes region. *International Journal of Climatology*, 37(12), 4377–4389.
- Tanner, P. A. (1999). Relationships between rainwater composition and synoptic weather systems deduced from measurement and analysis of hong kong daily rainwater data. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 33(3), 219–240.
- Tanner, P. A., y Law, P.-T. (2002). Effects of synoptic weather systems upon the air quality in an asian megacity. *Water, Air, and Soil Pollution*, 136(1-4), 105–124.

- Theobald, A., McGowan, H., y Speirs, J. (2016). Trends in synoptic circulation and precipitation in the snowy mountains region, australia, in the period 1958–2012. *Atmospheric Research*, 169, 434–448.
- Theobald, A., McGowan, H., Speirs, J., y Callow, N. (2015). A synoptic classification of inflow-generating precipitation in the snowy mountains, australia. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 54(8), 1713–1732.
- Trigo, R. M., DaCAMARA, C. C., y cols. (2000). Circulation weather types and their influence on the precipitation regime in portugal. *International Journal of Climatology*, 20(13), 1559–1581.
- Tubi, A., y Dayan, U. (2014). Tropical plumes over the middle east: Climatology and synoptic conditions. *Atmospheric research*, 145, 168–181.
- Uppala, S., Dee, D., Kobayashi, S., Berrisford, P., y Simmons, A. (2008). Towards a climate data assimilation system: status update of era-interim. *ECMWF newsletter*, 115(7), 12–18.
- Vesanto, J., Himberg, J., Alhoniemi, E., y Parhankangas, J. (2000). Som toolbox for matlab 5. *Helsinki University of Technology, Finland*.
- Vrac, M., Stein, M., y Hayhoe, K. (2007). Statistical downscaling of precipitation through nonhomogeneous stochastic weather typing. *Climate Research*, 34(3), 169–184.
- Wang, B., y Rui, H. (1990). Synoptic climatology of transient tropical intraseasonal convection anomalies: 1975–1985. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 44(1-4), 43–61.
- Wapler, K., y James, P. (2015). Thunderstorm occurrence and characteristics in central europe under different synoptic conditions. *Atmospheric Research*, 158, 231–244.
- Yarnal, B. (1984). A procedure for the classification of synoptic weather maps from gridded atmospheric pressure surface data. *Computers & Geosciences*, 10(4), 397–410.
- Yarnal, B. (1993). *Synoptic climatology in environmental analysis: a primer*. Belhaven.
- Yarnal, B., y Frakes, B. (1997). Using synoptic climatology to define representative discharge events. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 17(3), 323–341.
- Zadeh, L. A. (1965). Information and control. *Fuzzy sets*, 8(3), 338–353.
- Zepeda, R. V. (2005). *Las regiones climáticas de México 1.2. 2* (Vol. 2). Unam.

7 Apéndice A

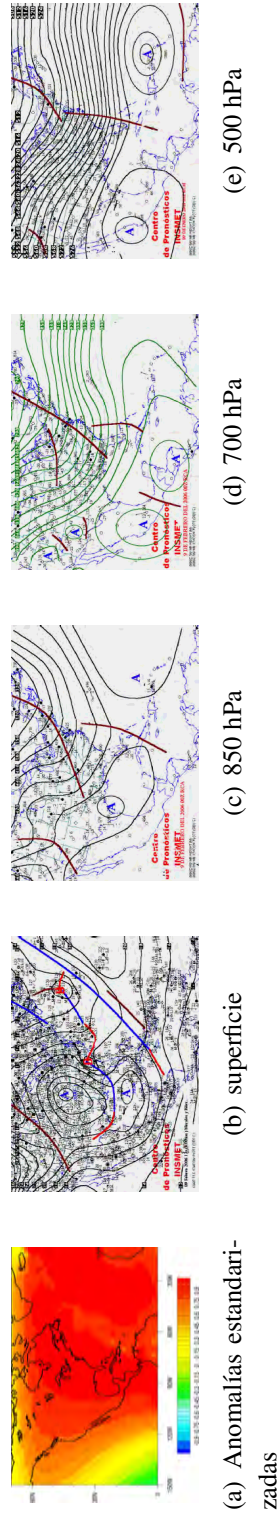


Figura 7-1: Representación del patrón sinóptico SLP-AN01 de acuerdo a sus valores de anomalías estandarizadas, mapa sinóptico en superficie y en niveles de altitud de 850, 700 y 500 hPa.

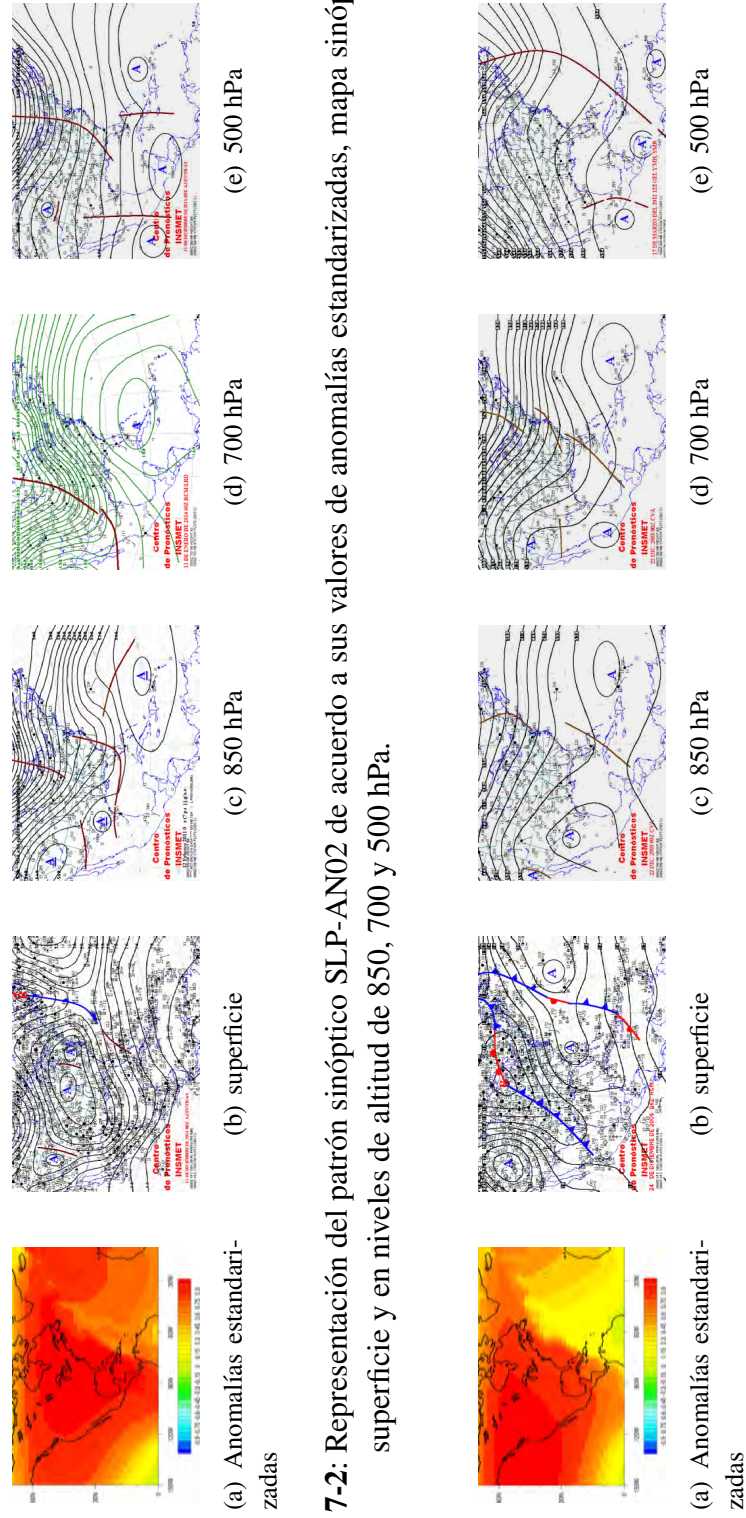


Figura 7-2: Representación del patrón sinóptico SLP-AN02 de acuerdo a sus valores de anomalías estandarizadas, mapa sinóptico en superficie y en niveles de altitud de 850, 700 y 500 hPa.

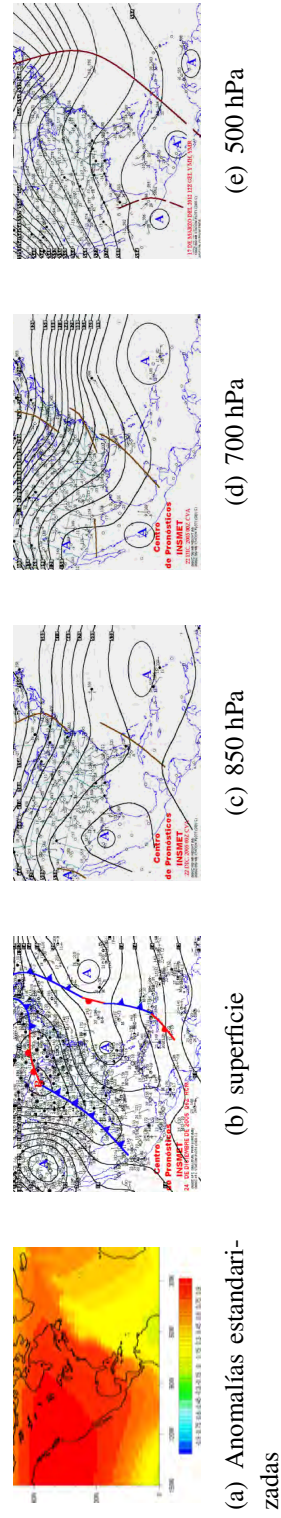


Figura 7-3: Representación del patrón sinóptico SLP-AN03 de acuerdo a sus valores de anomalías estandarizadas, mapa sinóptico en superficie y en niveles de altitud de 850, 700 y 500 hPa.

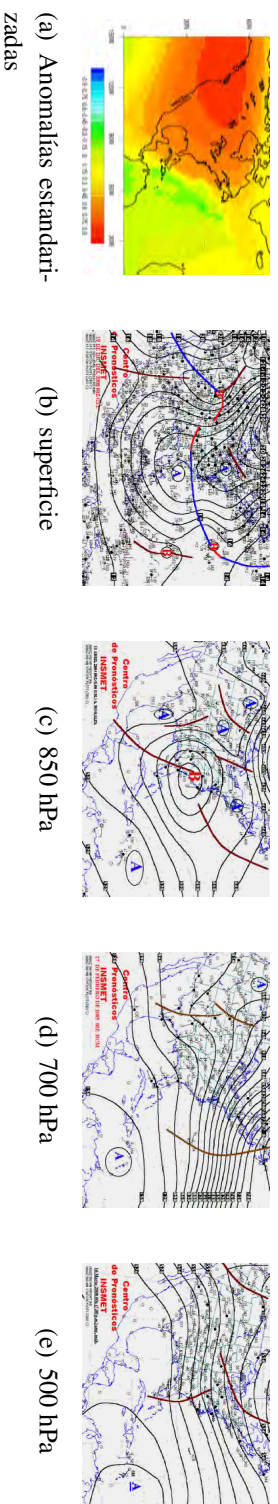


Figura 7-4: Representación del patrón sinóptico SLP-AN04 de acuerdo a sus valores de anomalías estandarizadas, mapa sinóptico en superficie y en niveles de altitud de 850, 700 y 500 hPa.

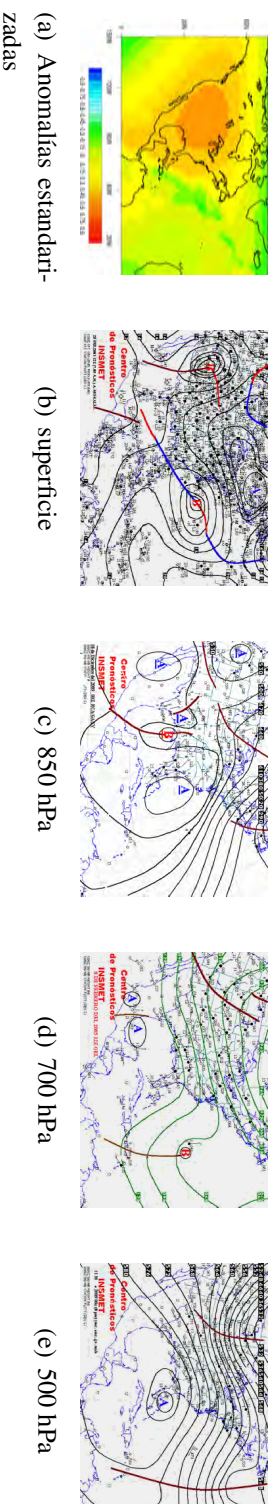


Figura 7-5: Representación del patrón sinóptico SLP-AN05 de acuerdo a sus valores de anomalías estandarizadas, mapa sinóptico en superficie y en niveles de altitud de 850, 700 y 500 hPa.

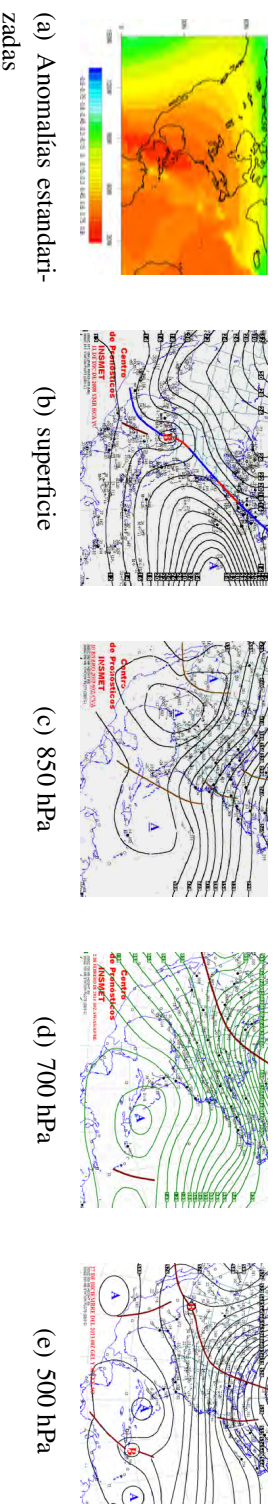


Figura 7-6: Representación del patrón sinóptico SLP-AN06 de acuerdo a sus valores de anomalías estandarizadas, mapa sinóptico en superficie y en niveles de altitud de 850, 700 y 500 hPa.

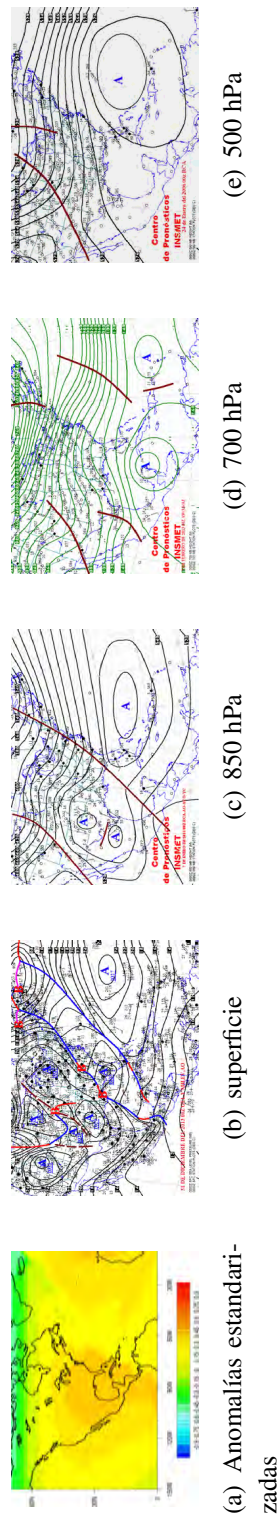


Figura 7-7: Representación del patrón sinóptico SLP-AN07 de acuerdo a sus valores de anomalías estandarizadas, mapa sinóptico en superficie y en niveles de altitud de 850, 700 y 500 hPa.

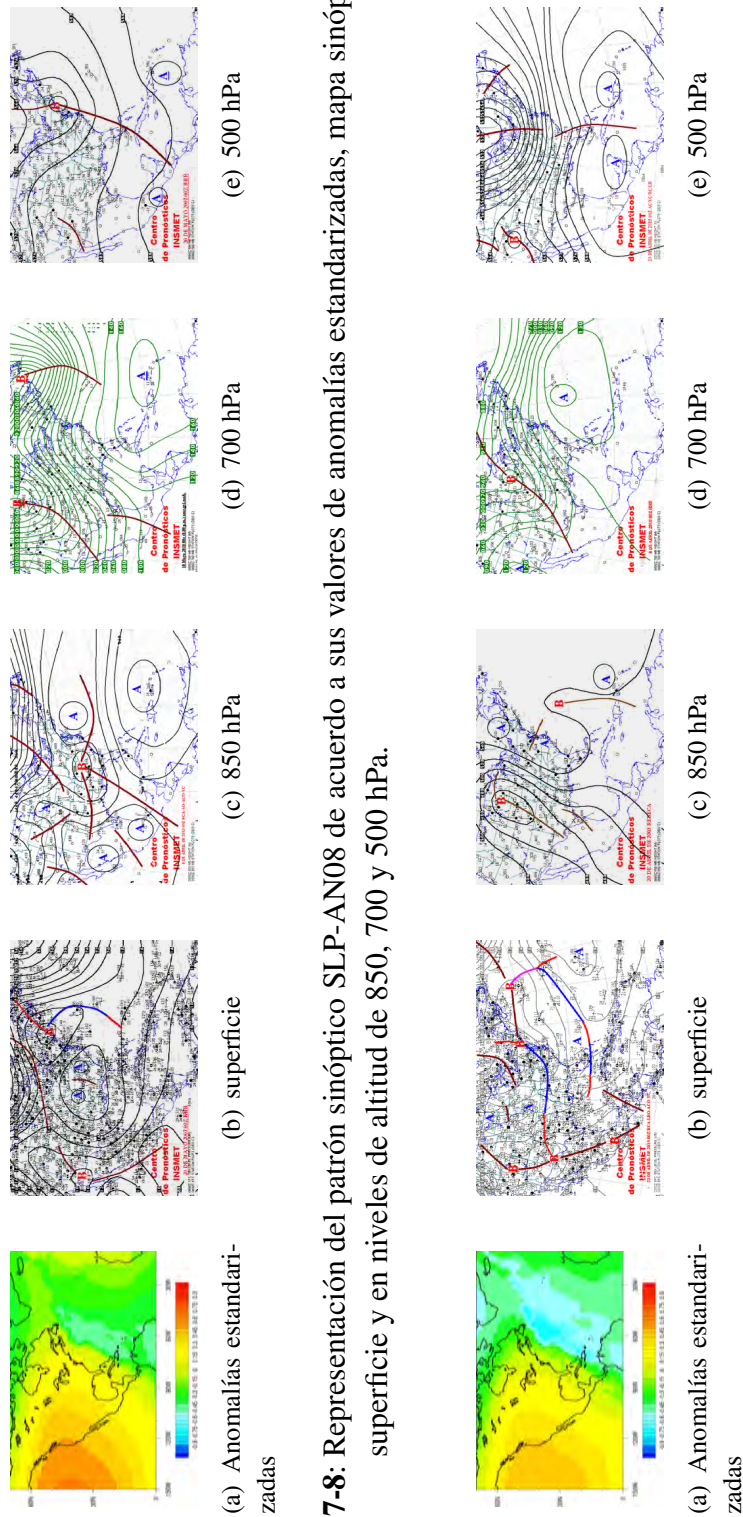


Figura 7-8: Representación del patrón sinóptico SLP-AN08 de acuerdo a sus valores de anomalías estandarizadas, mapa sinóptico en superficie y en niveles de altitud de 850, 700 y 500 hPa.

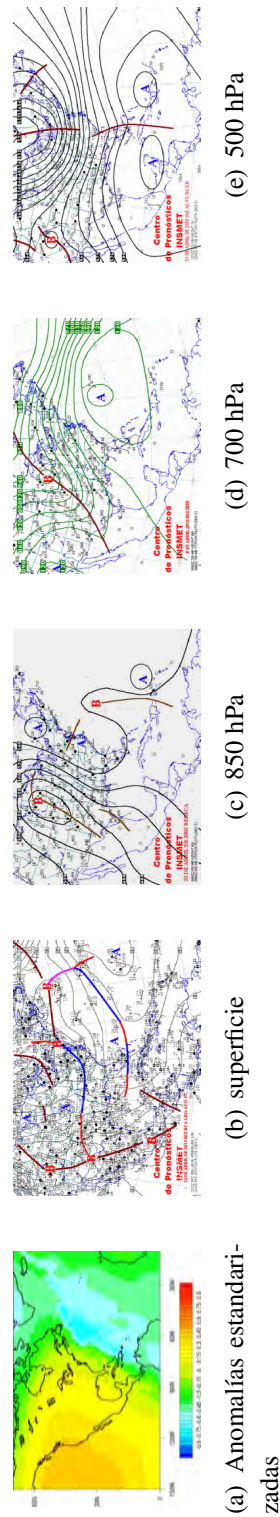


Figura 7-9: Representación del patrón sinóptico SLP-AN09 de acuerdo a sus valores de anomalías estandarizadas, mapa sinóptico en superficie y en niveles de altitud de 850, 700 y 500 hPa.

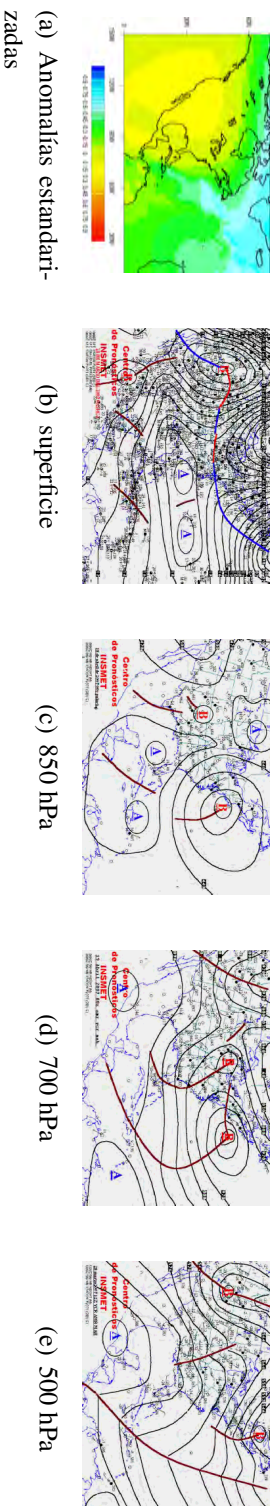


Figura 7-10: Representación del patrón sinóptico SLP-AN10 de acuerdo a sus valores de anomalías estandarizadas, mapa sinóptico en superficie y en niveles de altitud de 850, 700 y 500 hPa.

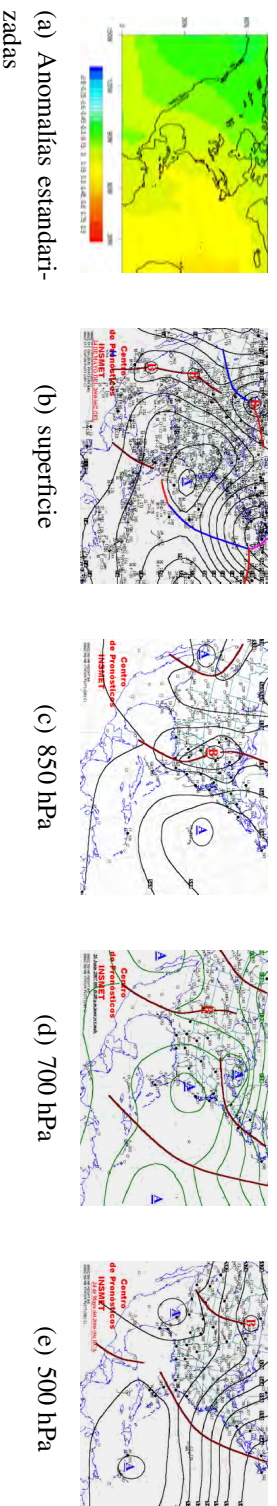


Figura 7-11: Representación del patrón sinóptico SLP-AN11 de acuerdo a sus valores de anomalías estandarizadas, mapa sinóptico en superficie y en niveles de altitud de 850, 700 y 500 hPa.

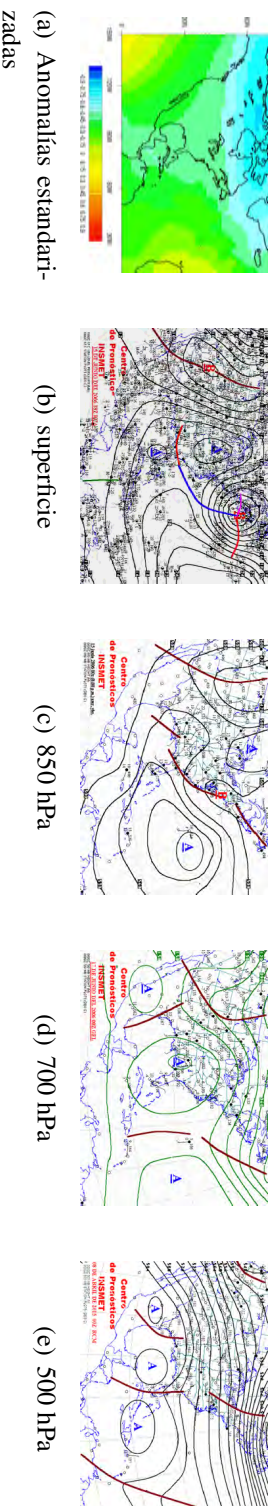


Figura 7-12: Representación del patrón sinóptico SLP-AN12 de acuerdo a sus valores de anomalías estandarizadas, mapa sinóptico en superficie y en niveles de altitud de 850, 700 y 500 hPa.

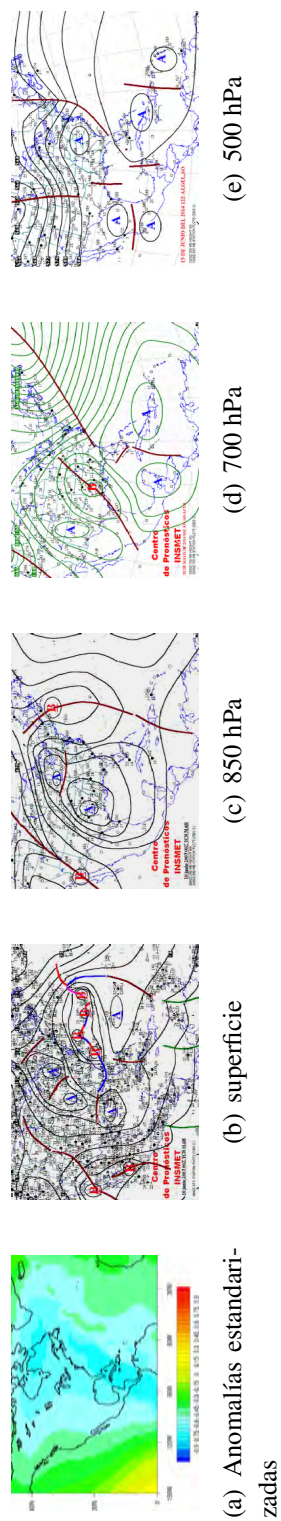


Figura 7-13: Representación del patrón sinóptico SLP-AN13 de acuerdo a sus valores de anomalías estandarizadas, mapa sinóptico en superficie y en niveles de altitud de 850, 700 y 500 hPa.

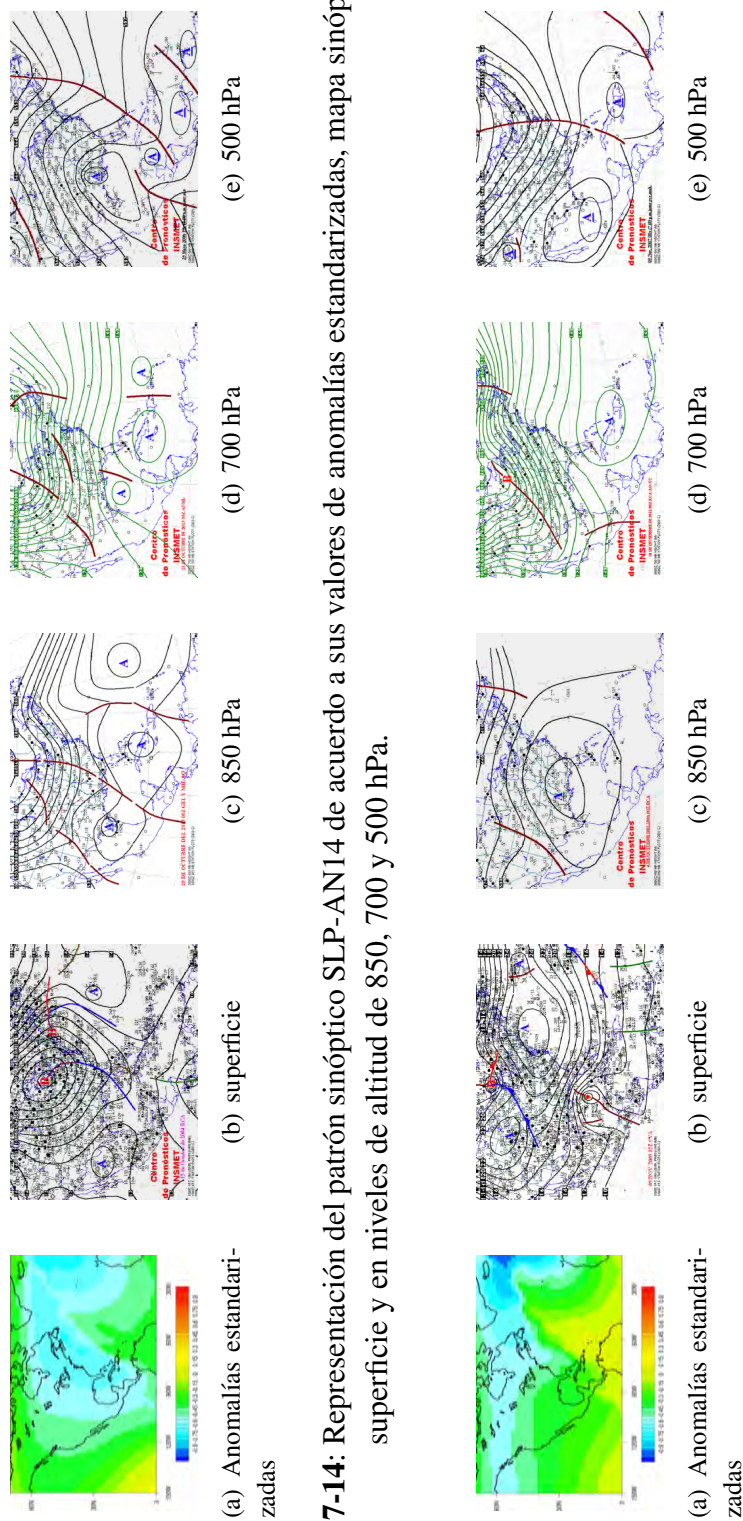


Figura 7-14: Representación del patrón sinóptico SLP-AN14 de acuerdo a sus valores de anomalías estandarizadas, mapa sinóptico en superficie y en niveles de altitud de 850, 700 y 500 hPa.

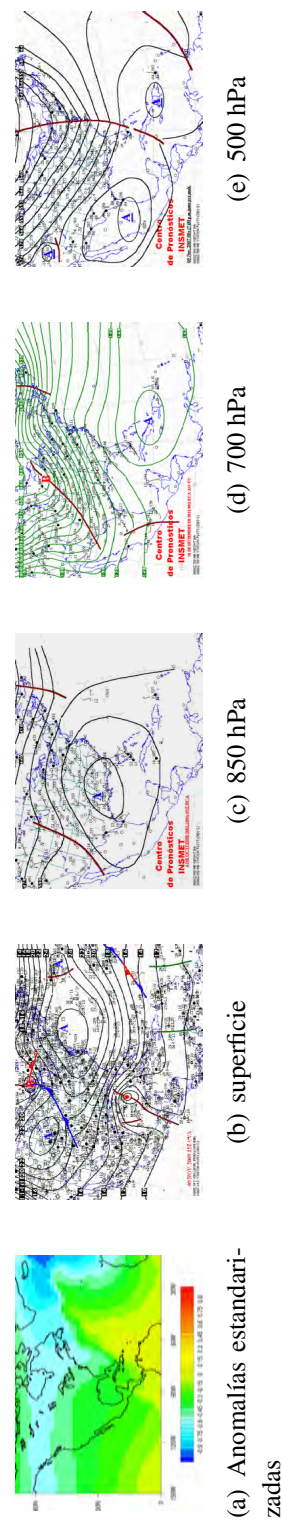


Figura 7-15: Representación del patrón sinóptico SLP-AN15 de acuerdo a sus valores de anomalías estandarizadas, mapa sinóptico en superficie y en niveles de altitud de 850, 700 y 500 hPa.

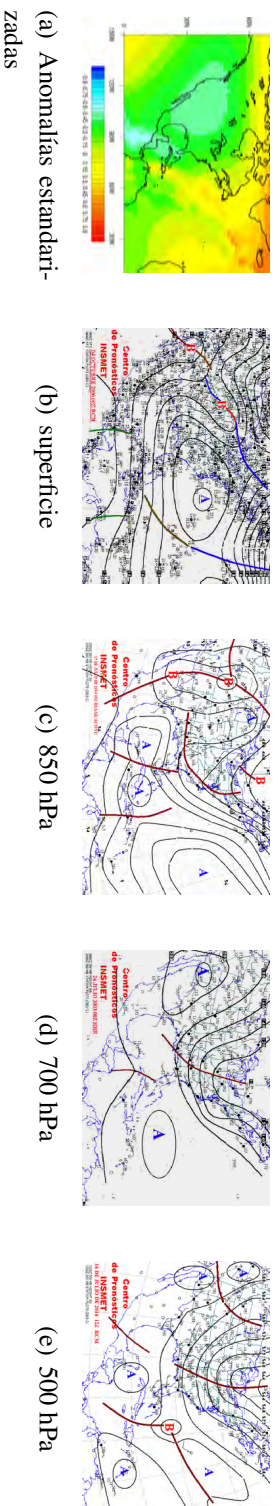


Figura 7-16: Representación del patrón sinóptico SLP-ANI6 de acuerdo a sus valores de anomalías estandarizadas, mapa sinóptico en superficie y en niveles de altitud de 850, 700 y 500 hPa.

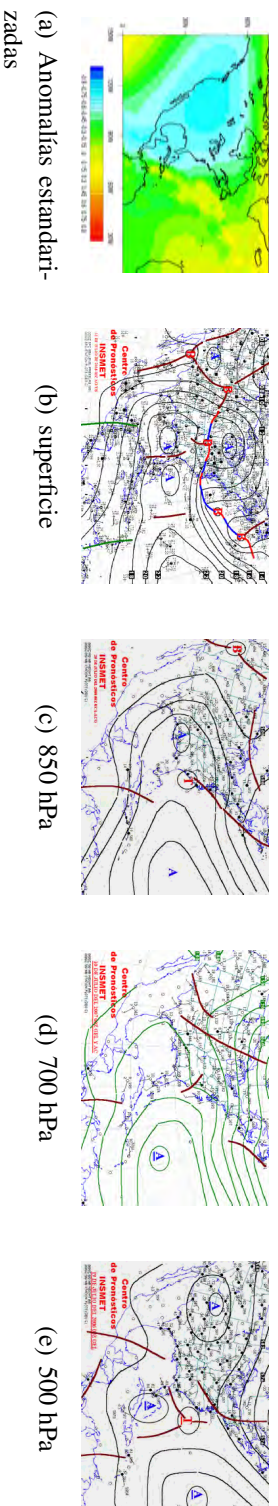


Figura 7-17: Representación del patrón sinóptico SLP-ANI7 de acuerdo a sus valores de anomalías estandarizadas, mapa sinóptico en superficie y en niveles de altitud de 850, 700 y 500 hPa.



Figura 7-18: Representación del patrón sinóptico SLP-ANI8 de acuerdo a sus valores de anomalías estandarizadas, mapa sinóptico en superficie y en niveles de altitud de 850, 700 y 500 hPa.

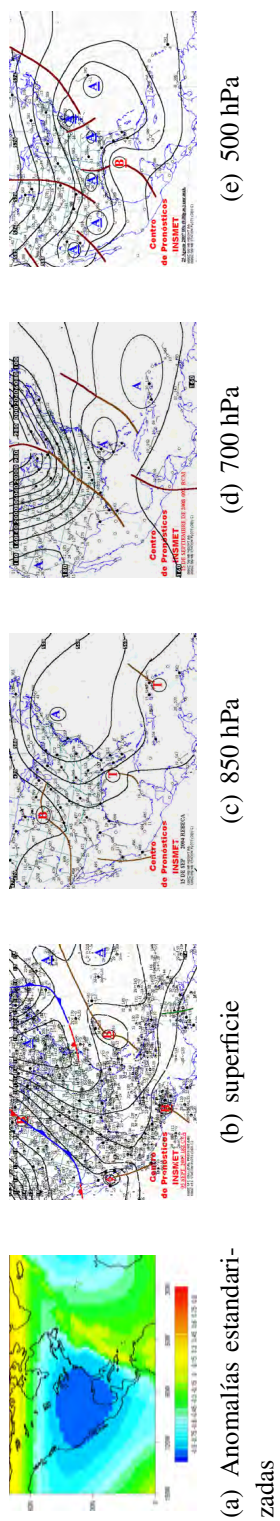


Figura 7-19: Representación del patrón sinóptico SLP-AN19 de acuerdo a sus valores de anomalías estandarizadas, mapa sinóptico en superficie y en niveles de altitud de 850, 700 y 500 hPa.

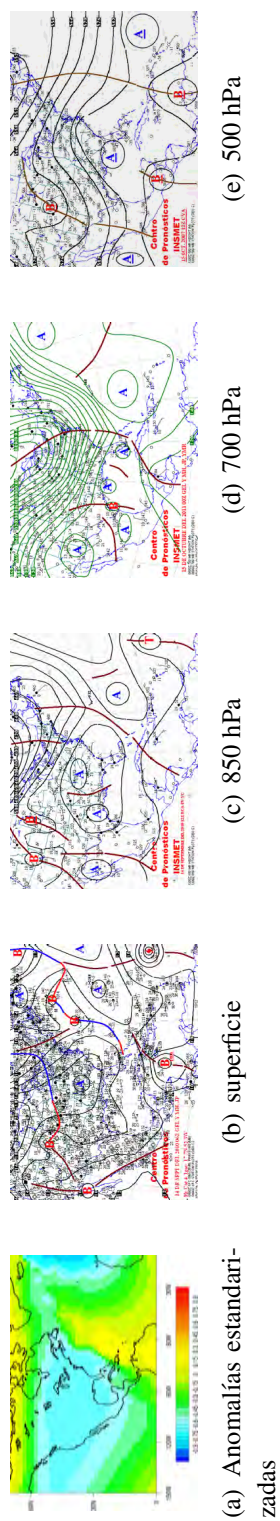


Figura 7-20: Representación del patrón sinóptico SLP-AN20 de acuerdo a sus valores de anomalías estandarizadas, mapa sinóptico en superficie y en niveles de altitud de 850, 700 y 500 hPa.