UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO

“CARACTERIZACIÓN DE TORMENTAS INTENSAS QUE INCLUYAN IMPACTOS EN EL ÁREA METROPLITANA DE SAN SALVADOR, EL SALVADOR, EN LOS AÑOS 2015 - 2017: PROPUESTA METODOLÓGICA”.

Trabajo final de investigación aplicada sometido a la consideración de la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en Ciencias de la Atmósfera para optar al grado y título de Maestría Profesional en Meteorología Operativa

LORENA ROSAURA SORIANO DE CRUZ

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica

2018

Dedicatoria

A Dios, quien me sostuvo en todo momento en este caminar, dándome la sabiduría, la fuerza y la confianza necesaria para lograr esta meta, mostrarme una vez más su grandeza y sus maravillas, que todo es posible con su ayuda. A toda mi familia, amigos, jefes y compañeros que confiaron en mí y me animaron en los momentos más difíciles a no desfallecer y seguir adelante, mis sinceros agradecimientos.

Agradecimientos

Quiero agradecer infinitamente a Dios por haberme permito finalizar este reto, que desde el inicio hasta el final han estado a mi lado sosteniéndome y dándome la fuerza necesaria para culminar con éxito este desafío.

A mis amados y respetables padres Irma Pocasangre de Soriano y Osmín Soriano, por sus incansables oraciones y por darme ánimo a seguir adelante en los momentos que más necesité, ¡les amo grandemente!

A mi esposo, Wilfredo Cruz, por su apoyo incondicional, paciencia y comprensión en todo este largo trayecto, quien siempre confió en mí y me motivó con sus oportunas y sabias palabras a seguir adelante, ¡gracias!

A mi hija, Sara Cruz Soriano, por su comprensión, amor y paciencia en todo este período de estudio, por no haberte dedicado ese tiempo que necesitaste para escucharte, disfrutar y compartir juntas esos momentos que nos fortalecen. A mi querido sobrino, Francisco Escobar Cruz, por todo su valioso e incondicional apoyo. A mi amado Tío Javier Pocasangre, a quién dedico este trabajo de investigación, que en paz descanse.

A mis hermanos, Marlene, Magdalila, Isis, Gisela, Glenda y Daniel, por sus oraciones y por su comprensión en todo este período de formación.

A mis respetables y estimados asesores Drs. Eric Alfaro, Hugo Hidalgo y Msc. Luis Alberto García, por compartir sus conocimientos científicos y orientarme a realizar un mejor trabajo en pro de la Meteorología de El Salvador y la región.

Al Programa Regional de Cambio Climático y el Gobierno de Estados Unidos a través de USAID y al Comité de Recursos Hidráulicos, CRRH por haberme tomado en cuenta para participar en tan importante estudio.

A los titulares del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Sra. Ministra, Lina Pohl, y al Sr. Viceministro, Ángel Ibarra, por su apoyo y, a la vez, por darme esta oportunidad de realizar este valioso estudio en beneficio de nuestra institución y de la Meteorología de nuestro país.

A mis estimados jefes Msc. Celina Kattan y Msc. Luis García, por confiar en mí y darme la oportunidad de realizar este importante estudio en beneficio de nuestro Observatorio Ambiental.

A la Dirección General de Protección Civil, por haberme facilitado la información registrada de los impactos para el período 2015 – 2017, muchas gracias por el apoyo.

A mis respetables y queridos compañeros de trabajo, principalmente Jaqui, Cristian, Iván, Luisito, Donald, Miriam y Laurita, quienes siempre me apoyaron con sus conocimientos científicos y con sus palabras de aliento a seguir adelante, ¡mil gracias colegas!

"Este trabajo fue aceptado por la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en Ciencias de la Atmósfera de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar al grado de Maestría Profesional en Meteorología Operativa".

Dr. Álvaro Morales Ramírez
Decano Sistema de Estudios de Posgrado

Dr. Eric Alfaro Martínez
Profesor Guía del Trabajo Final

Dr. Hugo Hidalgo León
Asesor

M.Sc. Luis Alberto García Guirola
Asesor

Dra. Ana María Quesada Durán
Directora
Programa de Posgrado en Ciencias de la Atmósfera

Lorena Rosaura Soriano de Cruz
Candidata

Lista de contenidos

DEDICATORIA II

AGRADECIMIENTOS III

LISTA DE CONTENIDOS V

RESUMEN VII

ABSTRACT VIII

LISTA DE CUADROS IX

LISTA DE FIGURAS X

LISTA DE ABREVIATURAS XIII

CAPÍTULO 1 1

1. INTRODUCCIÓN 1

2. ANTECEDENTES 2

3. JUSTIFICACIÓN 3

4. OBJETIVOS GENERALES Y ESPECÍFICOS 4

4.1 OBJETIVOS GENERALES 4
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 4

5. MARCO TEÓRICO 4

5.1 IMPACTOS DE SISTEMAS HIDROMETEOROLÓGICOS 4
5.1.1 Generación de celdas de tormentas *4*
5.1.2 Tormentas eléctricas *6*
5.1.3 Sistemas atmosféricos de mesoescala y escala sinóptica asociados a tormentas eléctricas *6*
5.1.3.1 Ondas del Este u ondas tropicales: 6
5.1.3.2 Ondas inducidas 7
5.1.3.3 Bajas presiones 8
5.1.3.4 Zona de Convergencia Intertropical, ZCIT 8
5.1.4 Índices de estabilidad atmosférica *9*
5.1.4.1 El Total de Totales 9
5.1.4.2 El Liftex (LI) 10
5.1.4.3 El CAPE 10
5.1.4.4 K Index 12
5.1.4.5 Índice de Gálvez y Davison, (GDI) 12
5.2 AFECTACIONES DE TORMENTAS ELÉCTRICAS EN CENTROAMÉRICA Y EL SALVADOR 15
5.3 VULNERABILIDAD, RIESGO E IMPACTOS EN CENTROAMÉRICA Y EL SALVADOR POR EVENTOS HIDROMETEOROLÓGICOS 17

CAPÍTULO 2 19

6. METODOLOGÍA 19

6.1 IDENTIFICACIÓN DE EVENTOS DE LLUVIA FUERTE Y SUS IMPACTOS 19
6.2 ÁREA DE ESTUDIO Y ANÁLISIS 20

CAPÍTULO 3 23

7. ANÁLISIS, PROCEDIMIENTOS Y RESULTADOS 23

7.1 ANÁLISIS DE LA CARACTERIZACIÓN DE LAS TORMENTAS, CASOS DE ESTUDIO 23
7.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS ÍNDICES DE ESTABILIDAD 42
7.2.1 Correlaciones entre el índice GDI y los otros índices *43*
7.2.2 Análisis de los índices de inestabilidad *44*
7.2.1.1 GDI, Índice de Gálvez y Davison 44
7.2.1.2 Total de Totales 44
7.2.1.3 Lifted asociado a las tormentas 45
7.2.1.4 CAPE asociado a las tormentas 45
7.2.1.5 K Index asociado a las tormentas 45
7.3 ANÁLISIS DE LOS IMPACTOS 46

CAPÍTULO 4. ..... **52**

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES **52**

8.1. CONCLUSIONES 52
8.2. RECOMENDACIONES 56

9. BIBLIOGRAFÍA **58**

ANEXOS **60**

ANEXO 1. 60
CUADRO 10. MUESTRA DE LOS CUADROS QUE SE UTILIZARON CON LA INFORMACIÓN BASE DE LAS FECHAS DE LOS EVENTOS PARA CADA AÑO, MUNICIPIO INFLUENCIADO, LUGAR AFECTADO, TIPO DE AFECTACIÓN, CANTIDAD DE LLUVIA, SISTEMA ATMOSFÉRICO, IMAGEN SATELITAL, RADAR, COORDENADAS Y ENLACE DE NOTICIAS. EJEMPLO PARA EL AÑO 2015. FUENTE: PROPIA. 60
ANEXO. 2. CUADROS DE DATOS DE REANÁLISIS UTILIZADOS PARA LOS EVENTOS QUE GENERARON IMPACTOS PARA LOS AÑOS 2015, 2016 Y 2017, CUADRO 11. 63
ANEXO.2. MUESTRA LOS MAPAS DE VARIABLES METEOROLÓGICAS CON REANÁLISIS PARA CADA FECHA Y LOS AÑOS DE 2015-2017 DE LOS CASOS DE ESTUDIO Y A LAS HORAS CERCANAS A LAS TORMENTAS. 63
ANEXO. 3. MUESTRA LOS HOSPITALES, ESCUELAS Y VÍAS EXPUESTAS DURANTE EL 2015, 2016 Y 2017 EN UN RADIO DE 500 M. 64

Resumen

En el presente trabajo se caracterizaron físicamente los fenómenos meteorológicos asociados con tormentas eléctricas intensas, que generaron impactos en los años 2015, 2016 y 2017 en el Área Metropolitana de San Salvador, AMSS, El Salvador. Haciendo uso de reanálisis de variables meteorológicas e índices de estabilidad disponibles en la University Corporation for Atmospheric/Centers for Environmental Prediction/Final, NCEP/FNL, National Center Amospheric Research/University Corporation for Atmospheric, NCAR/UCAR de Estados Unidos de América, con resolución temporal de 6 horas y espacial de 1° x 1°. Además, se usó el registro de lluvia de las estaciones meteorológicas telemétricas y convencionales, para los eventos meteorológicos en los que se registró acumulados de 50 mm o más en 24 horas. También se usaron imágenes de radar, satélite y reportes aeronáuticos del Servicio Meteorológico Nacional/Dirección Observatorio Ambiental/Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, SMN/DOA/MARN de El Salvador, con el propósito de verificar el tipo de lluvia asociada a un determinado sistema atmosférico y sus impactos. Cada caso fue verificado mediante registro de afectaciones de Protección Civil, noticias de periódicos digitales y las disponibles en el área de Comunicaciones del MARN. La información fue georreferenciada con Google Maps y ArcGIS para generar mapas de los municipios mayormente impactados por las lluvias intensas e identificar el tipo de impactos, para cruzarlos con las capas disponibles de hospitales, escuelas y vías, y evaluar la exposición de éstos para los eventos estudiados y futuros en un radio de 500 m de los puntos seleccionados. En la mayoría de casos analizados, existió ventilación en 200 hPa para favorecer la convección, y en 850 hPa, se tuvo ondas tropicales o del este, vaguadas y, en algunos casos, asociadas a la ZCIT o a bajas presiones en el Pacífico. Los índices de estabilidad mostraron individualmente características favorables para la producción de tormentas y un incremento simultáneo de los índices en, por lo menos, 7 de los 15 casos analizados. Debido a que el GDI, Gálvez Davison Index, es un índice tropicalizado se correlacionó con el resto de índices y se obtuvo su significancia, resultando, que solo hay relación entre GDI y K Index y el GDI y TT. De acuerdo al análisis, los municipios con mayor número de impactos fueron San Salvador, Panchimalco y San Martín, y los impactos recurrentes son deslizamientos, árboles caídos y viviendas afectadas. Esta metodología puede servir de insumo para elaborar pronósticos que toman en cuenta los impactos, tal como lo establece la OMM, reto que hoy en día tienen los Servicios Meteorológicos Nacionales en muchas partes del mundo.

Abstract

In this work, the intense thunderstorm type meteorological phenomena which generated impacts in the years 2015, 2016 and 2017 in the Metropolitan Area of San Salvador, AMSS, El Salvador were physically characterized. Re-analysis information used includes meteorological variables and stability indexes available at the University Corporation for Atmospheric/Centers for Environmental Prediction/Final, NCEP/FNL, National Center Amospheric Research/University Corporation for Atmospheric, NCAR/UCAR/United States of American, with temporary resolution of 6 hours and space resolution of 1 ° x 1 °. In addition, the rainfall records from telemetric and conventional meteorological stations were selected for the meteorological events in which 24 hour accumulations of 50 mm or more. Radar, satellite and aeronautical reports from the National Meteorological Service/ Environmental Observatory/Ministry of Environment and Natural Resources, SMN/DOA/ MARN of El Salvador, where also used with the purpose of verifying the type of rainfall associated with a given atmospheric system and its impacts. Each case was verified by registering impacts reported by Civil Protection agencies, news from digital newspapers and those available in the MARN Communications area. The information was georeferenced with Google Maps and ArcGIS to generate maps of the municipalities most impacted by intense rains, to identify the type of impacts, and to cross them with the available layers of hospitals, schools and roads, within a radius of 500 m from the selected points in order to evaluate the potential hazard exposure for the events. In most of the cases analyzed, there was ventilation at 200 hPa in favor of convection, and at 850 hPa, there were tropical waves or Easterly waves, troughs and in some cases, systems associated with the Intertropical Convergence Zone (ITCZ); or with low pressures in the Pacific. The stability indexes individually showed favorable characteristics for the production of storms and a simultaneous indexes increase in at least 7 of the 15 cases analyzed. Because the GDI, Gálvez Davison Index, is a tropicalized index, it was correlated with the rest of the indexes and their statistical significance were assessed, resulting, in significant correlation between GDI and K index and GDI and TT. According to the analysis, the municipalities with the greatest number of impacts were San Salvador, Panchimalco and San Martín, and the recurrent impacts are landslides, fallen trees and affected houses. This methodology can serve as an input to prepare forecasts that take into account the impacts as established by WMO, a challenge that nowadays the National Meteorological Services have in many parts of the world.

Lista de Cuadros

CUADRO 1. MUESTRA LA CLASIFICACIÓN DE LA MESOESCALA, CON SUS RESPECTIVAS DIMENSIONES Y LA ESTRUCTURA TÍPICA. 5
CUADRO 2. RANGOS DEL ÍNDICE TT, PRINCIPALMENTE PARA LATITUDES MEDIAS 10
CUADRO 3 . RANGOS DEL ÍNDICE LI, PRINCIPALMENTE PARA LATITUDES MEDIAS. 10
CUADRO 4.RANGOS DEL ÍNDICE CAPE, PRINCIPALMENTE PARA LATITUDES MEDIAS. 12
CUADRO 5. RANGOS DEL ÍNDICE K, PRINCIPALMENTE PARA LATITUDES MEDIAS. 12
CUADRO 6. RESUMEN DE LA CARACTERIZACIÓN DE EVENTOS ATMOSFÉRICOS DURANTE LOS AÑOS 2015, 2016 Y 2017 QUE INFLUENCIARON A EL SALVADOR, ESPECÍFICAMENTE AL DEPARTAMENTO DE SAN SALVADOR. 39
CUADRO 7. MUESTRA LOS DIFERENTES ÍNDICES DE ESTABILIDAD ANALIZADOS DURANTE EL 2015, 2016 Y 2017 Y LA PRECIPITACIÓN ASOCIADA. 42
CUADRO 8. COEFICIENTE DE CORRELACIÓN DEL GDI_TT, GDI-LIFTED, GDI-CAPE Y GDI-K INDEX PARA LOS AÑOS 2015, 2016 Y 2017. 43
CUADRO 9. SIGNIFICANCIA ESTADÍSTICA PARA LOS COEFICIENTES DE CORRELACIÓN DE LOS ÍNDICES DE INESTABILIDAD. 44
CUADRO 10. MUESTRA LAS FECHAS DE LOS EVENTOS ESTUDIADOS ENTRE OTRO TIPO DE INFORMACIÓN RELACIONADA CON LOS IMPACTOS Y SISTEMA ATMOSFÉRICOS PARA EL 2015. 60
CUADRO 11. DATOS DE REANÁLISIS UTILIZADOS A LAS HORAS CERCANAS A LA GENERACIÓN DE LAS TORMENTAS DE LOS DIFERENTES EVENTOS PARA 2015, 2016 Y 2017, PARA SU RESPECTIVO ANÁLISIS. 63

Lista de Figuras

Figura 1. Posición promedio climatológica de precipitación en cm asociado a la ZCIT, basado en imágenes satelitales infrarrojas y microondas en enero (arriba) y julio (abajo). Fuente: NOAA, National Center for Environmental Prediction, CMAP Projec, 2005. 9

Figura 2. Muestra el área bajo la curva asociada al CAPE en un diagrama termodinámico. Fuente: Mike Davison y José Gálvez, Presentación. NOAA. 11

Figura 3. Muestra el algoritmo generado para la estimación del GDI. Fuente: Mike Davison y José Gálvez, Nacional Weather Service, Weather Prediction Center, NOAA. 13

Figura 4. Muestra las zonas donde el GDI funciona de forma óptima, bueno y menos. Fuente: Mike Davison y José Gálvez, National Weather Service, Weather Prediction Center, NOAA. http://ftp.wpc.ncep.noaa.gov/mike/CHILE_2016/Presentations-PDF/3_%C3%8Dndices%20de%20Estabilidad.pdf 14

Figura 5. Muestra los rangos del GDI y el potencial de desarrollo convectivo que puede producir el índice. Fuente: National Weather Service, Weather Prediction Center, Tropical Desk, NOAA. ttp://www.wpc.ncep.noaa.gov/international/gdi/ 15

Figura 6. Daños producidos por la tormenta del día 3 de julio de 2008. Fuente: El Diario de Hoy. 16

Figura 7. Al fondo, cima occidental del volcán Chichontepec, San Vicente. A una altitud de aproximadamente 1800 msnm, se observa el área donde inició el deslave que impactó en la ciudad de Verapaz. Fuente: MARN. 16

Figura 8. Daños en la ciudad. Casa de la 4° Calle Oriente inundada por lodo y bloques. La medida que se muestra en la foto es de 1 m, por lo que el espesor del material es de 1.20 m, siendo la altura de piso a techo de 2.20 m. Fuente: MARN. 17

Figura 9. Muestra el viento en 200 y 850 hPa y presión atmosférica en las horas cercanas a las tormentas, viento en 200 y 850 hPa y presión atmosférica media y anomalías. a) Eje de vaguada desde el golfo de México hasta el noroccidente de El Salvador. b) Vaguada desde el centro de Honduras hasta Yucatán. c) Baja presión de 1009 hPa, ubicada al suroeste de Guatemala y 1012 en El Salvador. d) Eje de vaguada desde el noroccidente de El Salvador hasta el norte del Golfo de México, e) Vaguada que se extiende desde Honduras hasta Yucatán. f) Presiones1011 y 1012 hPa en el Océano Pacífico. g) Anomalías positivas de 6 m/s, h) Anomalías positivas con 2 m/s en El Salvador y el Pacífico i) Anomalías positivas de presión de 1 hPa en El Salvador y en el Pacífico neutras. 24

Figura 10. Muestra el viento en 200 y 850 hPa y presión atmosférica en las horas cercanas a las tormentas, viento en 200 y 850 hPa y presión atmosférica media y anomalías. a) Circulación anticiclónica sobre El Salvador y eje de vaguada al noroeste de El Salvador, b) Circulación ciclónica al suroeste de Guatemala y vaguada en Honduras, c) Baja presión al suroeste de Guatemala, 1006 y 1011 hPa, d) Vaguada desde El Salvador hasta el este de Estados Unidos. e) Circulación ciclónica al sureste de El Salvador, f) Baja presión de 1009 y 1011 hPa al suroeste de El Salvador, g) Anomalías positivas con 18 m/s, h) Anomalías positivas con 2 y 5 m/s en el Pacífico y El Salvador, i) Anomalías negativas de la presión hasta con -2 hPa en El Salvador y el Pacífico. 25

Figura 11. Muestra el viento en 200 y 850 hPa y presión atmosférica en las horas cercanas a las tormentas, viento en 200 y 850 hPa y presión atmosférica media y anomalías. a) Eje de dorsal del occidente de El Salvador hasta el sur de Tehuantepec, b) Acercamiento de Onda Tropical, c) Bajas presiones relativas distantes 1009 y 1012 d) Circulación anticiclónica al suroeste de Guatemala y vaguada de norte del golfo de México hasta Yucatán, e) Vaguada al este de Nicaragua, f) Presiones de 1011 y 1012 hPa en El Salvador y Pacífico, g) Anomalías positivas de 8 m/s, h) Anomalías positivas del viento con 8 m/s, i) Anomalías positivas hasta de 1 hPa y neutras en el Pacífico. 26

Figura 12. Muestra el viento en 200 y 850 hPa y presión atmosférica en las horas cercanas a las tormentas, viento en 200 y 850 hPa y presión atmosférica media y anomalías. a) Eje de vaguada del golfo de México hasta el noroccidente de El Salvador y anticiclón, b) Amplia circulación ciclónica, c) Bajas presiones de 1006 y 1010 en las costas de El Salvador y sobre continente, d) Vaguada en el occidente y anticiclón en el oriente de El Salvador, e) Vaguada sobre El Salvador y el norte de Honduras, f) Presión de 1010 y 1011 hPa. g) Anomalías positivas de 10 m/s, h) Anomalías positivas con 5 m/s, i) Anomalías negativas hasta de 1 hPa. 27

Figura 13. Muestra el viento en 200 y 850 hPa y presión atmosférica en las horas cercanas a las tormentas, viento en 200 y 850 hPa y presión atmosférica media y anomalías. a) Circulación anticiclónica en El Salvador, b) Vaguada y circulación ciclónica al suroeste de Guatemala, c) Baja presión al suroeste de Guatemala 1009 y 1012, d) Circulación anticiclónica en Centroamérica, e) Vaguada Sobre El Salvador

y Yucatán, f) Presión de 1010 y 1012 hPa, g) Anomalía positiva con 9 m/s, h) Anomalía positivas con 9 m/s, i) Presiones neutras. 28
Figura 14. Muestra el viento en 200 y 850 hPa y presión atmosférica en las horas cercanas a las tormentas, viento en 200 y 850 hPa y presión atmosférica media del día y anomalías. a) Eje de dorsal desde la costa Este del golfo de México hasta El Salvador, b) Circulación ciclónica al suroeste de El Salvador, c) Baja presión de 1009 hPa, al suroeste de El Salvador y 1010 sobre El Salvador, d) Circulación anticiclónica en el Pacífico al de México, e) Circulación ciclónica en el Pacífico y vaguada sobre Honduras y El Salvador, f) Presión 1010 y 1012 sobre el Pacífico, g) Anomalías positivas con 2 m/s, h) Anomalías positivas sobre El Salvador con 2 m/s y positivas con 4 m/s en el Pacífico, i) Presiones neutras y en el Pacífico al suroccidente negativa de -1 hPa.....29
Figura 15. Muestra el viento en 200 y 850 hPa y presión atmosférica en las horas cercanas las tormentas, viento en 200 y 850 hPa y presión atmosférica media del día y anomalías. a) Eje de dorsal desde el Golfo de México hasta el este de El Salvador, b) Onda del Este desde Honduras hasta noreste de Yucatán, c) Presiones de 1010 sobre la costa Pacífica y 1012 sobre El Salvador y, d) Circulación anticiclónica desde México hasta El Salvador, e) Vaguada asociada a Onda del Este desde Honduras hasta el este de Yucatán, f) Presión 1013 hPa en El Salvador y 1010 en el Pacífico de El Salvador, g) Anomalías positivas hasta con 4 m/s, h)Anomalías positivas hasta con 3 m/s, i) Anomalías positivas con 1 y 2 hPa. 30
Figura 16. Muestra el viento en 200 y 850 hPa y presión atmosférica en las horas cercana a las tormentas, viento en 200 y850 hPa y presión atmosférica del día y anomalías. a) Viento del sur, eje de dorsal desde Panamá hasta El Salvador, b) Eje de vaguada desde el norte de El Salvador hasta el norte de Yucatán, c) Presión 1009 sobre el Pacífico y de 1011 sobre El Salvador, d) Anticiclón sobre Panamá hasta El Salvador, e) Vaguada desde El Salvador hasta el este de Yucatán, f) Presión de 1010 en el Pacífico y 1013 sobre El Salvador, g) Anomalías positivas hasta con 12 m/s, h) Anomalías positivas con 2 m/s, i) Anomalías negativas de presión de 1 hPa.....31
Figura 17. Muestra el viento en200 y 850 hPa y presión atmosférica en las horas cercanas a las tormentas, viento en 200 y 850 hPa y Presión atmosférica media del día y Anomalías. a) Circulación anticiclónica desde el sur de México hasta Nicaragua, b) Vaguada desde Honduras hasta el norte de Yucatán, c) Presiones de 1010 en el Pacífico y 1012 sobre El Salvador, d) Circulación anticiclónica desde México hasta Panamá, e) Vaguada desde Honduras hasta Yucatán, f) Presión de 1012 en el Pacífico y 1013 en El Salvador, g) Anomalías positivas con 6 m/s, h) Anomalías positivas de 4 m/s, i) Anomalías positivas de 2 hPa.....32
Figura 18. Muestra el viento en 200 y 850 hPa y la presión atmosférica en las horas cercanas a las tormentas, viento en 200 y 850 hPa y presión atmosférica media del día y anomalías. a) Circulación anticiclónica sobre Centroamérica, b) Circulación ciclónica al suroeste de El Salvador y CC sobre Nicaragua, c) Baja presión al suroeste de El Salvador de 1007 hPa y sobre continente 1011 hPa, d) Anticiclón sobre Centroamérica, e) Circulación ciclónica al suroeste de El Salvador, f) Bajas presión de 1010 en el Pacífico y 1011 sobre El Salvador, g) Anomalías positivas hasta con 5 m/s, h) Anomalías positivas hasta con 6 m/s, i) Anomalías de presión negativa de -1 hPa.....33
Figura 19. Muestra el viento en 200 y 850 hPa y presión atmosférica en las horas cercanas a las tormentas, viento en 200 y 850 hPa y presión atmosférica media del día y anomalía. a) Vaguada y circulación anticiclónica en el centro y oriente del país, b) Circulación ciclónica al suroccidente del país, c) Circulación ciclónica con 1010 hPa al suroccidente del país y 1013 sobre El Salvador, d) Circulación ciclónica golfo de México y Yucatán, Anticiclón en el Caribe, e) Circulación ciclónica en el Pacífico, f) Presión de 1012 y 1011 milibares en el océano y continente, g) Anomalía positiva de 4 m/s, h) Anomalías positivas con 2 m/s, i) Anomalías de - 1 hPa. 34
Figura 20. Muestra el viento en 200 y 850 hPa y presión atmosférica en las horas cercanas a las tormentas, viento en 200 y 850 hPa y Presión Atmosférica media del día y anomalías. a) Circulación anticiclónica sobre CA, b) Circulación ciclónica al sur de El Salvador, c) Presión de 1011 hPa en el Pacífico y 1013 sobre El Salvador. d) Circulación ciclónica sobre Centroamérica, e) Área de circulación ciclónica sobre el pacífico, f) Presiones de 1012 y 1013 hPa sobre el Pacífico y El Salvador, g) Anomalías positivas hasta con 6 m/s, h) Anomalías positivas con 2 m/s, i) Anomalías positivas de 0.5 hPa.....35
Figura 21.Muestra el viento en 200 y 850 hPa y la presión atmosférica en las horas cercanas a las tormentas, viento en 200 y 850 hPa y presión atmosférica media del día y anomalías. a) Vaguada desde El Salvador hasta Yucatán, b) Vaguada asociada a Onda del Este sobre El Salvador y Honduras, c) Presiones de 1010 y 1013, Pacífico y continente, d) Vaguada desde el golfo de México hasta el norte de Centroamérica, e) Vaguada sobre El Salvador y Honduras, f) Presión de 1012 hPa en el Pacífico y 1013

hPa sobre El Salvador, g) Anomalías positivas hasta con 6 m/s, h) Anomalías positivas hasta con 4 m/s, i) Anomalías neutras de presión. 36
Figura 22. Muestra el viento en 200 y 850 hPa y la presión atmosférica en las horas cercanas a las tormentas, viento en 200 y 850 hPa y presión atmosférica media del día y anomalías. a) Circulación Anticiclónica desde la costa de México hasta El Salvador y vaguada sobre Yucatán, b) Circulación ciclónica en el Pacífico y vaguada desde Nicaragua hasta el norte de Honduras, c) Bajas presiones 1009 y 1012 hPa sobre el Pacífico y El Salvador, d) Anticiclón desde el golfo de México hasta El Salvador, e) Vaguada en Honduras y El Salvador y Circulación ciclónica en el Pacífico, f) Presiones de 1012 hPa en el Pacífico y 1014 sobre El Salvador, g) Anomalías positivas hasta con 6 m/s, h) Anomalías positivas con 7 m/s, i) Anomalías positivas hasta con 1 hPa. 37
Figura 23. Muestra el viento en 200 y 850 hPa y la presión atmosférica en las horas cercanas a las tormentas, viento en 200 y 850 hPa y presión atmosférica media del día y anomalías. a) Vaguada desde El Salvador hasta el norte de Yucatán, b) Circulación ciclónica al sur de El Salvador, c) Baja presión al sur de El Salvador de 1008 hPa y 1010 sobre El Salvador, d) Vaguada desde el Golfo de México hasta el norte de El Salvador, e) Viento del noreste y débil circulación ciclónica en el Pacífico, f) Presión en la costa Pacífica 1009 hPa y de 1010 hPa sobre El Salvador, g) Anomalías positiva con 12 m/s, h) Anomalías positivas con 7 m/s, Anomalías negativas con -1 hPa....38
Figura 24. . Mapa de San Salvador y municipios impactados, clasificados como bajo, moderado y alto para el año 2016. Fuente: propia. 47
Figura 25. Mapa de San Salvador y municipios impactados, clasificados como bajo, moderado y alto para el año 2016. Fuente: propia. 47
Figura 26. Mapa de San Salvador y municipios impactados, clasificados como bajo, moderado y alto para el año 2017. Fuente: propia. 48
Figura 27- Número de impactos por municipios durante los eventos de lluvias intensas en el 2015, 2016 y 2017. Fuente: propia. 49
Figura 28. Tipo y número de impactos durante los eventos de lluvias intensas en el 2015, 2016 y 2017. Fuente: propia. 49
Figura 29. Número y tipo de hospitales expuesto en el 2015, 2016 y 2017, tomando un buffer de 500 m. Fuente: propia. 50
Figura 30. Número de escuelas públicas y privadas expuestas durante los años 2015, 2016 y 2017, tomando un buffer de 500m. Fuente: propia. 50
Figura 31. Número de rutas expuestas en el 2015, 2016 y 2017, tomando un buffer de 500 m. Fuente: propia. 51
Figura 32. Número de impactos asociados a sistemas atmosféricos que generaron fuertes lluvias. Fuente: propia. 51
Figura 33. Muestra los mapas de variables meteorológicas que se obtuvieron de reanálisis NCEP/FNL, Operational Model Global Tropospheric Analysis, NCAR/UCAR, para cada evento. Condición atmosférica asociada a la baja presión al suroeste de Guatemala 18/10/2015....64
Figura 34. Muestra los hospitales expuestos durante el 2015, 2016 y 2017 en un radio de 500 m. Fuente: propia. 64
Figura 35. Muestra las escuelas expuestas durante el 2015, 2016 y 2017 en un radio de 500 m. Fuente: propia. ..65
Figura 36. Muestra las vías expuestas durante el 2015, 2016 y 2017 en un radio de 500 m. Fuente: propia. 65

Lista de Abreviaturas

1. NCEP (National Centers for Environmental Prediction)
2. NCAR (National Center Atmospheric Research)
3. UCAR (University Corporation for Atmospheric)
4. FNL (Final)
5. SCM (Sistemas Convectivos de Mesoescala)
6. MCC (Mesoecale Convective Complex)
7. ZCIT (Zona de Convergencia Intertropical
8. READY (Air Resources Laboratory)
9. NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)
10. TUTT (Tropical Upper Tropospheric Trough)
11. DYGESTIC (Dirección General de Estadísticas y Censos de El Salvador)
12. OMM (Organización Meteorológica Mundial)
13. DOA (Dirección del Observatorio Ambiental)
14. SMN (Servicio Meteorológico Nacional)
15. METAR (Meteorological Aerodrome Report)
16. MARN (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales)
17. COMET (Construction Organizing Membership Education Training)
18. CPM (Centro de Pronóstico Meteorológico)
19. ENOS (El Niño Oscilación del Sur)
20. TT (Total de Totales)
21. GDI (índice de Gálvez y Davison**)**
22. CAPE (Convective Available Potential Energy)
23. K Índex, (Índice K)
24. CEPREDENAC (Centro de Coordinación para la Prevención de los Desastres Naturales)
25. AMSS (Área Metropolitana de San Salvador)

Capítulo 1

1. Introducción

El Salvador, al igual que muchos países del trópico, se ve afectado por eventos atmosféricos que generan profunda convección (Mejía y Poveda 2005). Sistemas que, en su desplazamiento por un determinado lugar, producen intensas precipitaciones con distribución temporal y espacial irregular (Maddox 1980), y que se conocen en español como Sistemas o Complejos Convectivos de Mesoescala, (SCM), y en inglés como Mesoscale Convective Complexes (MCC). Este tipo de sistemas atmosféricos se desarrollan en diferentes partes del mundo como el Caribe y Centroamérica (Maddox 1980).

Los SCM están asociados a nubes de amplio desarrollo, es decir sistema de nubes convectivas que, por lo general, en el trópico se desarrollan rápidamente, normalmente con una duración de minutos hasta seis horas, pero que pueden alcanzar hasta dos días en algunos sectores como máximo (Maddox 1980). La formación y el desarrollo de estos sistemas, depende de la dinámica atmosférica de otras escalas como la sinóptica, e inclusive la global (Poveda 1998). La combinación de factores a diferentes escalas, como la orografía del lugar, las brisas locales, el calor latente disponible y la fuente de calor que los genera, juegan un papel preponderante y determinante para la formación de los SCM (Maddox 1980). Este tipo de sistemas, por lo general, ocurren en horas nocturnas y sobre áreas continentales (Mejía y Poveda 2005).

De acuerdo con el monitoreo continuo que se desarrolla en el Servicio Meteorológico de El Salvador (MARN 2011), los sistemas de mesoescala, influyen año con año sobre el territorio salvadoreño, generando fuertes precipitaciones de lluvia y granizo, actividad eléctrica y ráfagas de viento previo o durante su desplazamiento. Además, estos sistemas, están vinculados con el desplazamiento de ondas tropicales, vaguadas, ondas del este, la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) y bajas presiones.

En Centroamérica, el Caribe y México son recurrentes las afectaciones de lluvias intensas producidas por ciclones tropicales que afectan grandemente la región (Farfán et al. 2013). Basta que influencien de forma indirecta, para producir importantes daños (Retana 2012).

En El Salvador estos sistemas han incidido, modulando la ZCIT, induciendo bajas presiones en la costa pacífica (Guzmán 1971), y permitiendo el ingreso de abundante humedad del océano Pacífico en el verano boreal (Amador et al. 2006). Se ha observado que sistemas clasificados débiles como bajas presiones pueden causar fuertes lluvias en Centroamérica (Alfaro y Quesada 2010). Por tanto, América Central está expuesta a sistemas atmosféricos que causan impactos a la población (Pérez-Briceño et al. 2016). Impactos que tienen características como la exposición social y el riesgo de la población de la Región Centroamericana (Alfaro et al. 2010).

Con el fin de identificar y caracterizar los sistemas atmosféricos cotidianos que causan impacto en El Salvador, se abordará en este trabajo aquellos que influencian frecuentemente y típicamente durante la estación lluviosa, incluyendo los sistemas de baja presión que se desarrollan en la cercanía del territorio salvadoreño, tanto en el Caribe como en el Océano Pacífico adyacente. La caracterización de los sistemas sinópticos (MARN 2007), asociados a los sistemas de mesoescala, que repercuten localmente en el territorio salvadoreño se hará mediante el uso de reanálisis del NCAR-UCAR y NCEP-NCAR. Además, se estudiarán únicamente aquellos eventos o sistemas atmosféricos que se asociaron localmente a impactos en San Salvador y sus alrededores.

2. Antecedentes

Durante la estación lluviosa de mayo a octubre, El Salvador se ve influenciado casi a diario por tormentas eléctricas intensas, que causan riesgo a la población. Estos fenómenos son producto de la combinación de sistemas atmosféricos de escala local, de mesoescala y escala sinóptica. Entre estos se tienen los cumulunimbus que, generalmente, se forman en las faldas de los volcanes, las ondas tropicales u ondas del este, vaguadas, la Vaguada Troposférica de Capas Altas (TUTT-Tropical Upper Tropospheric Trough por sus siglas en inglés) (Knaff 1997), líneas de inestabilidad y bajas presiones (Guzmán 1971). Estos sistemas generan lluvias intensas, granizo y fuertes vientos, produciendo impactos económicos y, en ocasiones, pérdidas humanas.

Por las razones expuestas, es necesario analizar y caracterizar las tormentas eléctricas severas que han generado impactos en el área metropolitana, con el fin primordial de identificar y

caracterizar los sistemas atmosféricos y la combinación de estos que pueden llevar a la generación de impactos en el área del Gran San Salvador.

3. Justificación

El objetivo de realizar esta investigación en El Salvador y, en particular en el área metropolitana de la capital San Salvador, es porque, tal como se ha mencionado anteriormente, las tormentas intensas causan inundaciones urbanas, crecidas repentinas, derrumbes, caída de árboles, entre otros impactos, que afectan a los pobladores del Área Metropolitana de San Salvador y sus vecindades, muchos de ellos habitando en zonas peligrosas. Esta ciudad tiene una densidad poblacional de 1,775,447 en 888 kilómetros cuadrados (DYGESTIC 2016), condiciones que incrementan el riego y la exposición (OMM 2015), como ha sucedido en años anteriores.

En tal sentido el SMN de El Salvador, específicamente la Dirección del Observatorio Ambiental, DOA, del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, MARN, está interesada en caracterizar los sistemas atmosféricos que causan precipitaciones intensas de 1 mm/minuto o más, y que conllevan a impactos (OMM 2015).

A la vez, se ha identificado, de acuerdo con el monitoreo continuo de la Dirección del Observatorio Ambiental, que precipitaciones de alrededor de 60 mm en un corto tiempo, con intensidad de 1 mm/minuto y, muy recientemente, hasta de 2 a 4 mm/minuto, causan problemas de inundaciones o crecidas de ríos y quebradas, principalmente en las zonas urbanas como es el Gran San Salvador (Hernández 2012).

La OMM ha pedido a sus miembros desde el inicio de su existencia a velar por "la protección a la vida y bienes materiales" (OMM 2010). Exigencia que en la actualidad es mayor, requiriendo que las "predicciones tengan en cuenta los impactos" (OMM 2015). Por tanto, es importante destacar que la caracterización que se haga de los eventos atmosféricos puede servir de base para la elaboración futura de pronósticos meteorológicos que toman en cuenta los impactos. Tanto las instituciones de vigilancia y monitoreo, así como las instituciones dedicadas a la emergencia, están velando ante la prevención y preparación de las comunidades más vulnerables y expuestas (Jacks y Davison 2010).

4. Objetivos Generales y Específicos

4.1 Objetivos generales

1. Caracterizar físicamente los eventos meteorológicos de tipo tormentas intensas que han generado impactos durante 2015-2017 en el área metropolitana de San Salvador.

2. Generar una base de datos de los eventos que produjeron impacto y mapas de las zonas donde se presentaron tormentas intensas que produjeron impactos en San Salvador.

4.2 Objetivos específicos

1. Identificar y analizar las condiciones atmosféricas existentes, a escala sinóptica y local de los sistemas meteorológicos asociados al paso de tormentas intensas en el área metropolitana de San Salvador que generaron impactos durante los años del 2015 al 2017, producidas por ondas tropicales o del este, vaguadas, o por influencia de ZCIT y bajas presiones.

2. Georreferenciar las zonas donde se generaron los diferentes tipos de impactos producto de las tormentas intensas ocurridas en el Gran San Salvador durante la época lluviosa del 2015 al 2017.

5. Marco Teórico

5.1 Impactos de sistemas hidrometeorológicos

5.1.1 Generación de celdas de tormentas

Las celdas de tormentas se generan de nubes de amplio desarrollo llamadas cumulunimbus (Maddox 1980), las cuales dependen del grado de inestabilidad atmosférica en un determinado lugar o región (López 2011). Para la formación de este tipo de nubosidad interactúan los sistemas de diferente escala, principalmente la escala sinóptica, mesoescala y la escala local.

De acuerdo a algunos investigadores, la mesoescala se divide en diferentes tipos, entre ellas se menciona la Alfa, la Beta y la Gamma (Maddox 1980), las cuales varían de acuerdo a su duración y extensión del sistema (COMET 2013). Como ya se dijo estos sistemas se conocen como SCM. Son estructuras organizadas de varios cumulunimbus o tormentas que pueden tener más de 100 km de extensión y, a su vez, generan fuertes precipitaciones. Estas tormentas ocurren en diferentes partes del mundo (COMET 2014a), por ejemplo en América, se conoce de algunos lugares donde se generan los SCM, como en los Grandes Lagos de

Texas, en el Caribe, sobre el sur de Cuba y sobre el Caribe Oeste y en algunas porciones de América Central (Maddox 1980).

A continuación la Cuadro 1, muestra la clasificación de la mesoescala con sus respectivas dimensiones, tiempo de duración y estructura meteorológica característica, α, β y γ.

Cuadro 1. Muestra la clasificación de la mesoescala, con sus respectivas dimensiones y la estructura típica.

Nombre	Dimensiones		Estructura meteorológica típica
Mesoescala-alfa (α)	200-2000 km	6 h a 2 días	Corrientes en chorro, huracanes pequeños, anticiclones débiles
Mesoescala-beta (β)	20-200 km	30 min. a 6 h	Campos de vientos locales, vientos de montaña, brisas de tierra/mar, complejos convectivos de mesoescala (CCM), tormentas grandes
Mesoescala-gamma (γ)	2-20 km	3 a 30 min.	La mayoría de las tormentas, los cúmulos grandes, tornados muy grandes

Fuente: COMET (2011).

https://www.meted.ucar.edu/mesoprim/mesodefn_es/navmenu.php?tab=1&page=5.0.0

La observación y el monitoreo continuo que hace el Centro de Pronóstico Meteorológico (CPM) del SMN de El Salvador, de las condiciones atmosféricas, revisadas diariamente en el Weather Prediction Center/Tropical Desk, EUA, institución que con cierta frecuencia durante la estación lluviosa pronostica potencial de SCM en el Golfo de Fonseca, dan seguimiento a los sistemas atmosféricos que en ciertas ocasiones se desplazan por el territorio salvadoreño. Las condiciones que, generalmente, están apoyadas en todas las capas de la troposfera en ocasiones están asociadas al desplazamiento de ondas tropicales o del Este, Líneas de Inestabilidad y Bajas Presiones (Gálvez y Davison 2013; 2016). Además, estos sistemas están asociados a fuertes vientos, intensas precipitaciones con fuertes tormentas eléctricas que pueden producir granizo e, inclusive, torbellinos o tornados, en aquellas zonas por lo general planas (COMET 2014a).

De acuerdo a las estadísticas en el trópico estos sistemas ocurren, principalmente, en los meses de julio y octubre (COMET 2014a). De acuerdo a lo observado y registrado en los Resúmenes Sinópticos elaborados por el CPM/SMN/DOA/MARN, suceden durante la estación lluviosa, con énfasis en julio y octubre, en horas de la tarde que es cuando la convección se profundiza o se desarrolla, en días despejados cuando se tiene máximo

calentamiento del suelo por la radiación solar y durante la noche, cuando estas nubes alcanzaron su máximo desarrollo o amplitud.

Los SCM son sistemas de gran desarrollo y extensión que son factibles de observar mediante imágenes satelitales del canal infrarrojo cuando el tope de la nubes alcanza alturas mayores a los 10 Km, así como también mediante la información de radares (Manzanilla et al. 2005). Los SCM están íntimamente relacionados o interactúan con la escala sinóptica, contribuyendo que la convección se profundice en las diferentes capas de la troposfera (Fritsch et al. 1986).

5.1.2 Tormentas eléctricas

Las tormentas eléctricas asociadas a cumulunimbus son sistemas atmosféricos que producen vientos acelerados y fuertes precipitaciones en algunas ocasiones asociadas inclusive a granizo. Estas tormentas de acuerdo a su formación y estructura se dividen en unicelulares, multicelulares y supercélulas (COMET 2014a).

Las tormentas eléctricas ocurren en diferentes puntos o zonas del planeta, principalmente en el trópico, son producto de la inestabilidad atmosférica y de la alta concentración de humedad y del calor latente disponible en la atmósfera. Las tormentas se caracterizan por la intensidad y duración, condición que está íntimamente ligada a la cizalladura del viento en la vertical, estas tormentas pueden ser de tres tipos: ordinarias o de celda única, multiceldas y de súper celda (COMET 2014a).

5.1.3 Sistemas atmosféricos de mesoescala y escala sinóptica asociados a tormentas eléctricas

5.1.3.1 Ondas del Este u ondas tropicales:

Existen diferentes sistemas atmosféricos que generan tormentas eléctricas intensas en Centroamérica, entre estos se pueden mencionar, ondas del Este u ondas tropicales, líneas de instabilidad, vaguadas y sistemas de bajas presión. Algunos de estos sistemas se asocian o interactúan con la ZCIT, en su desplazamiento por el mar Caribe y Centroamérica, contribuyendo a la generación de intensas precipitaciones (Taylor y Alfaro 2005).

La Ondas Tropicales también son influenciados por la humedad que aporta el Chorro de Bajo Nivel del Caribe (Amador 2008), y que interactúan con la orografía de Centroamérica, favoreciendo las precipitaciones y la convección (Amador et al. 2016). De igual manera, la

interacción del océano y la atmósfera es fundamental para la formación de los sistemas atmosféricos que generan lluvias intensas en Centroamérica (Amador et al. 2016).

En la parte frontal de las ondas tropicales o del Este, en capas bajas existe divergencia, mientras que en capas altas convergencia (Guzmán 1971), considerada la parte delantera de la Onda Tropical o del Este menos convectiva que la parte posterior al eje (COMET 2014b), por esta razón sobre El Salvador la lluvia intensa se origina hasta un día posterior al paso del eje de la onda.

Estas ondas se mueven de este a oeste a una velocidad aproximada de 10 a 15 nudos (Guzmán 1971), se desplazan sobre el territorio salvadoreño, con una frecuencia de 3 a 5 días. En ocasiones son débilmente activas, moderadamente activas, activas o muy activas, de acuerdo a lo verificado en los Resúmenes Sinópticos del CPM en aproximadamente 12 años.

En el SMN de El Salvador se ha observado que las Ondas Tropicales activas y muy activas generan fuertes precipitaciones previo, durante y después, del paso del eje de la Onda Tropical. Este tipo de Ondas Tropicales o del Este están asociadas a fuertes ráfagas de vientos que pueden alcanzar los 40 a 60 kilómetros por hora o más. Se han tenido registros hasta de 120 kilómetros por hora (Guzmán 1971).

Las condiciones de activación de las Ondas Tropicales o del Este también depende de la fase en la que se encuentre el ENOS (Amador 2011). Si es en fase cálida o “El Niño” las ondas tropicales se ven inhibidas o poco activas, por el aceleramiento del flujo del Este, o chorro de bajo nivel (Amador 2008).

5.1.3.2 Ondas inducidas

Este tipo de ondas inducidas se generan por sistemas de la troposfera alta asociados por lo general la vagada TUTT, o ciclones en altura que se profundizan induciendo una vaguada en el flujo del Este, que se mueve en superficie o en niveles bajos a medida se desplaza la vaguada o el ciclón de capas altas (Guzmán 1971).

Las Ondas del Este y Ondas Tropicales se diferencian de la vaguada inducida por la TUTT en su movimiento, las primeras se mueven en función del flujo del Este. Mientras que las inducidas se mueven en relación al sistema de la troposfera alta.

5.1.3.3 Bajas presiones

Los sistemas de baja presión son sistemas que se presentan durante la estación lluviosa, asociados por lo general al desplazamiento de ondas tropicales que se convierten en sistemas más organizados e inducen, por lo general, un sistema de baja presión en la costa pacífica de Centroamérica (Guzmán 1971). Este tipo de sistema se presenta en el viento del Oeste procedente del Pacífico y penetra hasta el interior del Mar Caribe, con dirección hacia la costa de Centroamérica y México (Amador et al. 2006). Se ha observado operativamente en el SMN de El Salvador que algunas de estas bajas presiones en ciertas ocasiones están asociadas al Cinturón de Bajas Presiones de la ZCIT y que sistemas identificados como débiles pueden producir fuertes lluvias en Centroamérica (Alfaro y Quesada 2010).

5.1.3.4 Zona de Convergencia Intertropical, ZCIT

Durante la estación lluviosa el conglomerado nuboso que se ubica entre los 5 grados Norte y 5 grados Sur conocida como la ZCIT, o cinturón de calmas ecuatoriales (Guzmán 1971), se observa más o menos cercana a Centroamérica, dependiendo de la época del año (Hidalgo et al. 2015; Quirós-Badilla e Hidalgo 2016a;b). Esta juega un papel importante cuando se mueve hacia el norte y en años neutros del ENOS, se muestra la doble ZCIT (Amador et al. 2016).

Las condiciones mencionadas permiten que las lluvias en septiembre se incrementen, (Guzmán 1971). De acuerdo a lo observado en los Informes Sinópticos del SMN y el reanálisis, la ZCIT se modula con el desplazamiento de Ondas Tropicales activas.

La Figura 1, muestra la lluvia asociada a la posición de la ZCIT durante los meses de enero y julio, respectivamente.

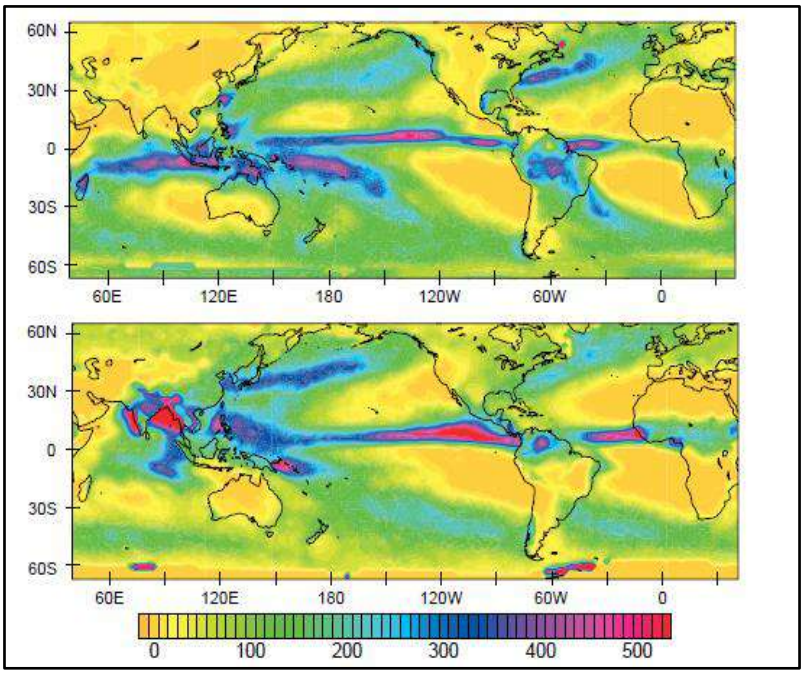


Figura 1. Posición promedio climatológica de precipitación en cm asociado a la ZCIT, basado en imágenes satelitales infrarrojas y microondas en enero (arriba) y julio (abajo). Fuente: NOAA, National Center for Environmental Prediction, CMAP Projec, 2005.

5.1.4 Índices de estabilidad atmosférica

Existen diversos índices de estabilidad atmosférica para verificar los diferentes parámetros de convección como el Total de Totales (TT), el Índice de Levantamiento (Lifted Index), K Index, el CAPE (Convective Available Potential Energy en inglés) y el más recientemente y tropicalizado índice Gálvez y Davison, GDI.

5.1.4.1 El Total de Totales

Usa el método de la parcela y es conocido como TT, Cuadro 2, el cual se calcula mediante la estimación de la temperatura (T) y el punto de rocío (Td) en niveles bajos de la troposfera, en 850 hPa y a través del cálculo de la temperatura en capas medias, específicamente en 500 hPa. Se presenta mayor inestabilidad atmosférica cuando la temperatura y el punto de rocío en 850 hPa, es mayor que la temperatura en 500 hPa, resultando un TT mayor (Perea et al. 2015).

$$TT = Td_{850} + T_{850} - 2T_{500}$$

Cuadro 2. Rangos del índice TT, principalmente para latitudes medias

Valor del Índice TT	Tiempo Esperado
Menor 44	Estable
44 a 50	Tormentas
50 a 54	Posibilidad de tormentas severas
Mayor de 54	Posibilidad de tormentas severa con tornado

Fuente: Perea et al., AEMET, 2015.
http://www.aemet.es/documentos/es/conocermas/recursos_en_linea/publicaciones_y_estudios/publicaciones/NT_17_AEMET/NT17_diagnostico_convectivo.pdf

5.1.4.2 El Liftex (LI)

También usa el método de parcela, Cuadro 3, se calcula la T para los niveles desde 700 hPa a 500 hPa y la diferencia de temperatura ambiente en estos niveles ($T_a - T_p$), es una medida de la flotabilidad de la burbuja adiabáticamente (Perea et al. 2015).

$$LI5 = T_a^{500} - T_p^{500} \qquad LI7 = T_a^{700} - T_p^{700}$$

Cuadro 3 . Rangos del índice LI, principalmente para latitudes medias.

Valor LI	Grado de Estabilidad
> 0	Estable
0 a -3	Inestable
-3 a - 6	Moderadamente inestable
-6 a -9	Muy inestable
< - 9	Extremadamente inestable

Fuente: Perea et al., AEMET, 2015.
http://www.aemet.es/documentos/es/conocermas/recursos_en_linea/publicaciones_y_estudios/publicaciones/NT_17_AEMET/NT17_diagnostico_convectivo.pdf

5.1.4.3 El CAPE

Es un método termodinámico y es la energía potencial convectiva disponible para activar la flotabilidad de una burbuja con movimiento ascendente o vertical. Es el trabajo que se hace a una burbuja para llevarla hacia arriba. Se dice que el CAPE será mayor cuando la diferencia de temperatura entre la burbuja cálida y el entorno frío, generan ascenso vertical y fuerte

convección (Fig. 2). Teóricamente, este índice es la velocidad vertical máxima que adquiere la burbuja en su ascenso (Perea et al. 2015). El cuadro 4, muestra los rangos del índice CAPE y el grado de inestabilidad que presenta.

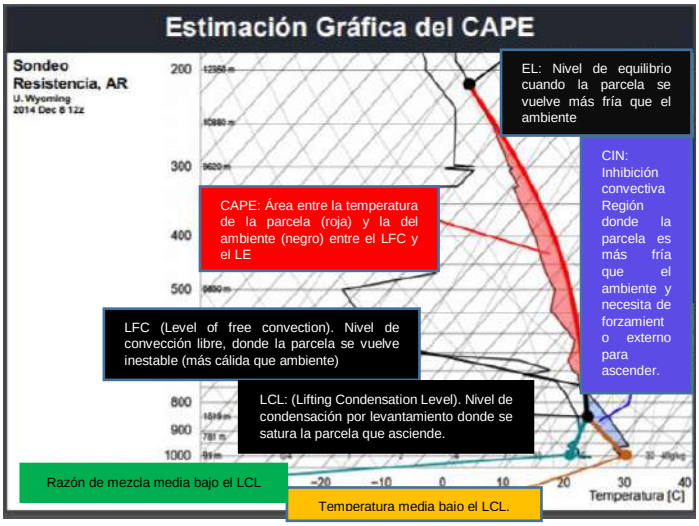


Figura 2. Muestra el área bajo la curva asociada al CAPE en un diagrama termodinámico. Fuente: Mike Davison y José Gálvez, Presentación. NOAA.

http://ftp.wpc.ncep.noaa.gov/mike/CHILE_2016/Presentations-PDF/3_%C3%8Dndices%20de%20Estabilidad.pdf

Este se define como: la energía para que una parcela se acelere hacia arriba en la vertical y es el área entre la adiabática húmeda de la parcela y la curva de la convección:

$$CAPE = g\left[\int_{NCL}^{NE} \frac{T_{vb-}\, T_{va}}{T_{va}}\right]$$

En donde

$NCL, es\ el\ nivel\ de\ convección\ libre\ del\ estado\ de\ la\ parcela, NE, corresponde\ al\ nivel\ \ de\ equilibrio, T_{vb}\ \ temperatura\ virtual\ de\ la\ burbuja\ ascendente\ y\ T_{va}\ temperatura\ \ virtual\ del\ ambiente.$

Cuadro 4.Rangos del índice CAPE, principalmente para latitudes medias.

Valor de CAPE	Grado de Estabilidad
< 0	Estable
0 a 1000	Inestable
1000 a 2500	Moderadamente inestable
2500 a 3500	Muy inestable
> 3500 a 4000	Extremadamente inestable

Fuente: Perea et al., AEMET, 2015. http://www.aemet.es/documentos/es/conocermas/recursos_en_linea/publicaciones_y_estudios/publicaciones/NT_17_AEMET/NT17_diagnostico_convectivo.pdf

5.1.4.4 K Index

Este índice considera en la vertical los niveles de 850, 700 y 500 hPa y el punto de rocío en los niveles 850 y 700 hPa. Entre más alta es la humedad y la diferencia de temperatura entre los niveles 850 y 500, mayor es el índice K, y el potencial de convección también es mayor, Cuadro 5.

$$K = (T_{850} - T_{500}) + Td_{850} - (T_{700} - Td_{700})$$

Cuadro 5. Rangos del índice K, principalmente para latitudes medias.

Valor del índice K	Probabilidad de Tormentas (%)
K< 15	0
15 <= K< = 20	20
21 <= K< = 25	20 a 40
26 <= K< = 30	40 a 60
31 <= K< = 35	60 a 80
40 < K	Aproximadamente 100

Fuente: Perea et al., AEMET, 2015. http://www.aemet.es/documentos/es/conocermas/recursos_en_linea/publicaciones_y_estudios/publicaciones/NT_17_AEMET/NT17_diagnostico_convectivo.pdf

5.1.4.5 Índice de Gálvez y Davison, (GDI)

El GDI fue desarrollado en el 2014 por National Weather Service, Weather Prediction Center, International Desk de los Estados Unidos de América, con el fin de contar para el trópico con un índice que refleje la alta inestabilidad de esta región. Además, debido a que los índices antes mencionados en regiones tropicales no tienen buenos resultados para pronosticar tiempo severo en el trópico, excepto el índice K (Davison y Gálvez 2016). Por la misma

inestabilidad y flotabilidad de las burbujas calientes en el trópico surgió la necesidad de generar un índice de estabilidad para mejorar el pronóstico de convección en los trópicos, donde los procesos termodinámicos son más rápidos y más intensos (Davison y Gálvez 2016). El propósito de crear este índice fue mejorar el pronóstico de zonas de mayor convección en el trópico (Davison y Gálvez 2016).

Etapas que los autores consideraron para crear este índice:

1. Se identifican los procesos generadores de fuerte convección en la región.
2. Se determinan los procesos de reflejo del sistema o sistemas mediante el análisis de variables.
3. Se hace una combinación de las variables, asignándole un valor que refleje la inestabilidad convectiva de la condición atmosférica evaluada.

Con estos tres pasos se evalúa la temperatura potencial equivalente, conocida como THTE, y los procesos que modulan la convección vertical, para la generación de este índice los autores consideraron la temperatura y la razón de mezcla en 4 niveles, estableciendo el siguiente algoritmo descrito en la Figura 3 (Davison y Gálvez 2016).

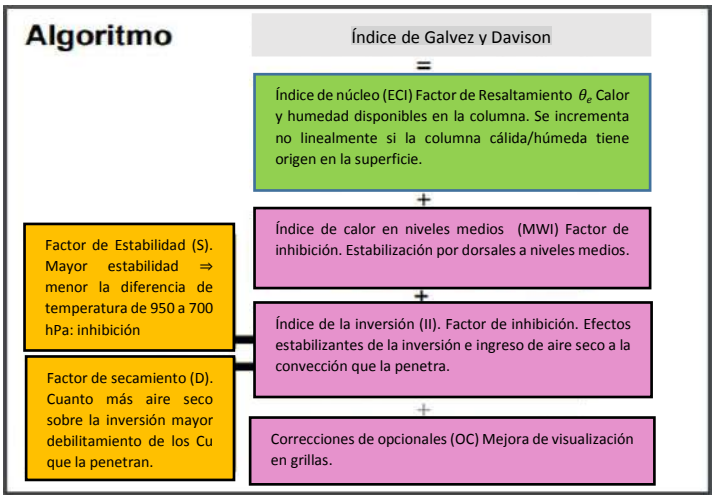


Figura 3. Muestra el algoritmo generado para la estimación del GDI. Fuente: Mike Davison y José Gálvez, Nacional Weather Service, Weather Prediction Center, NOAA.

http://ftp.wpc.ncep.noaa.gov/mike/CHILE_2016/Presentations-PDF/3_%C3%8Dndices%20de%20Estabilidad.pdf

Con el algoritmo mencionado en la Fig. 3, se determinaron las zonas donde éste funciona óptimamente, catalogadas como óptimo, bueno y menos, para el verano del hemisferio Norte

y Sur, respectivamente (Davison y Gálvez 2016). De acuerdo con la Fig. 4, para la mayor parte del Norte de Centroamérica, el Caribe interior y el Este del Caribe funciona óptimamente para evaluar las tormentas convectivas en la región. Para Panamá y Costa Rica se considera que tiene un resultado bueno. De acuerdo al monitoreo operativo del SMN el GDI, tiene muy buenos resultados siempre que las condiciones de inestabilidad de la troposfera baja se ven apoyadas en capas medias y superiores. También se ha observado que en condiciones de lluvias tipo temporal el GDI sobreestima, seguramente porque permanece por más tiempo.

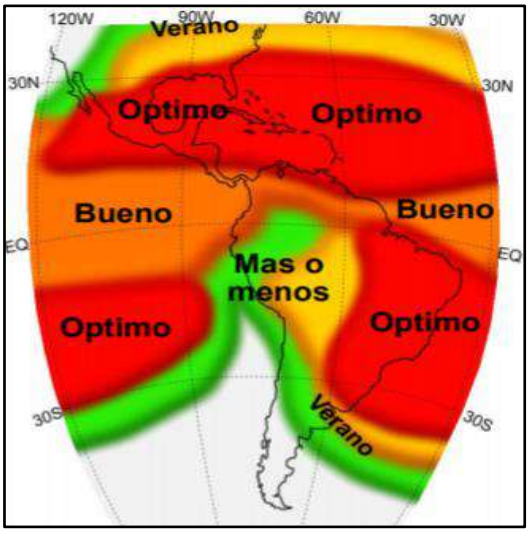


Figura 4. Muestra las zonas donde el GDI funciona de forma óptima, bueno y menos. Fuente: Mike Davison y José Gálvez, National Weather Service, Weather Prediction Center, NOAA.
http://ftp.wpc.ncep.noaa.gov/mike/CHILE_2016/Presentations-PDF/3_%C3%8Dndices%20de%20Estabilidad.pdf

A continuación la Fig. 5, muestra la tabla que sirve de guía para evaluar la convección profunda, siendo el máximo GDI > a + 45, que muestra potencial tormentas fuertes dispersas con nubes de tormenta tipo cumulunimbus organizados con más de una celda convectiva (WPC 2014).

Figura 5. Muestra los rangos del GDI y el potencial de desarrollo convectivo que puede producir el índice. Fuente: National Weather Service, Weather Prediction Center, Tropical Desk, NOAA.
ttp://www.wpc.ncep.noaa.gov/international/gdi/

5.2 Afectaciones de tormentas eléctricas en Centroamérica y El Salvador

La Región Centroamericana está expuesta a la interacción de sistemas hidrometeorológicos de escala sinóptica, como de la mesoescala. (Pérez et al. 2016).

Los sistemas que afectan de mayo a octubre a El Salvador son las ondas tropicales u ondas del este, vaguadas, la TUTT y bajas presiones (Guzmán 1971). Debido a la incidencia de este tipo de fenómenos en El Salvador se tienen registros de precipitación en 24 horas de 100 mm e, inclusive, se han tenido registros de hasta 220 mm de lluvia debido a una vaguada. Se dice que el 70 % de las tormentas son convectivas, y son generadas por sistemas de la escala media o sinóptica (Guzmán 1971).

Generalmente, se presenta gran inestabilidad adiabática húmeda que permite que la nubosidad logre alcanzar alturas arriba del punto de congelación, produciendo para El Salvador lluvias con intensidades de hasta 3 y aproximadamente 4 mm por minuto (Guzmán 1971).

A la vez, se ha identificado en la Dirección del Observatorio Ambiental, DOA, que precipitaciones de 1 mm/segundo o más, causan problemas de inundaciones o crecidas repentinas de ríos y quebradas en el territorio salvadoreño, principalmente para las cuencas de corto recorrido como el de la zona urbana del Gran San Salvador (Hernández 2012).

Figura 6. Daños producidos por la tormenta del día 3 de julio de 2008. Fuente: El Diario de Hoy.

https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQePWYfNwl7W6W1TjAcbQVLu_SX4Bld4vSZ0bxV76m1Wtg6kJPS

La figura 6 muestra los daños en un bus de pasajeros por el fuerte impacto que tuvo al ser arrastrado por la crecida del río Acelhuate, en el sector Arenal de Montserrat en el Área Metropolitana de San Salvador, AMSS, perdiendo la vida 32 personas que iban a bordo. Con acumulados de 116 mm en menos de 24 horas en la estación de PROCAFÉ (Latitud Norte, 13.68 y Longitud Oeste, -89.28), aguas arriba de este sector (Hernández 2012).

A continuación en las Figuras 7 y 8, se presenta el impacto que produjo la baja presión inducida en el Pacífico por Huracán Ida cuando se movía por el norte de Yucatán, en noviembre de 2009. Sistema atmosférico que causó pérdidas significativas a la vida y bienes materiales en Verapaz, en las faldas del Volcán de San Vicente tal como se muestra a continuación (MARN, 2009).

Figura 7. Al fondo, cima occidental del volcán Chichontepec, San Vicente. A una altitud de aproximadamente 1800 msnm, se observa el área donde inició el deslave que impactó en la ciudad de Verapaz. Fuente: MARN.

Figura 8. Daños en la ciudad. Casa de la 4° Calle Oriente inundada por lodo y bloques. La medida que se muestra en la foto es de 1 m, por lo que el espesor del material es de 1.20 m, siendo la altura de piso a techo de 2.20 m. Fuente: MARN.

5.3 Vulnerabilidad, riesgo e impactos en Centroamérica y El Salvador por eventos hidrometeorológicos

La recurrencia e impacto de fenómenos hidrometeorológicos para cada estación lluviosa en Centroamérica se ve influenciada principalmente por el grado de vulnerabilidad de algunos sectores (Pérez et al. 2016).

La cantidad de pobladores, el nivel socioeconómico de una determinada zona, país o región hace que más personas estén expuestas a los impactos hidrometeorológicos, tal es el caso de Centroamérica que tiene un total de población de 45 millones de habitantes (Pérez et al. 2016). Y una media de aproximadamente 84,04 hab/km^2, mayor que la que se en todo América Latina. (PRECANSA II 2011).

El Salvador es el territorio más pequeño en extensión de toda la región centroamericana con 21,000 km^2 (Ibarra 2008), y posee un total de 6.108 millones de habitantes (Pérez et al. 2016).

De acuerdo a lo mencionado el territorio salvadoreño por la densidad poblacional se vuelve mayormente expuesto a los impactos que generan los fenómenos hidrometeorológicos recurrentes (Guzmán 1971), por ser un territorio con poca extensión y muy alta densidad poblacional.

Estas condiciones bajo amenazas hidrometeorológicas llevan a la cuantiosa pérdida de vidas humanas y bienes materiales, las cuales conllevan a frenar el desarrollo y crecimiento (UNISDR 2015), por esta razón es importante conocer el riesgo, la exposición y

vulnerabilidad de una localidad, país o región. Se han clasificado los desastres basados en la tendencia del riesgo, estructurados como intensivos y extensivos. Intensivos se consideran cuando en una localidad se tuvo 25 o más pérdidas de vidas humanas y 300 o más viviendas; dañadas o destruidas (UNISDR 2015). En Centroamérica el rápido crecimiento de las zonas urbanas es un desafío para el desarrollo, además se ha evaluado que el ritmo con el que crece la población en las ciudades no es el mismo con el desarrollo y crecimiento de calidad de las viviendas (BM 2016), esta condición, probablemente, conlleve al riesgo y peligro de las personas que habitan en este tipo de viviendas ante la presencia de fenómenos meteorológicos e hidrológicos.

Es importante que las iniciativas existentes de prevención y manejo del riesgo se continúen fortaleciendo en Centroamérica a través de la concientización y coordinación con las instituciones nacionales encargadas de las emergencias e instituciones regionales como CEPREDENAC, con el fin de que las personas que habitan las zonas, sectores, municipios o comunidades mayormente expuestos sean sociedades resilientes ante las amenazas hidrometeorológicas (Pérez et al. 2016).

En la actualidad se conoce que ante los fenómenos hidrometeorológicos dependiendo de su magnitud y la vulnerabilidad de los sectores o poblados afectados, las personas continúan perdiendo la vida, y los costos socioeconómicos vinculados con éstos son altos y se siguen incrementando (OMM 2015).

Hoy día, las instituciones encargadas de las emergencias, los sectores económicos y sociales, así como la población en general, requieren de predicción donde se les diga los potenciales impactos que se pueden generar ante la ocurrencia de fenómenos meteorológicos e hidrológicos. Esto con el fin de tomar las medidas preventivas ante la posible ocurrencia y reducir las pérdidas de vidas humanas y pérdidas económicas.

Detalles sobre los conceptos de peligro, exposición, vulnerabilidad y riesgo, pueden ser consultados en OMM (2015).

Capítulo 2

6. Metodología

Para realizar este trabajo se consultó una serie de información, entre esta las estadísticas o cuadros de afectaciones de Protección Civil, noticias de periódicos digitales, información de reanálisis, imágenes de radar e imágenes satelitales, así como también los reportes METAR, todo con el fin de caracterizar los eventos meteorológicos de tipo tormentas intensas, que produjeron impactos durante los años 2015, 2016 y 2017, específicamente en el Área Metropolitana de San Salvador (AMSS). Así, también, generar una base de datos de los eventos que produjeron impactos en los años mencionados.

6.1 Identificación de eventos de lluvia fuerte y sus impactos

Inicialmente, se identificaron las estaciones meteorológicas del SMN del Observatorio Ambiental/MARN, correspondientes al AMSS que habían registrado lluvias acumuladas de 50 milímetros o más en 24 horas. Con esta información, y con los cuadros de afectaciones proporcionados por Protección Civil, PC, se revisaron y evaluaron si las fechas de las lluvias iguales o mayores a 50 milímetros de precipitación habían generado impactos en los años indicados, tomando en cuenta las afectaciones reportadas por PC. Además, que estas afectaciones estuvieran vinculadas con noticias disponibles en los medios de comunicación digitales y/o fuente de noticias que lleva la Unidad de Comunicaciones del Ministerio de Medio Ambiente.

Una vez verificadas todas las fechas que cumplían las condiciones antes mencionadas, se procedió a identificar y buscar las coordenadas en decimales de grado de los sitios donde se habían generado impactos de acuerdo a PC. Para georreferenciar estos sitios, se hizo uso de Google Maps y Google Earth.

Además, se realizó reanálisis de los eventos seleccionados haciendo uso del NCEP/FNL Operational Model Global Tropospheric Analyses, NCAR/UCAR, con resolución temporal de cada 6 horas y resolución espacial 1 ° x 1°. Este proceso se hizo para las fechas y horas cercanas en las cuales se presentaron las fuertes lluvias y se utilizó el formato grib2. Por lo que se hizo la conversión a archivos regulares de GRIB, haciendo uso del Wingridds, versión 3.2 con el propósito de desplegar los mapas de viento de 850 y 200 hPa, presión atmosférica, diagrama de Skew para revisar los índices de estabilidad, entre estos el CAPE, Lifted, Total

de Totales, el K Index y el GDI, con el fin de caracterizar los eventos asociados a los diferentes sistemas atmosféricos que influencian al territorio salvadoreño y a la región durante la estación lluviosa de los años en estudio. Índices que fueron seleccionados para analizar su comportamiento en las fechas que se produjeron los impactos. A la vez se hizo uso de información de reanálsis del Earth System Search Laboratory con información cada 6 horas del NCEP/NCAR, Reanalysis Data Composites, con el fin de obtener los mapas promedios diarios de velocidad y dirección de viento en 200 y 850 hPa y los datos de presión atmosférica a nivel medio del mar, a la vez se obtuvo la anomalía para cada campo para el área de Centroamérica y el Caribe. Con el propósito de identificar si las condiciones atmosféricas que se presentaron estuvieron en el orden del promedio diario o fuera de este. Tal como se muestra en las Figuras de la 9 a la 23.

6.2 Área de estudio y análisis

Para fines locales se utilizó el departamento de San Salvador y sus respectivos municipios, el cual tiene una densidad poblacional de 1,773,557 (DYGESTIC 2016), con 2,903 habitantes por km^2, y extensión de 888,15 km^2, con el fin de realizar el análisis de los municipios mayormente afectados por las intensas lluvias en el período de análisis.

Regionalmente, el área que se consideró para obtener los mapas de las variables meteorológicas mediante el Wingridds y data composite fue de 70° a 105° O y de 5° a 30° N, con una rejilla centrada en la latitud 13° 89’ 22’’, la cual comprende Centroamérica, el Caribe y el Pacífico. Con el propósito de tomar en cuenta los sistemas atmosféricos de la climatología sinóptica que inciden en El Salvador (MARN 2005), en combinación con la mesoescala y locales que intervienen en el tiempo atmosférico.

Para obtener los índices de inestabilidad, se utilizó aproximadamente, de 10° a 15° N y 88° a 90° O, con rejilla centrada en la latitud 13° 89’ 04’’. Área que aborda el territorio salvadoreño y porciones de los países fronterizos entre ellos Nicaragua, Honduras y Guatemala así como el Pacífico adyacente. Este tipo de mapas fue elaborado para todas las fechas de cada caso de los años en estudio, los cuales fueron utilizados solo para fines de análisis. Se hizo uso del diagrama de Skew para San Salvador (Anexo 2), específicamente para Ilopango con código aeronáutico MSSS. Para hacer el análisis del comportamiento de las variables meteorológicas, se elaboraron mapas y cuadros, para evaluar con mayor

facilidad el comportamiento del viento en 200 y 850 hPa y la presión atmosférica a nivel medio del mar para cada evento y año en relación al sistema vinculado o asociado, y los índices de inestabilidad atmosférica asociados a los sistemas que dominaron la atmósfera salvadoreña en el período de estudio. Simultáneamente, con la información georreferenciada de los puntos de impacto, se generó para cada año, cuadros en Excel con fecha, municipio, lugar de afectación, sistema atmosférico, imagen de radar, coordenadas en decimales de grado y enlaces de noticias.

Esta información fue llevada a ArGIS, 10.4, con licencia de estudiante, para trabajar los mapas de impactos. El Observatorio Ambiental/MARN, proporcionó, los archivos de datos vectoriales conocidos como shapefiles de departamentos, municipios, escuelas, hospitales, vías, mapa de elevación de 10 m, entre otra información. Para desarrollar este trabajo fue necesario transformar la capa de puntos o impactos a Lambert, NAD27, debido a que cada una de estas capas estaba en esta proyección, que es una de las proyecciones oficiales del Centro Nacional de Registros, CNR de El Salvador.

Para fines de análisis de la información de impactos o puntos georreferenciados de los daños generados por las tormentas intensas del 2015-2017, se hizo un mapa por año para el departamento de San Salvador, donde se refleja mediante colores el número de impactos asociados a los eventos. El verde de 0 a 5 es considerado como bajo, el amarillo de 5 a 10 impactos, considerado como moderado y el rojo de 10 a 16 puntos o impactos, considerado como alto, con el fin de encontrar cuáles son los municipios con mayor recurrencia a impactos por tormentas intensas.

Además, se hizo un cruce de información de estos impactos con los hospitales, escuelas y vías, con el propósito de evaluar, en un radio de 500 m, los potencialmente expuestos por lluvias intensas y que se presentaron en esos puntos o que se pueden dar en la cercanía para eventos futuros. Para este análisis se elaboró un buffer de 500 m de radio, debido a que los impactos generados en los años estudiados se pueden considerar de pequeña extensión en algunos casos hasta con 29 casas anegadas por las fuertes lluvias. Para el análisis se hizo un mapa por cada sector expuesto y uno en conjunto por año. Con la información de puntos o impactos en formato dbf y/o Excel, se trabajó una serie de cuadros y gráficos haciendo uso de filtros, cuadros y gráficos dinámicos, para evaluar los municipios con mayor número de

impactos, con número de escuelas, hospitales y vías expuestas durante el período estudiado. Así como también el tipo de escuelas, hospitales y vías expuestas.

Capítulo 3

7. Análisis, procedimientos y resultados

El análisis que se realizó para obtener los resultados finales se plantea a continuación, y está basado en el análisis de la georreferenciación de los impactos así como también el reanálisis de las fechas en que se produjeron las afectaciones o impactos, tal como se detalla a continuación (ver también Anexos 1 y 2).

7.1 Análisis de la caracterización de las tormentas, casos de estudio

A continuación se muestran los mapas de las variables meteorológicas, específicamente para el viento en el nivel de 200 y 850 hPa en las horas cercanas en las que ocurrieron las tormentas y la presión atmosférica a nivel medio del mar, así como también el campo medio del día de las mismas variables y su respectiva anomalías, Figs. de la 9 a la 23 .

Caso 31 de agosto de 2015, hora 6 pm. Vaguada y baja presión: en su orden de arriba hacia abajo se muestran las condiciones atmosféricas resultado del reanálisis en las horas cercana a las tormentas, campo medio diario y las anomalías de estas variables.

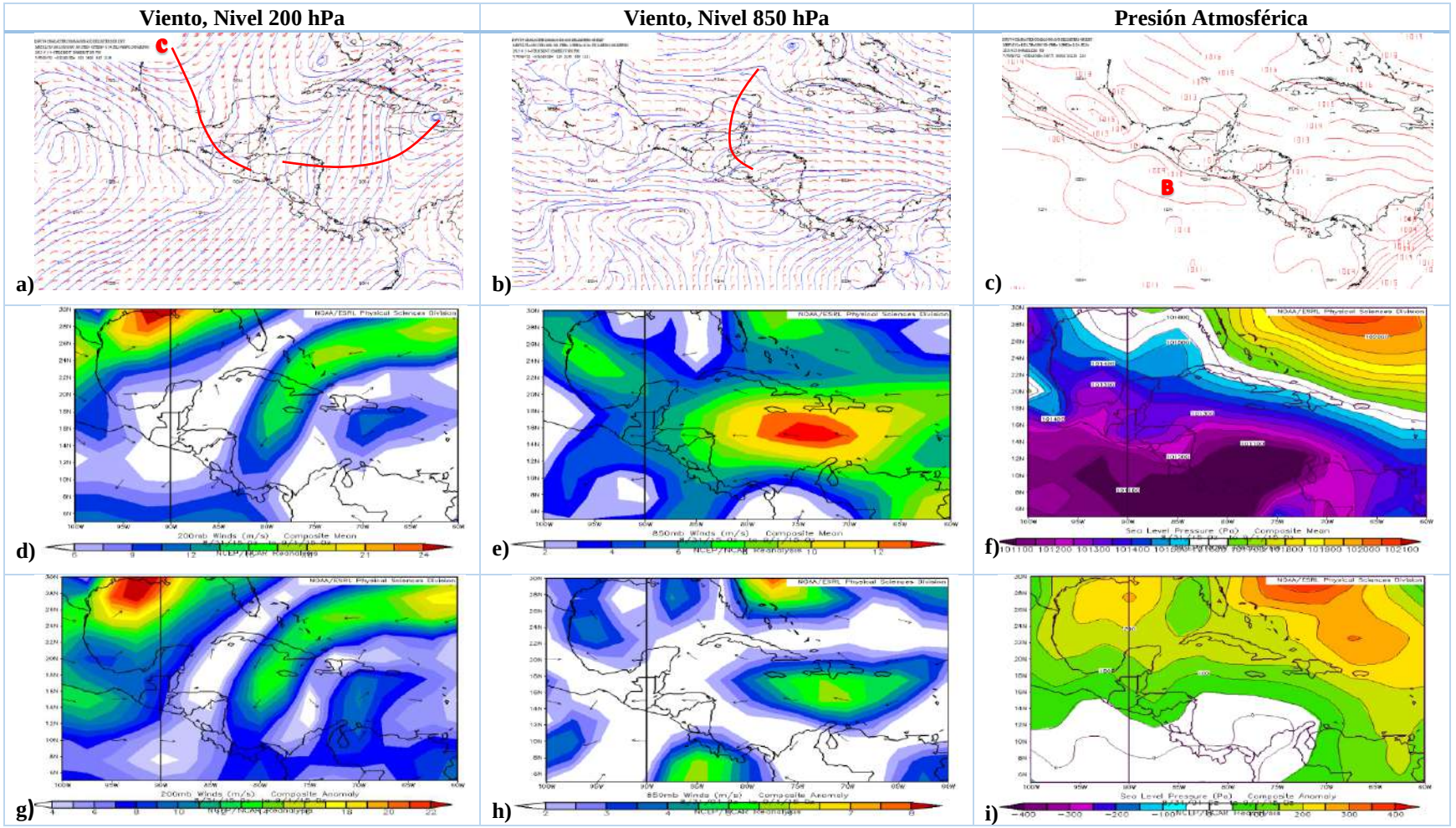


Figura 9. Muestra el viento en 200 y 850 hPa y presión atmosférica en las horas cercanas a las tormentas, viento en 200 y 850 hPa y presión atmosférica media y anomalías. a) Eje de vaguada desde el golfo de México hasta el noroccidente de El Salvador. b) Vaguada desde el centro de Honduras hasta Yucatán. c) Baja presión de 1009 hPa, ubicada al suroeste de Guatemala y 1012 en El Salvador. d) Eje de vaguada desde el noroccidente de El Salvador hasta el norte del Golfo de México, e) Vaguada que se extiende desde Honduras hasta Yucatán. f) Presiones1011 y 1012 hPa en el Océano Pacífico. g) Anomalías positivas de 6 m/s, h) Anomalías positivas con 2 m/s en El Salvador y el Pacífico i) Anomalías positivas de presión de 1 hPa en El Salvador y en el Pacífico neutras.

Caso 24 de septiembre de 2015, hora 6 pm. Baja presión distante al sur de Guatemala: en su orden de arriba hacia abajo se muestran las condiciones atmosféricas resultado del reanálisis en las horas cercana a las tormentas, campo medio diario y las anomalías de estas variables.

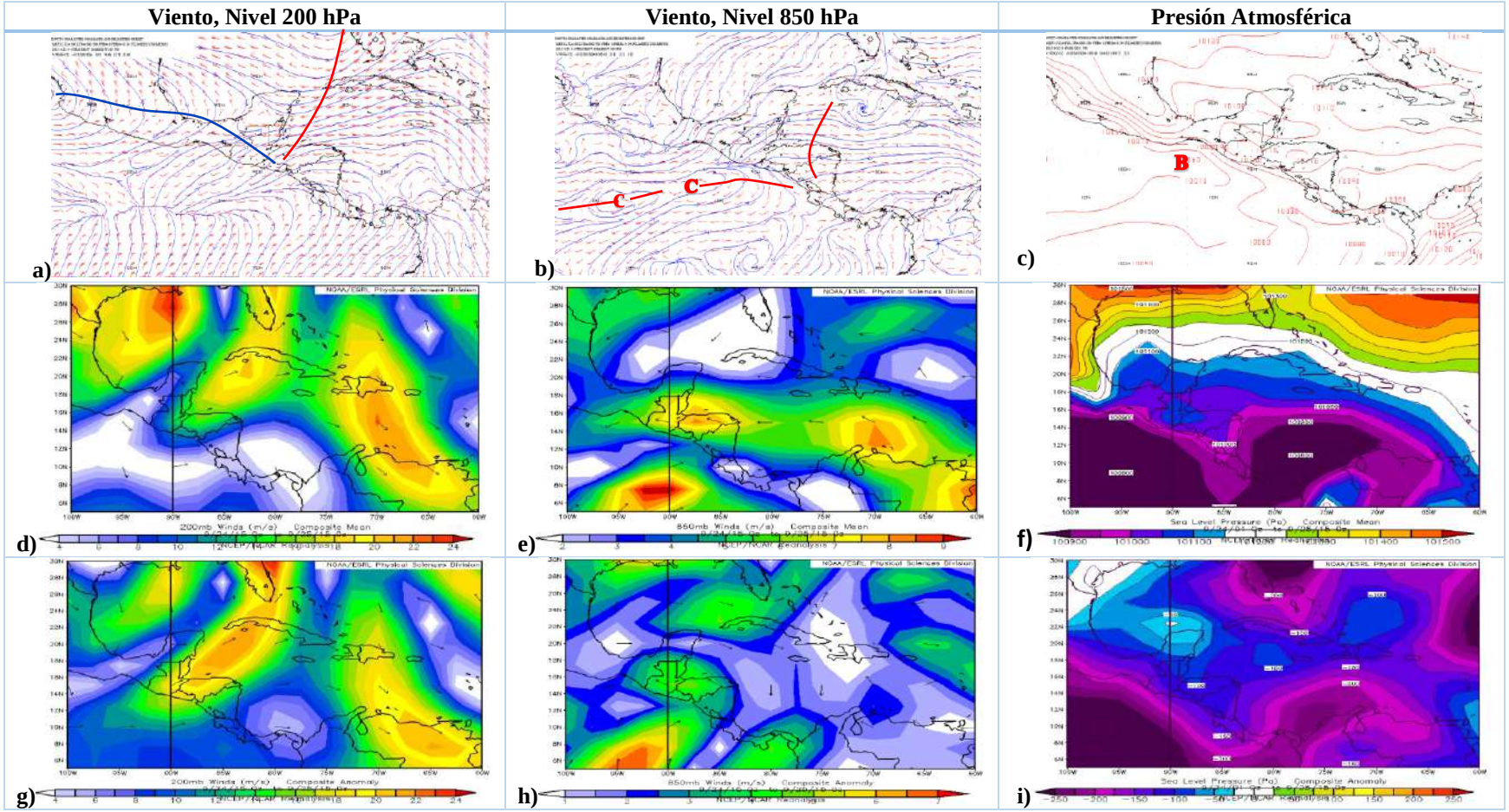


Figura 10. Muestra el viento en 200 y 850 hPa y presión atmosférica en las horas cercanas a las tormentas, viento en 200 y 850 hPa y presión atmosférica media y anomalías. a) Circulación anticiclónica sobre El Salvador y eje de vaguada al noroeste de El Salvador, b) Circulación ciclónica al suroeste de Guatemala y vaguada en Honduras, c) Baja presión al suroeste de Guatemala, 1006 y 1011 hPa, d) Vaguada desde El Salvador hasta el este de Estados Unidos. e) Circulación ciclónica al sureste de El Salvador, f) Baja presión de 1009 y 1011 hPa al suroeste de El Salvador, g) Anomalías positivas con 18 m/s, h) Anomalías positivas con 2 y 5 m/s en el Pacífico y El Salvador, i) Anomalías negativas de la presión hasta con -2 hPa en El Salvador y el Pacífico.

Caso 10 de octubre de 2015, hora 6 pm. Onda tropical moderadamente activa: en su orden de arriba hacia abajo se muestran las condiciones atmosféricas resultado del reanálisis en las horas cercana a las tormentas, campo medio diario y las anomalías de estas variables.

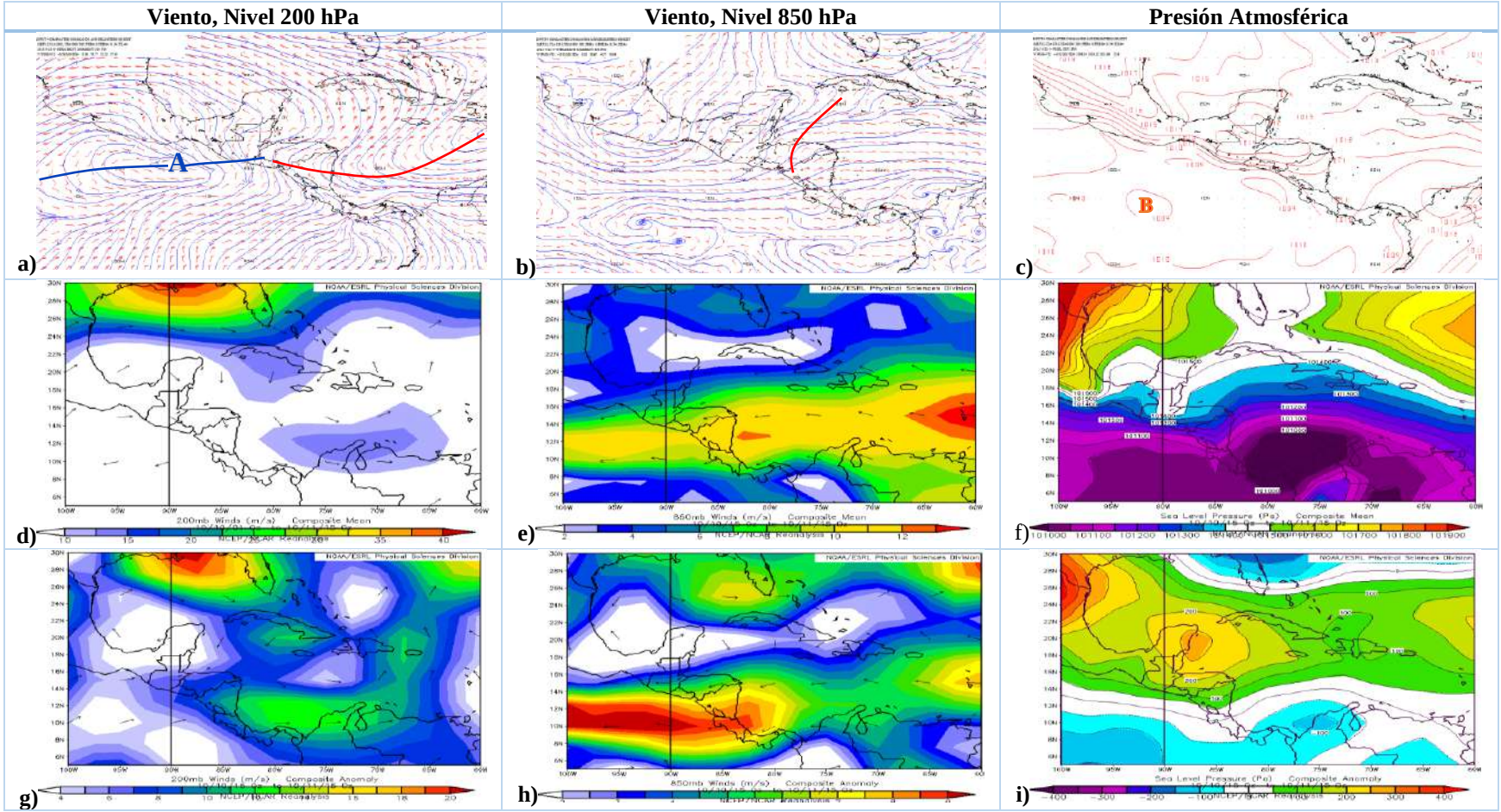


Figura 11. Muestra el viento en 200 y 850 hPa y presión atmosférica en las horas cercanas a las tormentas, viento en 200 y 850 hPa y presión atmosférica media y anomalías. a) Eje de dorsal del occidente de El Salvador hasta el sur de Tehuantepec, b) Acercamiento de Onda Tropical, c) Bajas presiones relativas distantes 1009 y 1012 d) Circulación anticiclónica al suroeste de Guatemala y vaguada de norte del golfo de México hasta Yucatán, e) Vaguada al este de Nicaragua, f) Presiones de 1011 y 1012 hPa en El Salvador y Pacífico, g) Anomalías positivas de 8 m/s, h) Anomalías positivas del viento con 8 m/s, i) Anomalías positivas hasta de 1 hPa y neutras en el Pacífico.

Caso 15 de octubre de 2015, hora 6 pm. Vaguada y ZCIT: en su orden de arriba hacia abajo se muestran las condiciones atmosféricas resultado del reanálisis en las horas cercana a las tormentas, campo medio diario y las anomalías de estas variables.

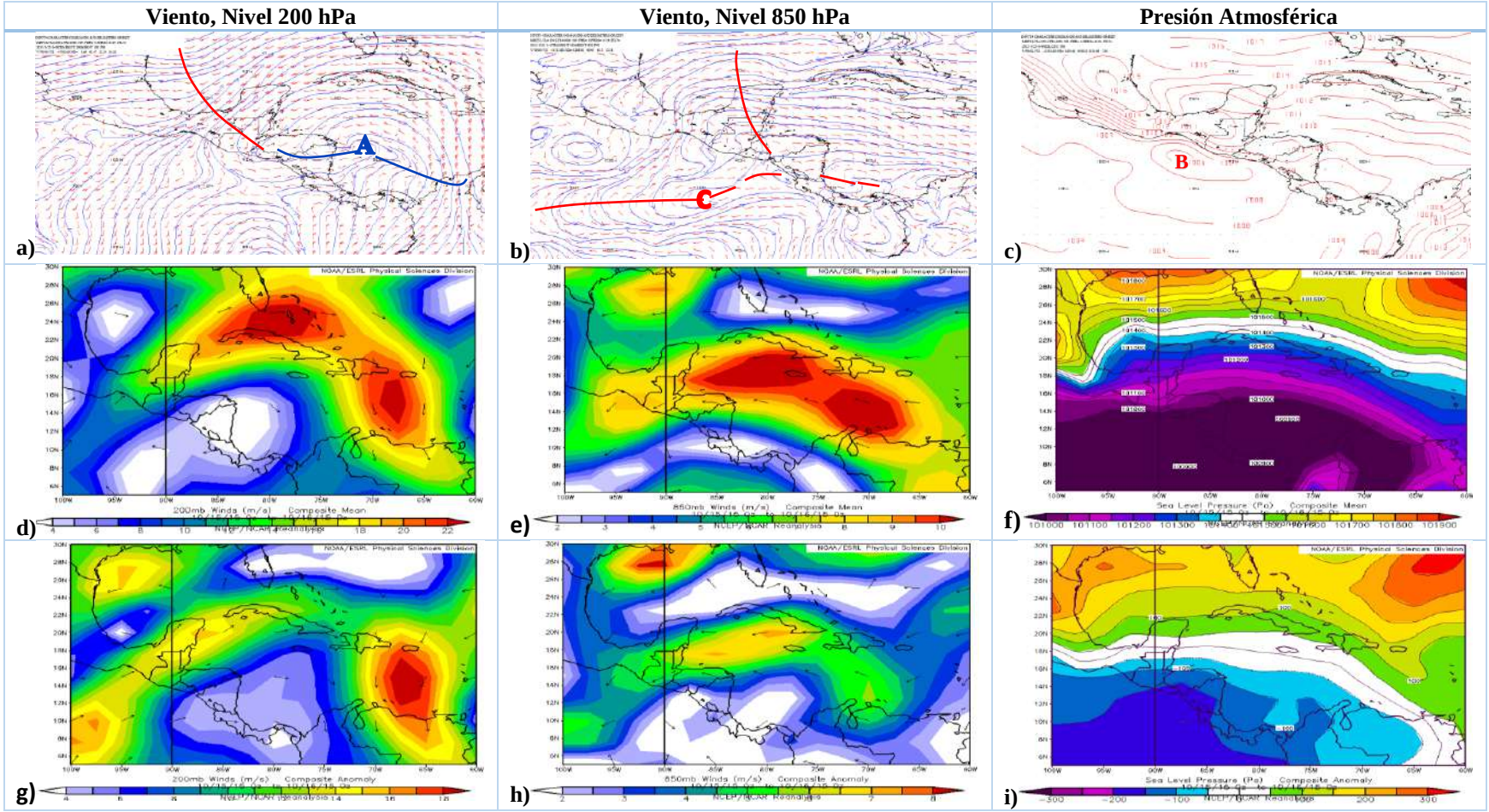


Figura 12. Muestra el viento en 200 y 850 hPa y presión atmosférica en las horas cercanas a las tormentas, viento en 200 y 850 hPa y presión atmosférica media y anomalías. a) Eje de vaguada del golfo de México hasta el noroccidente de El Salvador y anticiclón, b) Amplia circulación ciclónica, c) Bajas presiones de 1006 y 1010 en las costas de El Salvador y sobre continente, d) Vaguada en el occidente y anticiclón en el oriente de El Salvador, e) Vaguada sobre El Salvador y el norte de Honduras, f) Presión de 1010 y 1011 hPa. g) Anomalías positivas de 10 m/s, h) Anomalías positivas con 5 m/s, i) Anomalías negativas hasta de 1 hPa.

Caso 18 de octubre de 2015, hora 6 pm. Baja presión al Suroeste de Guatemala: en su orden de arriba hacia abajo se muestran las condiciones atmosféricas resultado del reanálisis en las horas cercana a las tormentas, campo medio diario y las anomalías de estas variables.

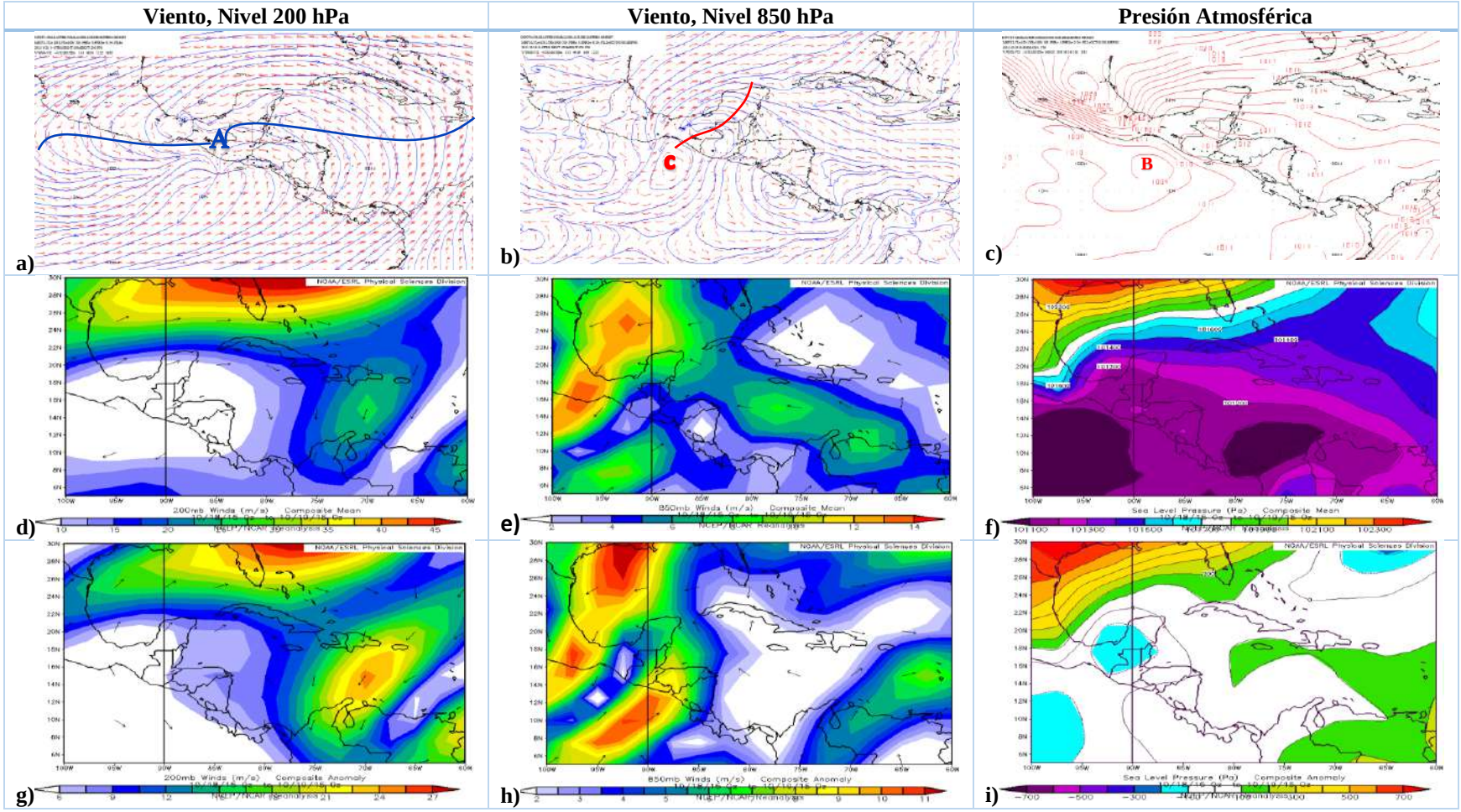


Figura 13. Muestra el viento en 200 y 850 hPa y presión atmosférica en las horas cercanas a las tormentas, viento en 200 y 850 hPa y presión atmosférica media y anomalías. a) Circulación anticiclónica en El Salvador, b) Vaguada y circulación ciclónica al suroeste de Guatemala, c) Baja presión al suroeste de Guatemala 1009 y 1012, d) Circulación anticiclónica en Centroamérica, e) Vaguada Sobre El Salvador y Yucatán, f) Presión de 1010 y 1012 hPa, g) Anomalía positiva con 9 m/s, h) Anomalía positivas con 9 m/s, i) Presiones neutras.

Caso 3 de junio de 2016, hora 6 pm. Baja presión y ZCIT: en su orden de arriba hacia abajo se muestran las condiciones atmosféricas resultado del reanálisis en las horas cercana a las tormentas, campo medio diario y las anomalías de estas variables.

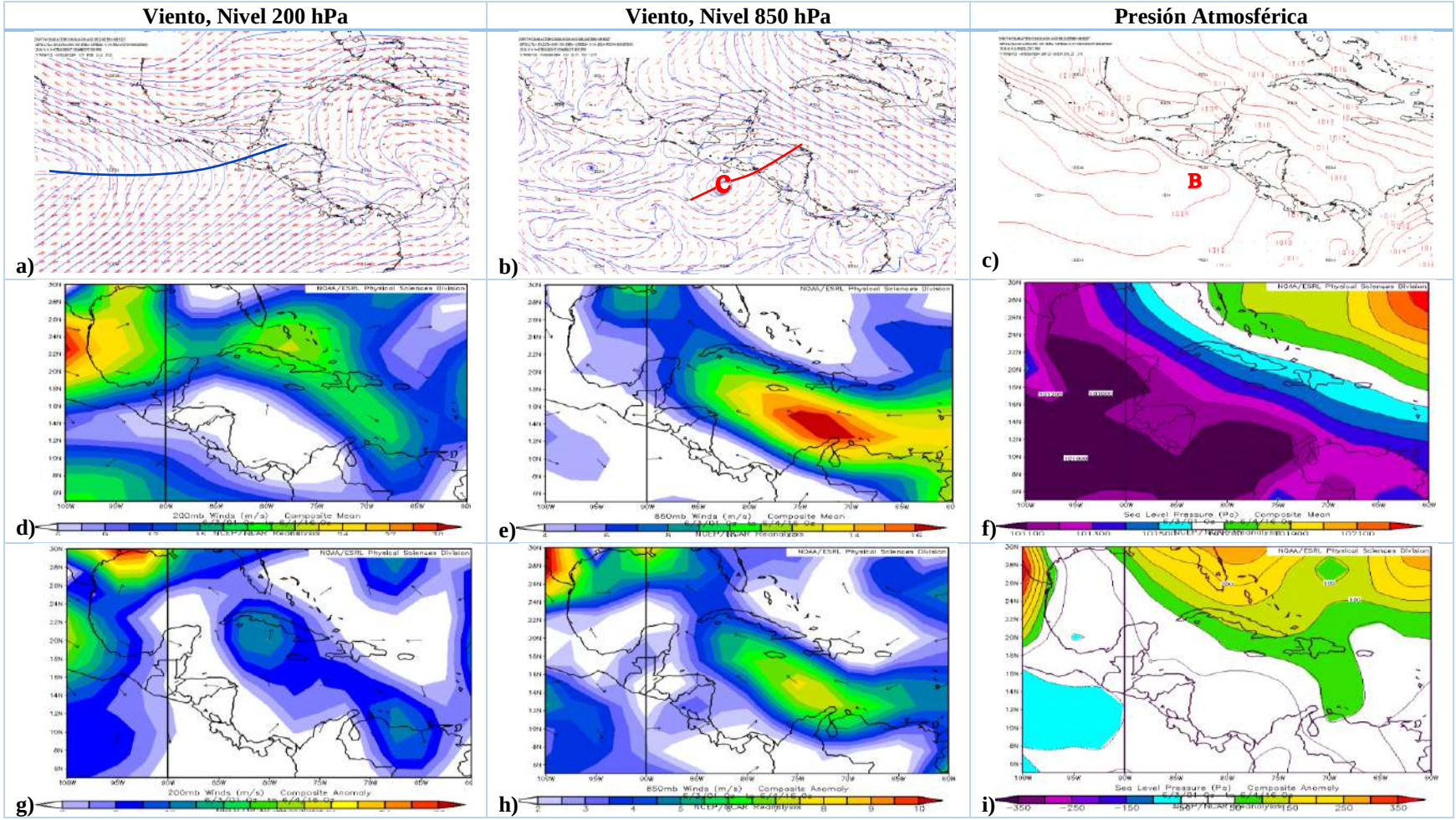


Figura 14. Muestra el viento en 200 y 850 hPa y presión atmosférica en las horas cercanas a las tormentas, viento en 200 y 850 hPa y presión atmosférica media del día y anomalías. a) Eje de dorsal desde la costa Este del golfo de México hasta El Salvador, b) Circulación ciclónica al suroeste de El Salvador, c) Baja presión de 1009 hPa, al suroeste de El Salvador y 1010 sobre El Salvador, d) Circulación anticiclónica en el Pacífico al de México, e) Circulación ciclónica en el Pacífico y vaguada sobre Honduras y El Salvador, f) Presión 1010 y 1012 sobre el Pacífico, g) Anomalías positivas con 2 m/s, h) Anomalías positivas sobre El Salvador con 2 m/s y positivas con 4 m/s en el Pacífico, i) Presiones neutras y en el Pacífico al suroccidente negativa de -1 hPa.

Caso del 24 de junio de 2016, hora 6pm. Onda del este activa: en su orden de arriba hacia abajo se muestran las condiciones atmosféricas resultado del reanálisis en las horas cercana a las tormentas, campo medio diario y las anomalías de estas variables.

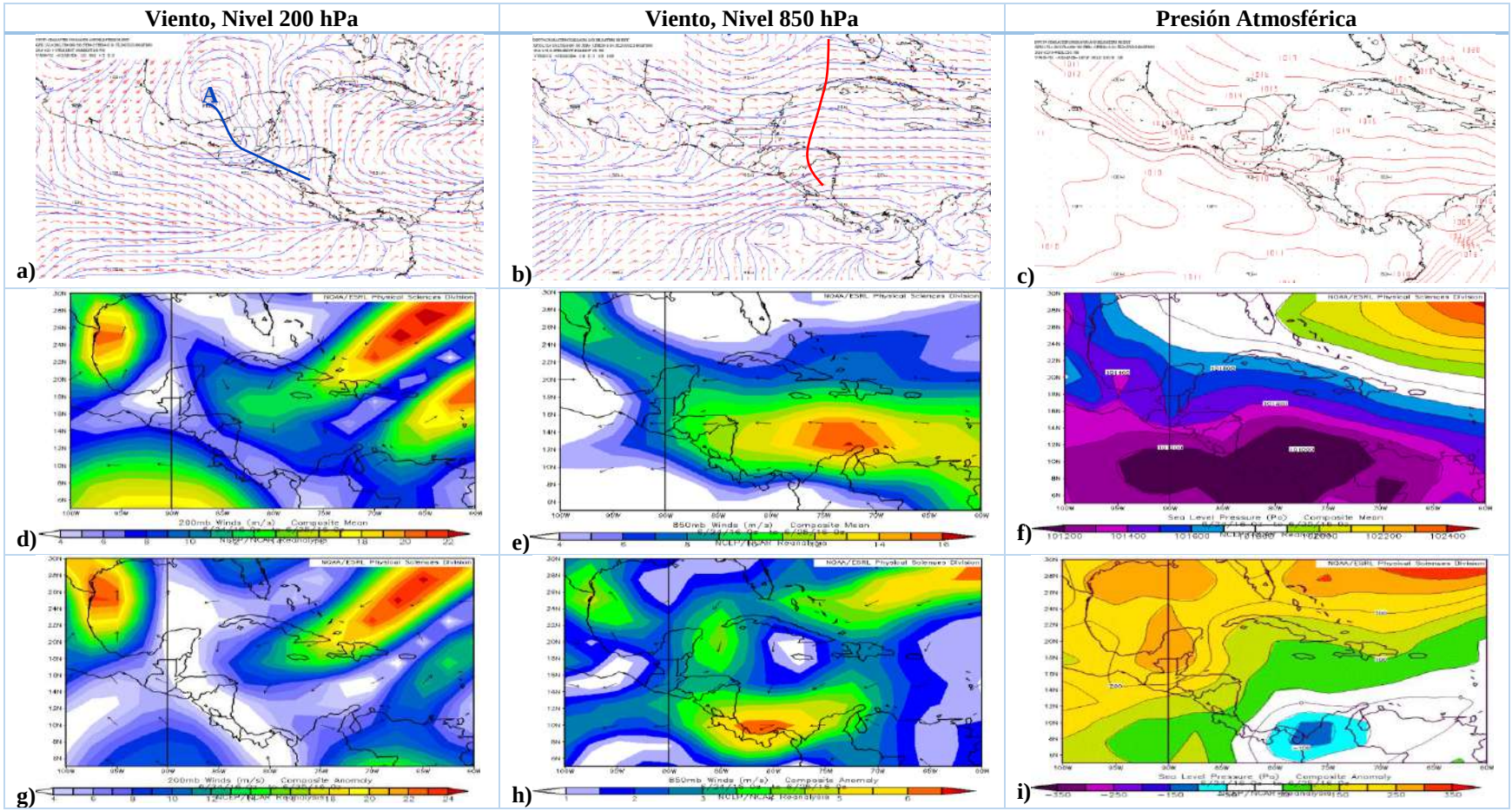


Figura 15. Muestra el viento en 200 y 850 hPa y presión atmosférica en las horas cercanas las tormentas, viento en 200 y 850 hPa y presión atmosférica media del día y anomalías. a) Eje de dorsal desde el Golfo de México hasta el este de El Salvador, b) Onda del Este desde Honduras hasta noreste de Yucatán, c) Presiones de 1010 sobre la costa Pacífica y 1012 sobre El Salvador y, d) Circulación anticiclónica desde México hasta El Salvador, e) Vaguada asociada a Onda del Este desde Honduras hasta el este de Yucatán, f) Presión 1013 hPa en El Salvador y 1010 en el Pacífico de El Salvador, g) Anomalías positivas hasta con 4 m/s, h)Anomalías positivas hasta con 3 m/s, i) Anomalías positivas con 1 y 2 hPa.

Caso 28 de julio de 2016, hora 6 pm. Vaguada: en su orden de arriba hacia abajo se muestran las condiciones atmosféricas resultado del reanálisis en las horas cercana a las tormentas, campo medio diario y las anomalías de estas variables.

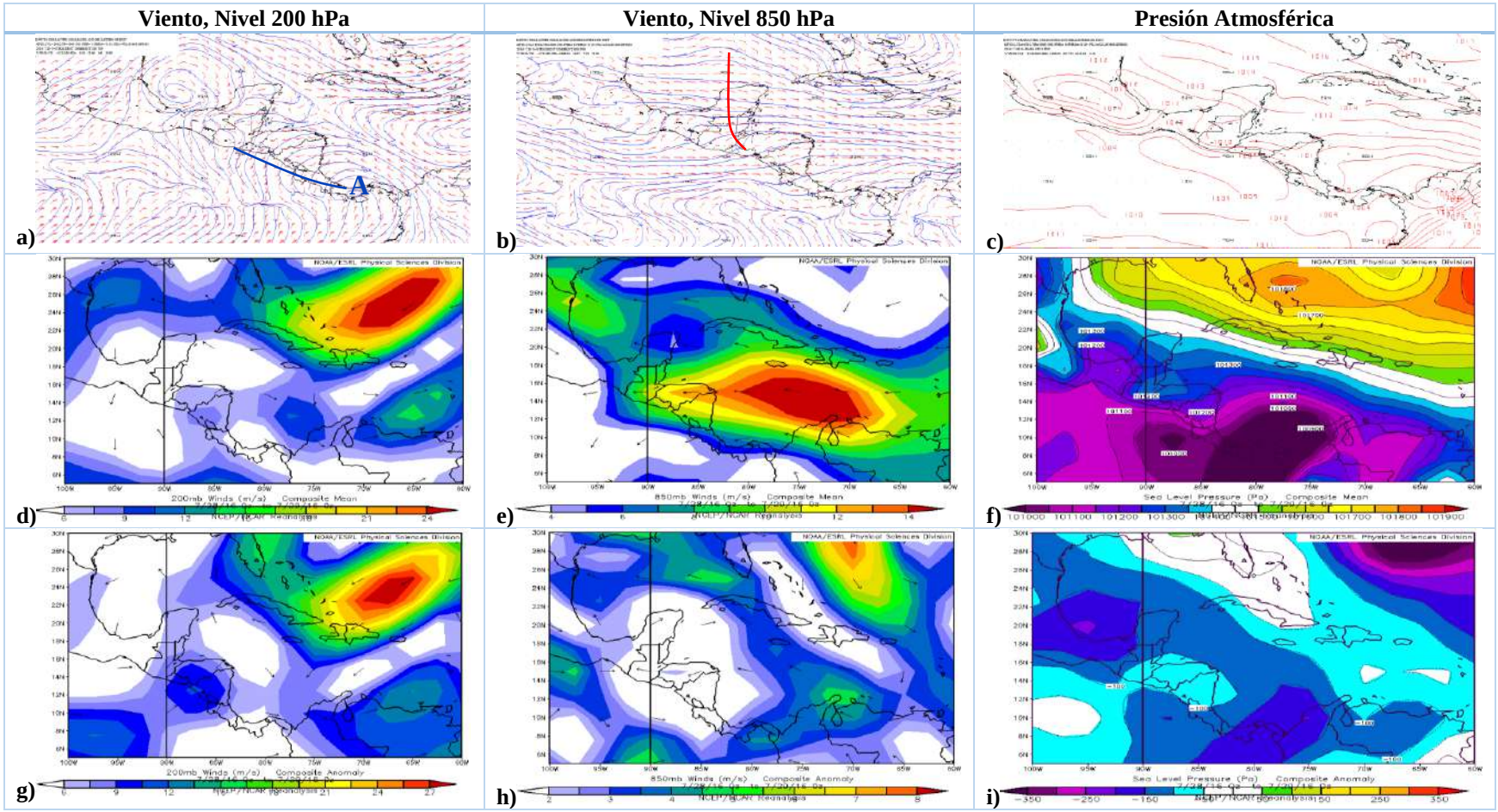


Figura 16. Muestra el viento en 200 y 850 hPa y presión atmosférica en las horas cercana a las tormentas, viento en 200 y850 hPa y presión atmosférica del día y anomalías. a) Viento del sur, eje de dorsal desde Panamá hasta El Salvador, b) Eje de vaguada desde el norte de El Salvador hasta el norte de Yucatán, c) Presión 1009 sobre el Pacífico y de 1011 sobre El Salvador, d) Anticiclón sobre Panamá hasta El Salvador, e) Vaguada desde El Salvador hasta el este de Yucatán, f) Presión de 1010 en el Pacífico y 1013 sobre El Salvador, g) Anomalías positivas hasta con 12 m/s, h) Anomalías positivas con 2 m/s, i) Anomalías negativas de presión de 1 hPa.

Caso 12 de septiembre de 2016, hora 6 pm. Onda tropical Activa y Circulación Ciclónica: en su orden de arriba hacia abajo se muestran las condiciones atmosféricas resultado del reanálisis en las horas cercana a las tormentas, campo medio diario y las anomalías de estas variables.

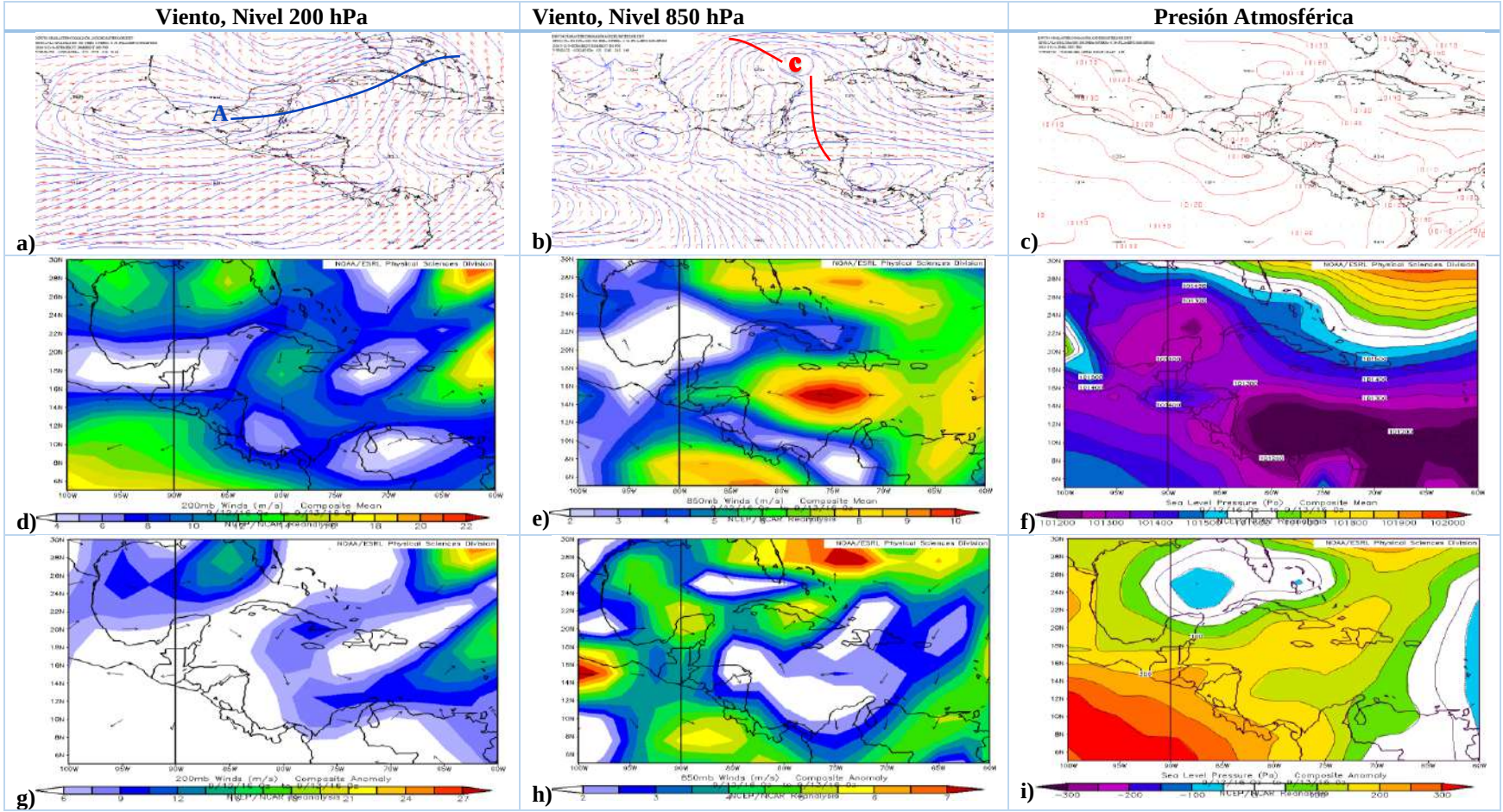


Figura 17. Muestra el viento en200 y 850 hPa y presión atmosférica en las horas cercanas a las tormentas, viento en 200 y 850 hPa y Presión atmosférica media del día y Anomalías. a) Circulación anticiclónica desde el sur de México hasta Nicaragua, b) Vaguada desde Honduras hasta el norte de Yucatán, c) Presiones de 1010 en el Pacífico y 1012 sobre El Salvador, d) Circulación anticiclónica desde México hasta Panamá, e) Vaguada desde Honduras hasta Yucatán, f) Presión de 1012 en el Pacífico y 1013 en El Salvador, g) Anomalías positivas con 6 m/s, h) Anomalías positivas de 4 m/s, i) Anomalías positivas de 2 hPa.

Caso 19 de octubre de 2016, hora 6 pm. Onda tropical moderadamente activa y Circulación Ciclónica: en su orden de arriba hacia abajo se muestran las condiciones atmosféricas resultado del reanálisis en las horas cercana a las tormentas, campo medio diario y las anomalías de estas variables.

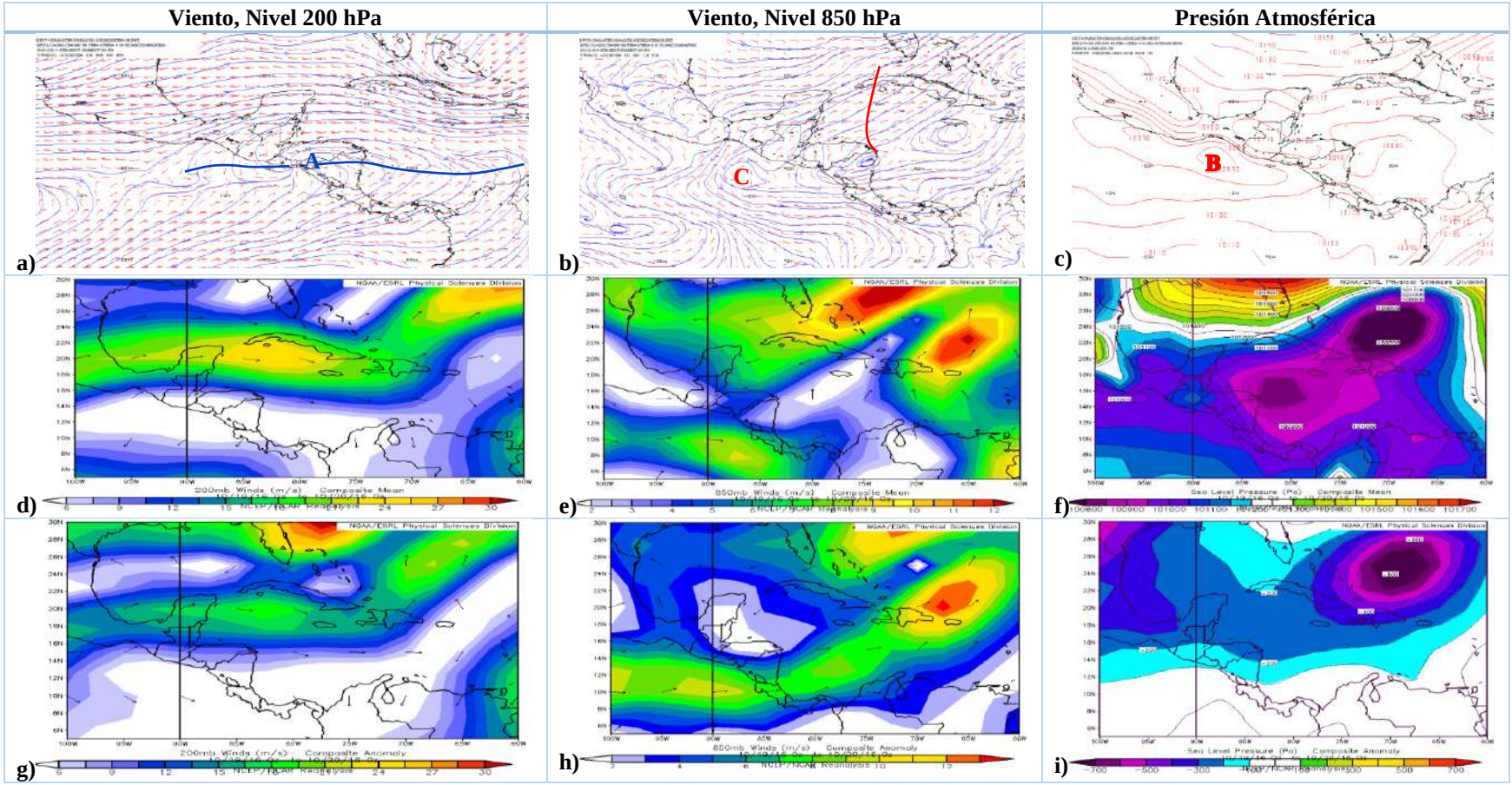


Figura 18. Muestra el viento en 200 y 850 hPa y la presión atmosférica en las horas cercanas a las tormentas, viento en 200 y 850 hPa y presión atmosférica media del día y anomalías. a) Circulación anticiclónica sobre Centroamérica, b) Circulación ciclónica al suroeste de El Salvador y CC sobre Nicaragua, c) Baja presión al suroeste de El Salvador de 1007 hPa y sobre continente 1011 hPa, d) Anticiclón sobre Centroamérica, e) Circulación ciclónica al suroeste de El Salvador, f) Bajas presión de 1010 en el Pacífico y 1011 sobre El Salvador, g) Anomalías positivas hasta con 5 m/s, h) Anomalías positivas hasta con 6 m/s, i) Anomalías de presión negativa de -1 hPa.

Caso 14 de junio de 2017, hora 6 pm. Onda tropical y ZCIT: en su orden de arriba hacia abajo se muestran las condiciones atmosféricas resultado del reanálisis en las horas cercana a las tormentas, campo medio diario y las anomalías de estas variables.

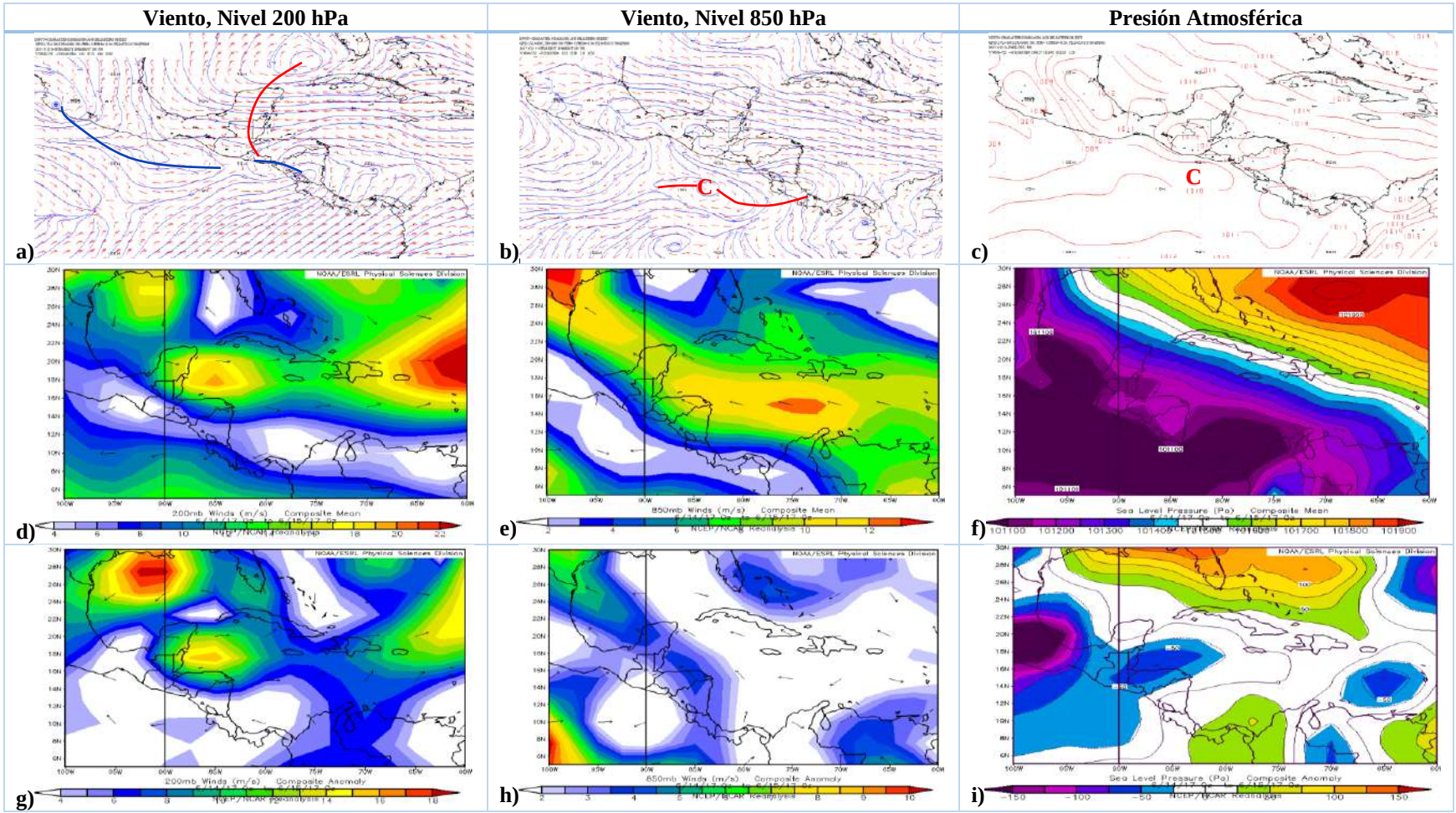


Figura 19. Muestra el viento en 200 y 850 hPa y presión atmosférica en las horas cercanas a las tormentas, viento en 200 y 850 hPa y presión atmosférica media del día y anomalía. a) Vaguada y circulación anticiclónica en el centro y oriente del país, b) Circulación ciclónica al suroccidente del país, c) Circulación ciclónica con 1010 hPa al suroccidente del país y 1013 sobre El Salvador, d) Circulación ciclónica golfo de México y Yucatán, Anticiclón en el Caribe, e) Circulación ciclónica en el Pacífico, f) Presión de 1012 y 1011 milibares en el océano y continente, g) Anomalía positiva de 4 m/s, h) Anomalías positivas con 2 m/s, i) Anomalías de - 1 hPa.

Caso 15 de junio de 2017, hora 6 pm. Circulación Ciclónica asociada a ZCIT: en su orden de arriba hacia abajo se muestran las condiciones atmosféricas resultado del reanálisis en las horas cercana a las tormentas, campo medio diario y las anomalías de estas variables.

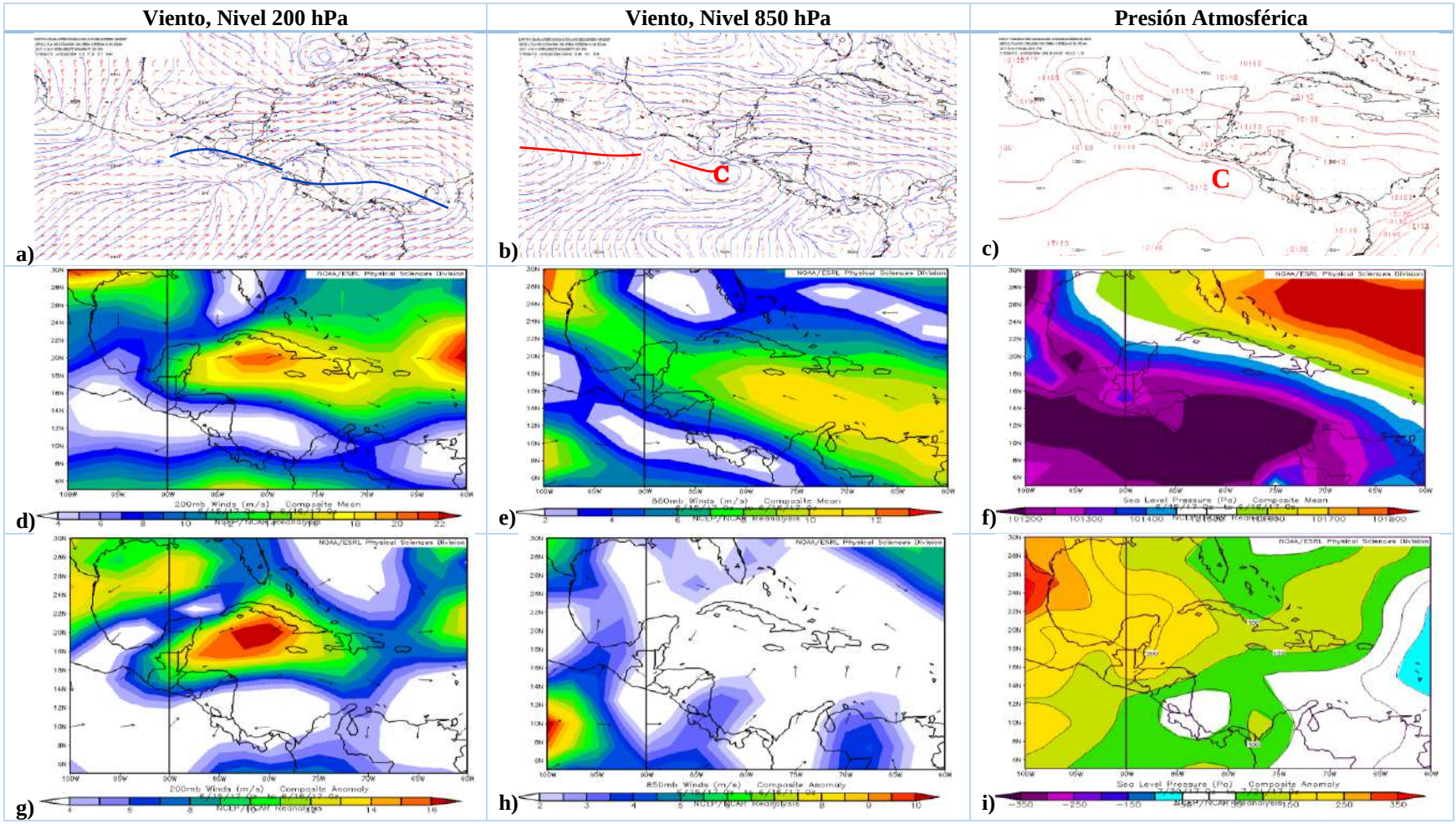


Figura 20. Muestra el viento en 200 y 850 hPa y presión atmosférica en las horas cercanas a las tormentas, viento en 200 y 850 hPa y Presión Atmosférica media del día y anomalías. a) Circulación anticiclónica sobre CA, b) Circulación ciclónica al sur de El Salvador, c) Presión de 1011 hPa en el Pacífico y 1013 sobre El Salvador. d) Circulación ciclónica sobre Centroamérica, e) Área de circulación ciclónica sobre el pacífico, f) Presiones de 1012 y 1013 hPa sobre el Pacífico y El Salvador, g) Anomalías positivas hasta con 6 m/s, h) Anomalías positivas con 2 m/s, i) Anomalías positivas de 0.5 hPa.

Caso 12 de julio de 2017, hora 6 pm. Onda del este y Circulación ciclónica: en su orden de arriba hacia abajo se muestran las condiciones atmosféricas resultado del reanálisis en las horas cercana a las tormentas, campo medio diario y las anomalías de estas variables.

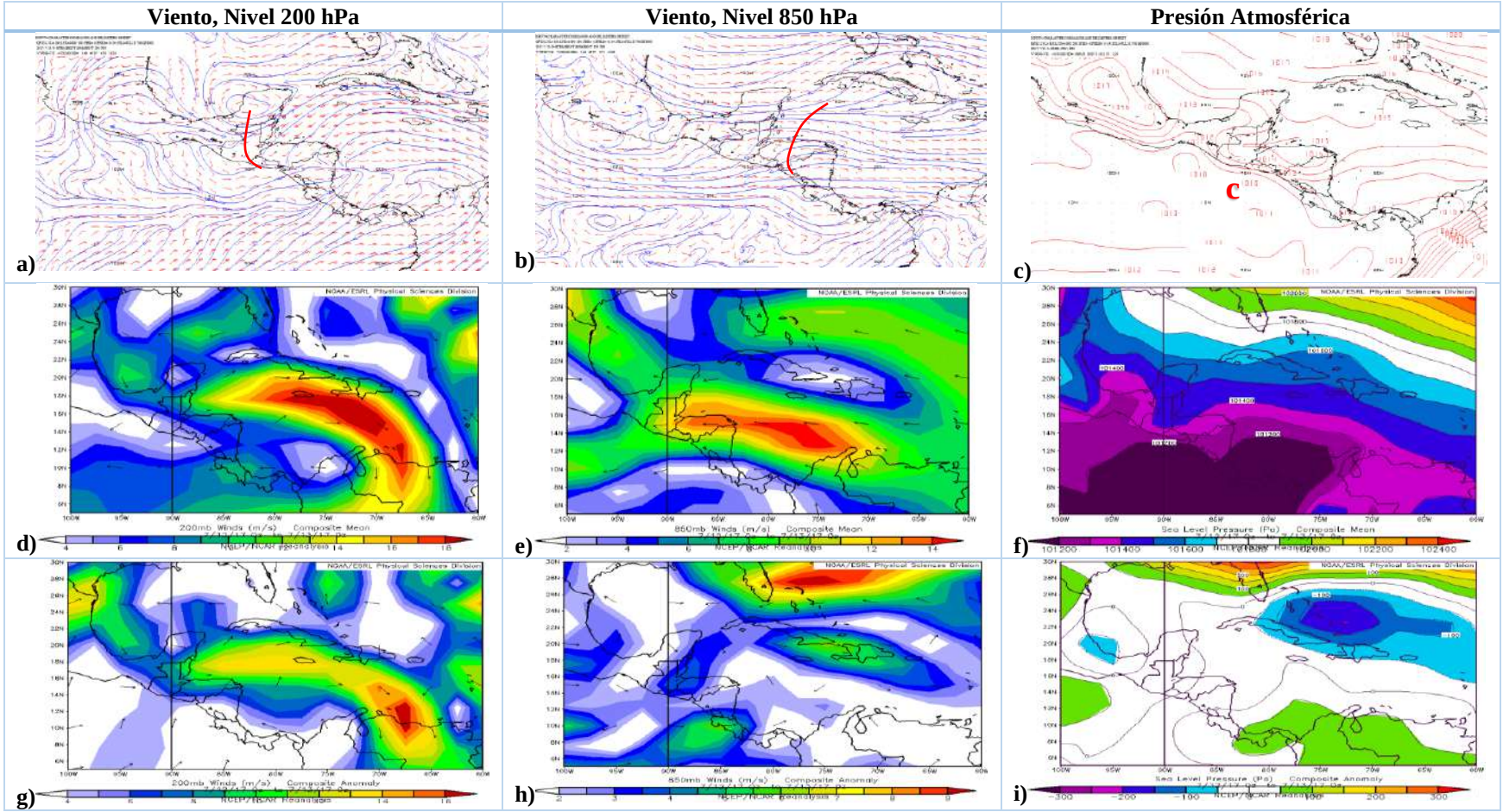


Figura 21.Muestra el viento en 200 y 850 hPa y la presión atmosférica en las horas cercanas a las tormentas, viento en 200 y 850 hPa y presión atmosférica media del día y anomalías. a) Vaguada desde El Salvador hasta Yucatán, b) Vaguada asociada a Onda del Este sobre El Salvador y Honduras, c) Presiones de 1010 y 1013, Pacífico y continente, d) Vaguada desde el golfo de México hasta el norte de Centroamérica, e) Vaguada sobre El Salvador y Honduras, f) Presión de 1012 hPa en el Pacífico y 1013 hPa sobre El Salvador, g) Anomalías positivas hasta con 6 m/s, h) Anomalías positivas hasta con 4 m/s, i) Anomalías neutras de presión.

Caso del 20 de julio de 2017, hora 6 pm. Vaguada en niveles medios y ZCIT: en su orden de arriba hacia abajo se muestran las condiciones atmosféricas resultado del reanálisis en las horas cercana a las tormentas, campo medio diario y las anomalías de estas variables.

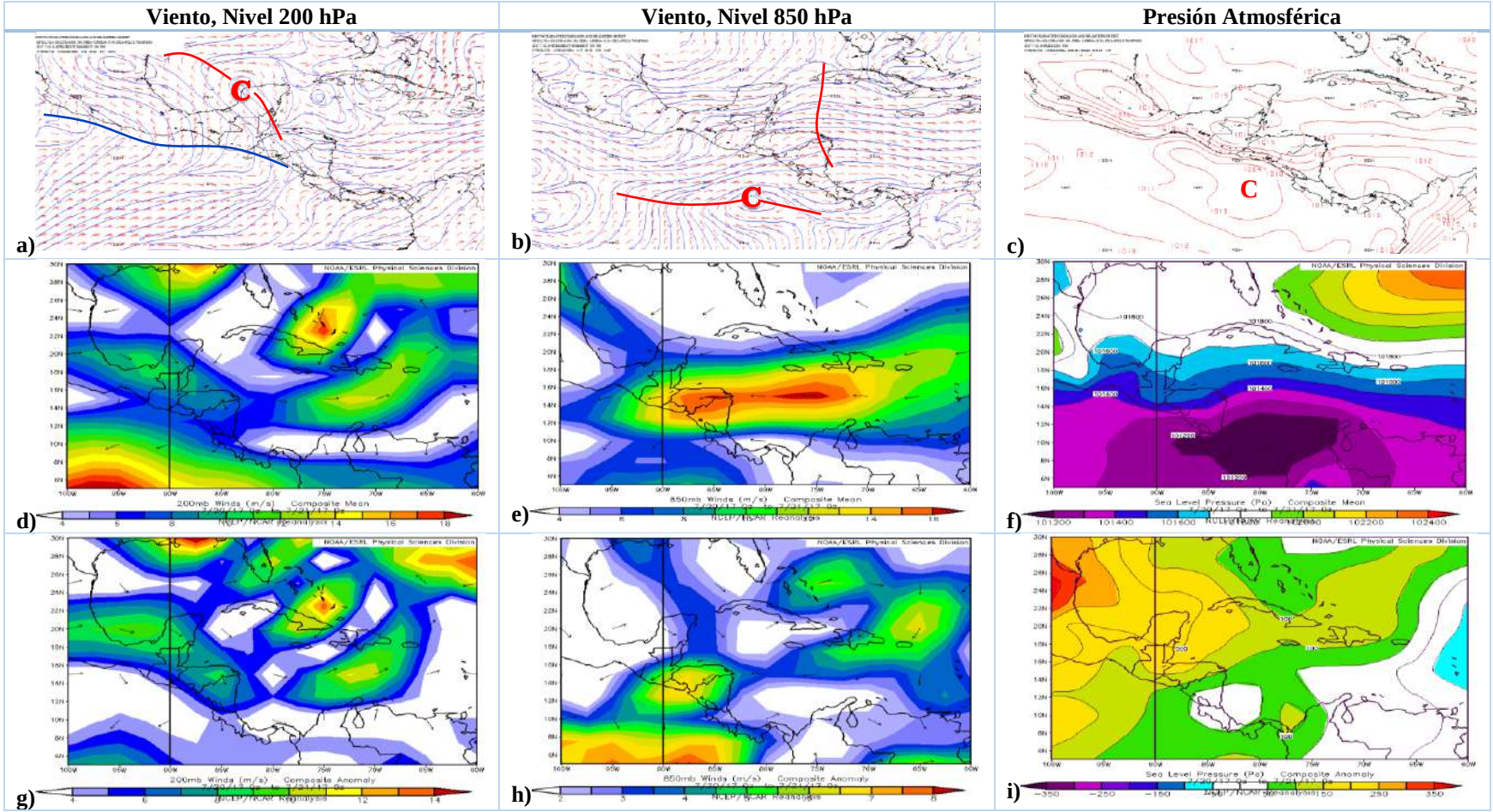


Figura 22. Muestra el viento en 200 y 850 hPa y la presión atmosférica en las horas cercanas a las tormentas, viento en 200 y 850 hPa y presión atmosférica media del día y anomalías. a) Circulación Anticiclónica desde la costa de México hasta El Salvador y vaguada sobre Yucatán, b) Circulación ciclónica en el Pacífico y vaguada desde Nicaragua hasta el norte de Honduras, c) Bajas presiones 1009 y 1012 hPa sobre el Pacífico y El Salvador, d) Anticiclón desde el golfo de México hasta El Salvador, e) Vaguada en Honduras y El Salvador y Circulación ciclónica en el Pacífico, f) Presiones de 1012 hPa en el Pacífico y 1014 sobre El Salvador, g) Anomalías positivas hasta con 6 m/s, h) Anomalías positivas con 7 m/s, i) Anomalías positivas hasta con 1 hPa.

Caso 22 de septiembre de 2017, hora 6 pm. Circulación ciclónica y vaguada en niveles medios: en su orden de arriba hacia abajo se muestran las condiciones atmosféricas resultado del reanálisis en las horas cercana a las tormentas, campo medio diario y las anomalías de estas variables.

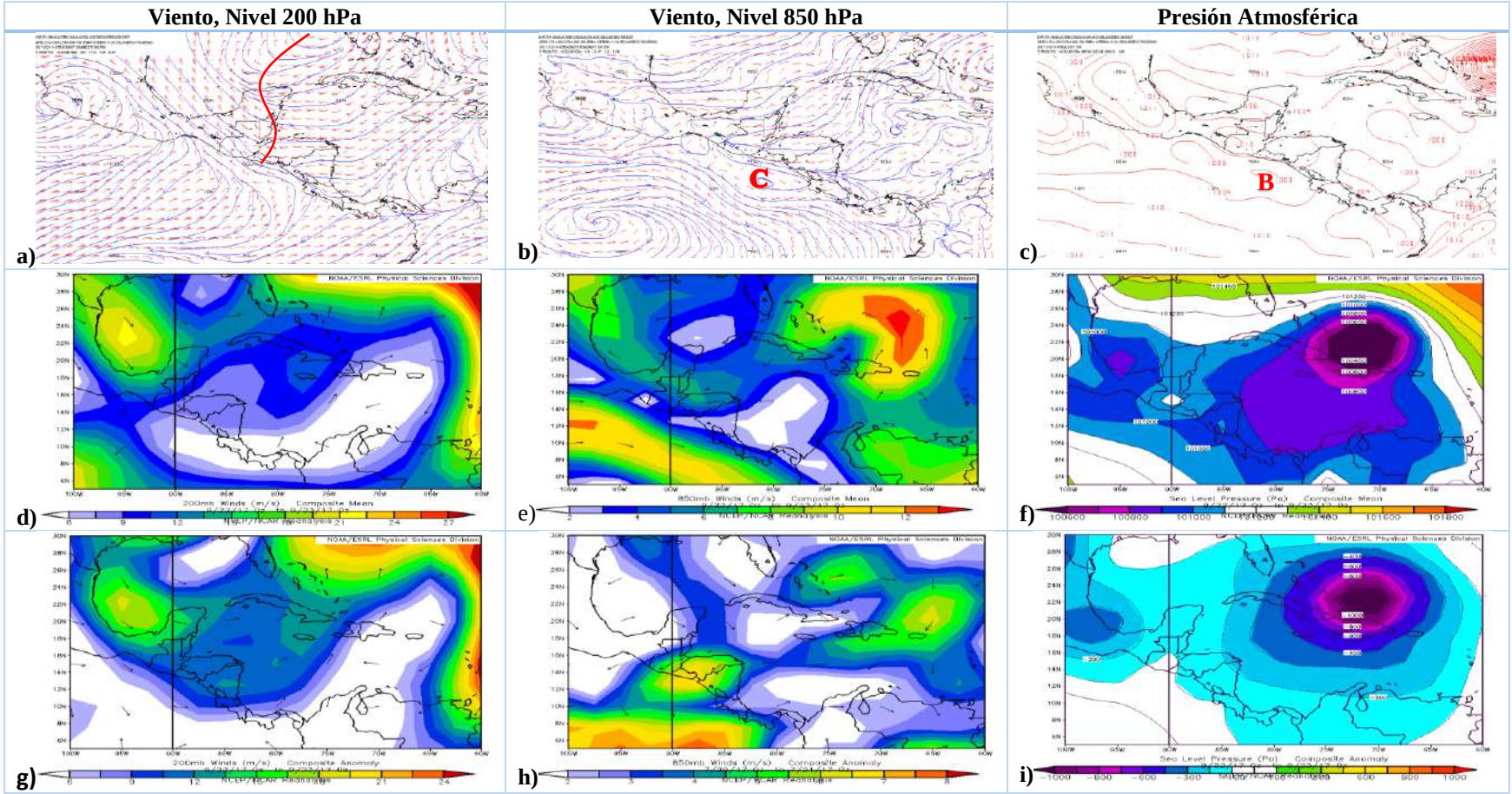


Figura 23. Muestra el viento en 200 y 850 hPa y la presión atmosférica en las horas cercanas a las tormentas, viento en 200 y 850 hPa y presión atmosférica media del día y anomalías. a) Vaguada desde El Salvador hasta el norte de Yucatán, b) Circulación ciclónica al sur de El Salvador, c) Baja presión al sur de El Salvador de 1008 hPa y 1010 sobre El Salvador, d) Vaguada desde el Golfo de México hasta el norte de El Salvador, e) Viento del noreste y débil circulación ciclónica en el Pacífico, f) Presión en la costa Pacífica 1009 hPa y de 1010 hPa sobre El Salvador, g) Anomalías positiva con 12 m/s, h) Anomalías positivas con 7 m/s, Anomalías negativas con -1 hPa.

Cuadro 6. Resumen de la caracterización de Eventos Atmosféricos durante los años 2015, 2016 y 2017 que influenciaron a El Salvador, específicamente al departamento de San Salvador.

Fecha de Evento y Sistema	Sistema atmosférico en 200 hPa	Sistema atmosférico en 850	Presión Atmosférica hPa Pacífico y El Salvador	Anomalía viento 200 m/s	Anomalía del viento 850 m/s	Anomalía Presión atmosférica hPa
31/08/2015, Vaguada y BP	Eje de vaguada	Vaguada	1009 y 1012	6	2 cercana a condiciones neutras	1
24/09/2015, Baja P. distante al sur Guatemala	Circulación anticiclónica sobre El Salvador y eje de vaguada solo al noreste del país.	Baja presión al suroeste de Guatemala y vaguada en Honduras.	1006 y 1011	18	2 a 5	-2
10/10/2015 Onda tropical. moderada mente activa	Eje de dorsal desde el occidente de El Salvador hasta sur de Tehuantepec. Y Vaguada Troposférica TUTT	Onda Tropical	1009 y 1012	8	8	1
15/10/2015 Vaguada y ZCIT	Eje de vaguada y anticiclón.	Amplia circulación ciclónica	1006 y 1010	10	5	1
18/10/2015 Baja Presión al SO Guatemala	Circulación anticiclónica en El Salvador	Vaguada y Circulación ciclónica	1009 a 1012	9	9	Neutras
03/06/2016 Baja presión y ZCIT	Eje de dorsal	Circulación ciclónica al suroeste de El Salvador	1009 y 1010	2 cercana a condicione s neutras	4	-1
24/06/2016 Onda del este activa	Eje de dorsal	Onda del Este	1010 y 1012	4	3	1 a 2
28/07/2016 Vaguada	Eje de dorsal	Eje de vaguada	1009 y 1011	12	2 cercana a condiciones neutras	1

12/09/2016 Onda tropical. activa y Circulación Ciclónica	Circulación ciclónica	Vaguada	1010 y 1012	6	4	2
19/10/2016 Onda T. moderamente activa y Circulación Ciclónica	Circulación anticiclónica	Circulación ciclónica al suroeste	1007 y 1011	5	6	-1
14/06/2017 Onda Tropical y ZCIT	Vaguada	Circulación ciclónica en el Pacífico	1010 y 1011	4	2 cercana a condiciones neutras	-1
15/06/2017 Circulación Ciclónica asociada ZCIT	Circulación anticiclónica	Circulación ciclónica en el Pacífico	1011 y 1012	6	2 cercana a condiciones neutras	0.5
12/07/2017 Onda del E y Circulación Ciclónica	Vaguada	Vaguada	1010 y 1013	6	4	Neutras
20/07/2017 Vaguada n medios y ZCIT	Circulación anticiclónica	Circulación ciclónica	1009 y 1012	5	7	2
22/09/2017 Circulación Ciclónica y vaguada en medios	Vaguada	Circulación ciclónica al suroeste de El Salvador	1008 y 1010	12	7	-1

De acuerdo al resumen de la Cuadro 6, de los casos de eventos meteorológicos por lluvias intensas estudiados para los años 2015, 2016 y 2017, se observa que la mayoría de eventos analizados para la variable viento en 200 hPa, muestra la presencia de sistemas que contribuyeron la formación de nubes de desarrollo que generan fuerte convección y lluvias intensas. Entre estos sistemas, la generalidad es circulaciones anticiclónicas, vaguadas o circulaciones ciclónicas. La dirección del viento en este nivel varió en cada caso dependiendo del sistema que prevaleció en esta capa, generando, por lo general, ventilación para la salida de aire y por ende profunda convección (Davison y Gálvez 2016). Mientras que los sistemas que dominaron en 850 hPa, son vaguadas, ondas tropicales o del este y circulaciones ciclónicas en el Pacífico y en algunos casos la combinación de algunos de estos sistemas. Es importante destacar que en la mayoría de casos hubo disminución de la presión sobre el territorio salvadoreño, oscilando entre 1010 a 1013 hPa en las horas cercanas a las tormentas sobre El Salvador y en el Pacífico, de 1006 a 1011 hPa, mientras que el valor diario medio de la presión se comportó ligeramente mayor. La mayoría de sistemas asociados a ondas tropicales o vaguadas mostraron presiones de 1009 a 1013 hPa, es decir presiones relativamente más altas, situación diferente se presentó cuando estaban asociadas a circulaciones ciclónicas o a la ZCIT y que la presión bajó hasta 1006 hPa. Las anomalías del campo medio del viento para cada evento, por lo general, dieron positivas con un máximo de 18 m/s. En el nivel de 850 hPa presentó anomalías positivas y en algunos casos con valores bajos cercanos a condiciones neutras, indicando que el promedio del día fue mayor al esperado, debido probablemente, a que el viento alisio estuvo más fuerte para la mayoría de casos analizados. Y en los días que estuvo alrededor de condiciones neutras, estuvo aproximadamente en el orden de condiciones típicas o esperadas.

Para la presión atmosférica, se tuvo anomalías negativas, neutras y positivas, en la mayoría de casos. Las negativas se asociaron a la presencia de circulaciones ciclónicas al sur o al suroeste de El Salvador, condición que contribuyó al aporte de humedad del Pacífico hacia el territorio salvadoreño. Las condiciones neutras, se refiere a que estuvo en el orden de las características típicas de presión, mientras que las positivas están asociadas a presiones relativamente más altas de las típicas y se asocian por lo general con vaguadas, ondas del Este o tropicales. Es importante destacar que para algunos casos hay correspondencia de

anomalías positivas de viento más acelerado en 200 hPa, permitiendo la ventilación, consistente con las anomalías de viento relativamente más bajo en 850 hPa y anomalías negativas de presión, favoreciendo el desarrollo de las tormentas. Las anomalías de presión negativas se dieron en los meses de junio, septiembre y octubre, meses en los que ocurre el máximo secundario y primario de precipitación y octubre, que es el mes del final de la estación lluviosa (Guzmán 1971; Taylor y Alfaro 2005), y que, de acuerdo a los resúmenes sinópticos, se tiene la formación de sistemas en el Pacífico y ondas en el Caribe que contribuyen con el aporte de humedad al territorio salvadoreño. La humedad relativa para la mayoría de los casos osciló entre los 80 y 90, excepto dos casos de vaguada que estuvo en 65 en el 2016 (ver Anexo 2).

7.2 Análisis estadístico de los índices de estabilidad

En la Cuadro 7 se muestran los índices de estabilidad para los sistemas atmosféricos que se analizaron durante los años 2015-2017 en las horas cercanas a la ocurrencia de las tormentas. Los rangos para producir tormentas moderadas a fuertes de estos índices oscilan para el GDI de 35 a 60, El TT de 44 a mayor de 54, el Lifted Index de -3 a < -9, el CAPE de 1000 a 4000 y el K Index de 21 a 40 (Cuadros 2-5).

Cuadro 7. Muestra los diferentes índices de estabilidad analizados durante el 2015, 2016 y 2017 y la precipitación asociada.

Fecha	GDI	TT	Lifted	CAPE	K Index	Lluvia máx.
31/08/2015	45	48.38	-7.05	1976	34.72	79.00
24/09/2015	60	42.59	-3.64	435	37.13	67.70
10/10/2015	25	47.32	-5.21	972	34.94	75.60
15/10/2015	60	45.18	-5.48	1465	38.36	58.80
18/10/2015	50	44.2	-5.51	1359	36.96	107.40
03/06/2016	60	46.12	-7.18	2520	37.92	50.00
24/06/2016	35	48.15	-5.47	1288	35.52	55.70
28/07/2016	25	46.91	-3.37	333	35.06	83.20
12/09/2016	45	45.95	-7.1	2365	34.79	52.80
19/10/2016	45	44.65	-5.35	1519	36.36	60.10
14/06/2017	45	46.22	-6.19	1719	34.45	74.00
15/06/2017	60	44.55	-5.5	1700	38.97	113.20
12/07/2017	45	45.2	-5.15	1588	37.35	59.20
20/07/2017	40	49.03	-6.11	1750	40.15	53.70
22/09/2017	45	45.41	-6.39	1896	37.94	75.20
Promedio	**45.67**	**45.99**	**-5.65**	**1525.67**	**36.71**	**71.04**

Fuente: propia

7.2.1 Correlaciones entre el índice GDI y los otros índices

Se obtuvo el coeficiente de correlación entre el índice GDI y el resto de todos los índices de estabilidad mostrados en la Cuadro 7, correspondientes a los eventos atmosféricos asociados a fuertes precipitaciones, tal como se muestra en la Cuadro. 8.

$$r = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y}$$

Cuadro 8. Coeficiente de correlación del GDI_TT, GDI-Lifted, GDI-CAPE y GDI-K Index para los años 2015, 2016 y 2017.

GDI-TT	GDI-Lifted	GDI-CAPE	GDI-K Index
-0.62	-0.23	0.37	0.52

Fuente: propia

Significancia Estadística:

Hipótesis: $H_0 = r_{xy} = 0$

$H_1 = r_{xy} \neq 0$

$H_0 : r_{xy} = 0 \Rightarrow$ *el coeficiente de correlación obtenido procede de una población cuya correlación es* $0, (\rho = 0)$

$H_1 : r_{xy} \neq \Rightarrow 0$ *el coeficiente de correlación obtenido procede de una población cuya correlación no es* $0, (\rho \neq 0)$

N	15
Nivel de Signific.	0.025
Grados de Libertad	13
Valor t de tablas (t_o):	2.160368656

Estadístico $t = r\sqrt{n-2}/_{1-r^2}$

$$t = 2.85$$

Criterios de desición: $Si \ | t | \geqq t_{\left(\frac{\alpha}{2}, n-2\right)}$, *la correlación es significativa al* 95% *de confianza.*

Obteniendo:

Cuadro 9. Significancia estadística para los coeficientes de correlación de los índices de inestabilidad.

GDI-TT	GDI-Lifted	GDI-CAPE	GDI-K Index
Están relacionadas	No estan relacionadas	No estan relacionadas	Están relacionadas

Fuente: propia

Como se observa en la Cuadro 9, la significancia estadística del índice tropicalizado GDI, respecto del resto de índices de estabilidad, el análisis de los diferentes casos estudiados muestra que solamente las variables GDI y TT y GDI y K Index están relacionadas entre sí. Para el resto no existe relación entre las variables analizadas.

7.2.2 Análisis de los índices de inestabilidad

Los índices de estabilidad analizados es el resultado de los datos de reanálisis NCEP/FNL de las 00 UTC siendo un promedio de todos los datos obtenidos para esa hora y corresponden a la hora más cercana en la que se produjeron las tormentas eléctricas para los eventos analizados.

7.2.1.1 GDI, Índice de Gálvez y Davison

El GDI muestra máximos de 60 para sistemas de vaguada y ZCIT, baja presión distante, baja presión y ZCIT y circulación ciclónica asociada a la ZCIT, condiciones que se presentaron en el 2015, 2016 y 2017. Se tuvo un mínimo de 25 asociado a una onda tropical moderadamente activa en 2015 y una vaguada en el 2016. Estos rango están asociados respectivamente el máximo a la producción de tormentas intensas y el mínimo a la formación de tormentas aisladas o convección llana, Fig. 10. De acuerdo a lo revisado y analizado, la mayoría de sistemas mostró condiciones favorables para la convección en 200 hPa, asociadas a circulación ciclónica, vaguada o como una circulación anticiclónica favoreciendo la ventilación.

7.2.1.2 Total de Totales

De la Cuadro 7, se observa que el máximo valor del índice Total de Totales es de 49.09 y está asociado a una vaguada de niveles medios y a la ZCIT en el año 2017 y el mínimo valor de 42.59 aproximadamente, asociado a una baja presión distante al sur de Guatemala. Es importante destacar que los valores máximos de este índice están relacionados con sistemas

de vaguadas, ondas del Este y ondas tropicales, en algunos casos combinadas con bajas presiones o la ZCIT.

De acuerdo a lo observado para este índice y su respectiva clasificación (Cuadro 2), los casos analizados alcanzan solo la categoría de tormentas y no la de tormentas severas (Perea et al. 2015), ya que su el máximo valor encontrado es de 49.03.

7.2.1.3 Lifted asociado a las tormentas

El Lifted, para los diferentes años oscila entre -3.37 asociado a una vaguada durante el 2016 y un máximo de -7.18 que corresponde a una baja presión en combinación con la ZCIT, también, durante el 2016, como se observa en la (Cuadro 7). Los valores más altos del Lifted corresponden a vaguadas, ondas tropicales activas y combinación de bajas presiones con la ZCIT, es decir por lo general estos sistemas presentan o muestran convección en el primer día de influencia, antes de que tenga características de temporal. Los rangos encontrados de este índice corresponden de acuerdo a la teoría como inestable y muy inestable para la producción de tormentas (Cuadro 3).

7.2.1.4 CAPE asociado a las tormentas

De acuerdo a lo analizado, la Energía Convectiva Potencial Disponible CAPE, (Cuadro 7), asociada a las tormentas durante el 2015 al 2017, osciló por lo general arriba de los 1000 hasta un máximo de 2520, correspondiente este último valor a un baja presión y la ZCIT en el 2016, rango que corresponde a una atmósfera inestable y muy inestables, Cuadro 4 (Perea et al. 2015). Excepto los valores del CAPE asociado a una vaguada, a una onda tropical moderadamente activa y una baja presión distante con valores alrededor de 300, 400 y 972 respectivamente durante el 2016 y 2015, catalogados de acuerdo a la teoría como inestable (Cuadro 4).

7.2.1.5 K Index asociado a las tormentas

El K Index, para los casos estudiados mostró valores para los casos analizados asociados a las tormentas de 34.45 y 40.15, rangos que de acuerdo a la teoría (Cuadro 5), caen dentro de una probabilidad de 60 a 80 % de que se produzcan tormentas y solo un caso cae dentro del extremo superior con probabilidad de un 100%.

7.3 Análisis de los impactos

Para este análisis se hizo uso de los cuadros de impactos en formato Excel y ArcGIS para obtener y analizar los municipios mayormente afectados, así como también los sectores expuestos.

Los siguientes mapas muestran los impactos por año y los sectores potencialmente expuestos. De acuerdo a lo observado se nota claramente que el año 2015, Fig. 24, es el que tiene mayor número de impactos y se concentran en los municipios de San Salvador y Panchimalco, ubicados respectivamente en la parte media y sur del departamento de San Salvador, color rojo. La parte media norte occidental y parte media oriental, muestra moderado número de impactos, color amarillo, y el resto, bajo número de impactos en color verde. También se observan hospitales, escuelas y vías expuestas individualmente, tal como se ve en el Anexo 3.

En el 2016, predominaron los eventos de baja y moderada ocurrencia y se concentraron en el municipio de Apopa, reduciéndose los sectores expuestos, Fig. 25. En el 2017, Fig. 26, dominaron también los eventos de baja y moderada ocurrencia y se concentraron respectivamente en los municipios de Mejicanos y Panchimalco, de igual manera, los sectores expuestos por impactos para este año se vieron reducidos. En el Anexo 3 se muestra para cada año los sectores potencialmente expuestos para esos años en un radio de 500 m.

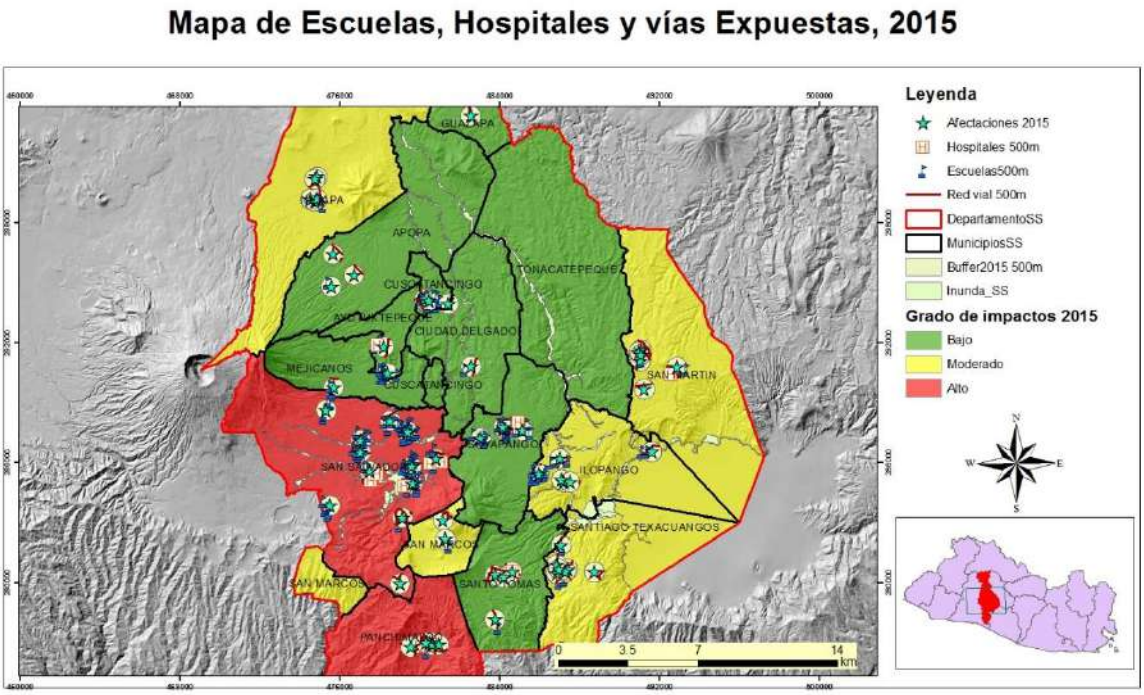


Figura 24. . Mapa de San Salvador y municipios impactados, clasificados como bajo, moderado y alto para el año 2016. Fuente: propia.

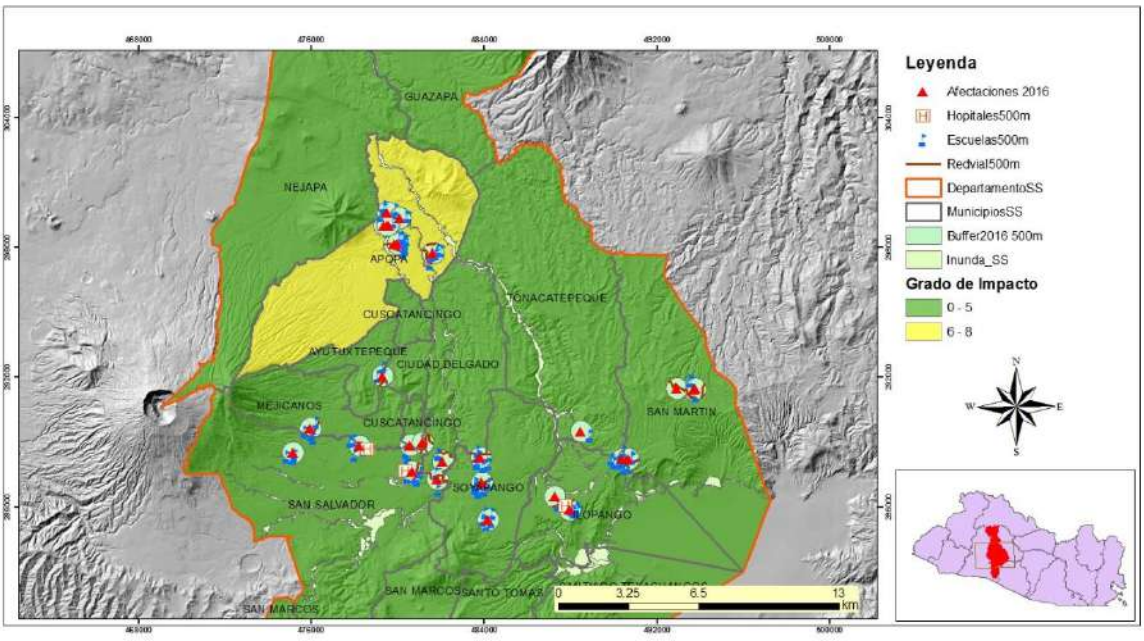


Figura 25. Mapa de San Salvador y municipios impactados, clasificados como bajo, moderado y alto para el año 2016. Fuente: propia.

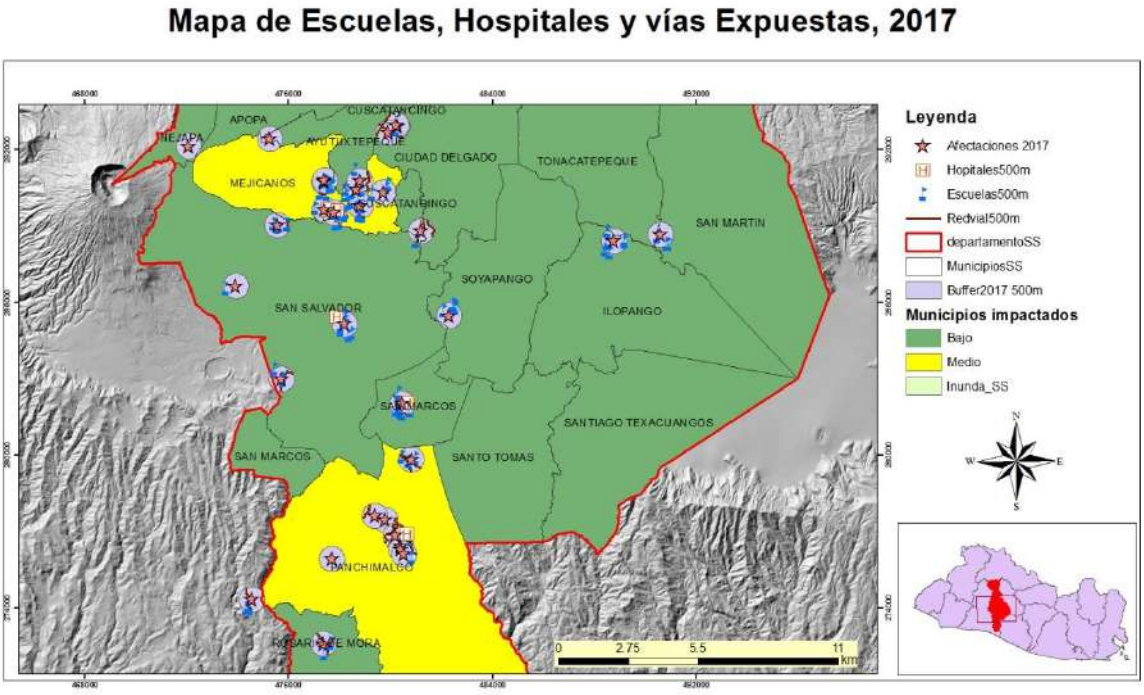


Figura 26. Mapa de San Salvador y municipios impactados, clasificados como bajo, moderado y alto para el año 2017. Fuente: propia.

A continuación se muestran la gráfica en la que se presenta el número de impactos por municipio, tal como es señalado en los mapas. Los municipios mayormente impactados durante el 2015 fueron San Salvador, Panchimalco e Ilopango. Durante el 2016, los municipios fueron Apopa, San Martín y Soyapango. Mientras que en el 2017 Panchimalco, Mejicanos y San Salvador, Fig. 27.

De acuerdo a la comparación de impactos durante el 2015, 2016 y 2017, Fig. 27, los municipios con mayor número de impactos son San Salvador, Panchimalco y San Martín, seguidamente de los municipios de Ilopango y Apopa.

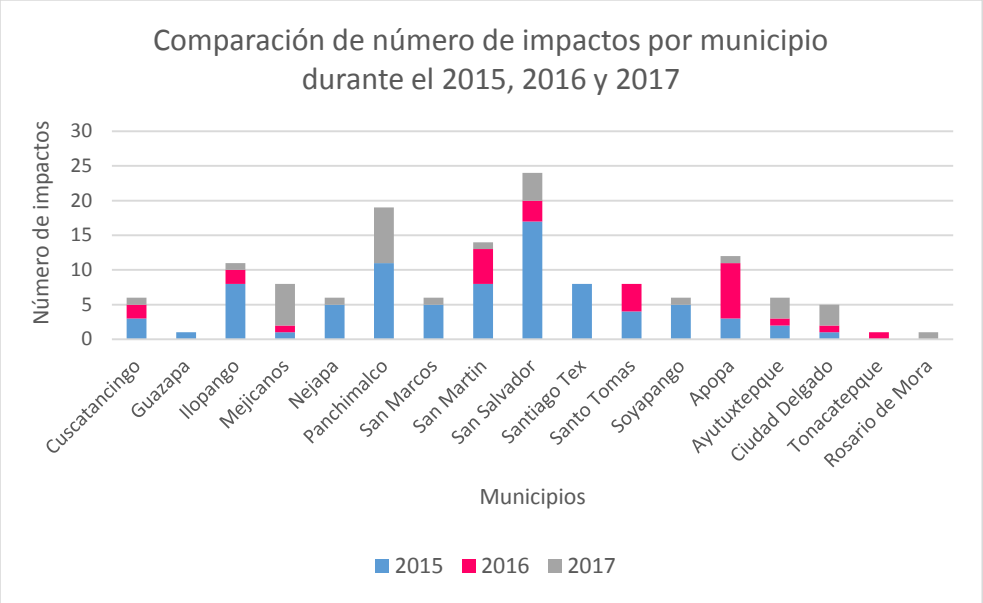


Figura 27- Número de impactos por municipios durante los eventos de lluvias intensas en el 2015, 2016 y 2017. Fuente: propia.

El siguiente gráfico muestra el número de impactos de acuerdo al tipo para cada uno de los años, se nota claramente que los impactos que se reflejan en los tres años estudiados son frecuentemente árboles caídos, deslizamientos y viviendas afectadas, Fig. 28.

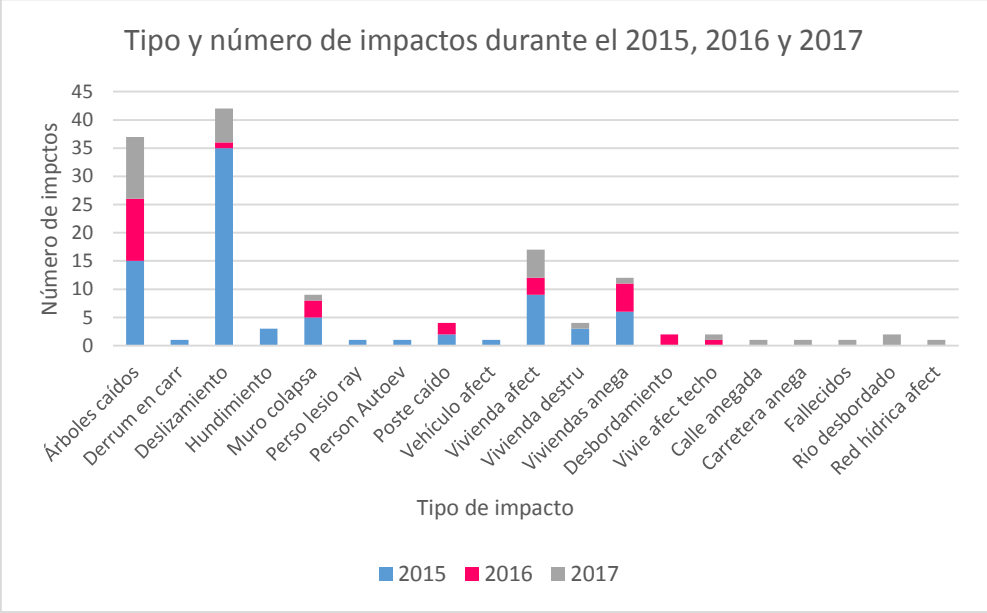


Figura 28. Tipo y número de impactos durante los eventos de lluvias intensas en el 2015, 2016 y 2017. Fuente: propia.

Las figuras 29, 30 y 31, reportan el número y tipo de hospitales expuestos, el número de escuelas privadas y públicas expuestas y el número y tipo de rutas expuestas para los años del 2015 al 2017, para cada año respectivamente, tomando en cuenta uno el buffer de 500 m.

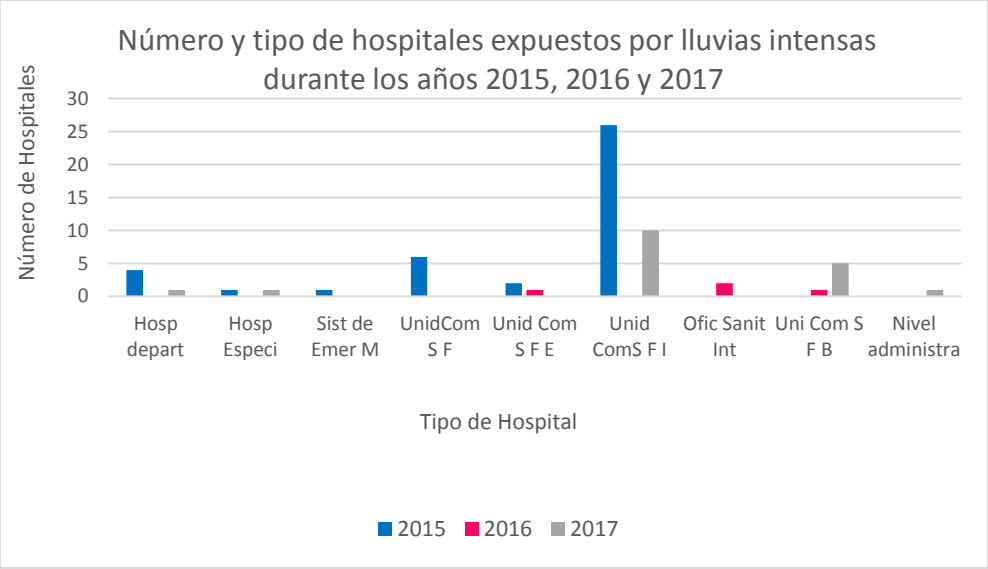


Figura 29. Número y tipo de hospitales expuesto en el 2015, 2016 y 2017, tomando un buffer de 500 m. Fuente: propia.

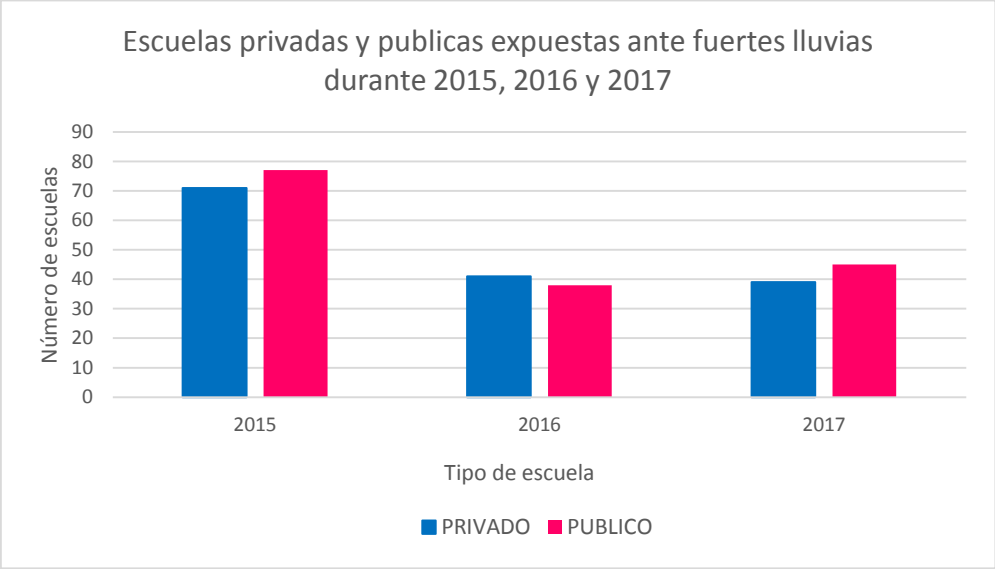


Figura 30. Número de escuelas públicas y privadas expuestas durante los años 2015, 2016 y 2017, tomando un buffer de 500m. Fuente: propia.

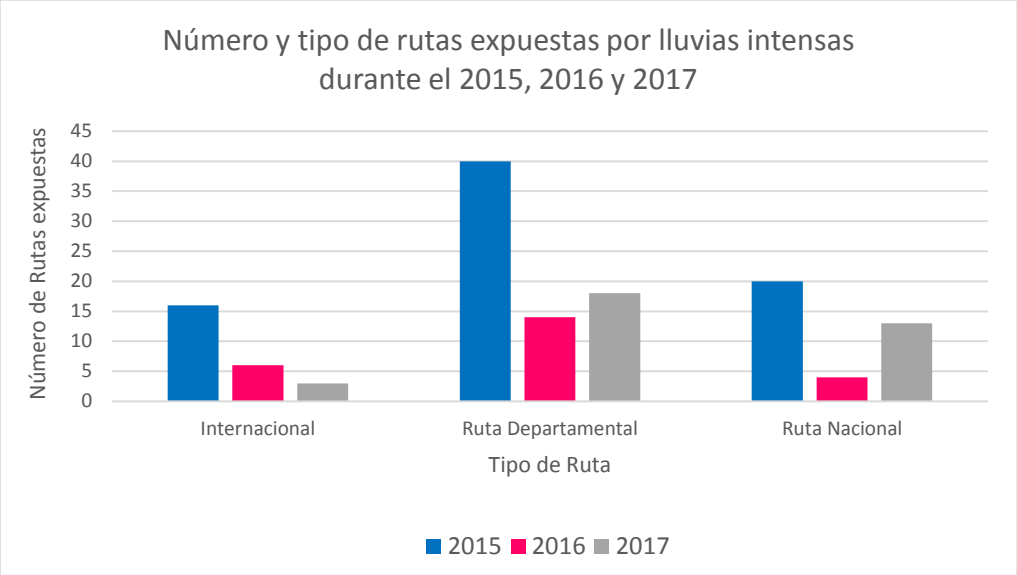


Figura 31. Número de rutas expuestas en el 2015, 2016 y 2017, tomando un buffer de 500 m. Fuente: propia.

La figura 32, muestran el número de impactos por sistema atmosférico para cada uno de los años. Mostrando en el 2015 el mayor número, relacionado a la baja presión al suroeste de Guatemala, en el 2016 causado por la Onda del Este activa y en el 2017 debido a la vaguada en niveles medios y la ZCIT.

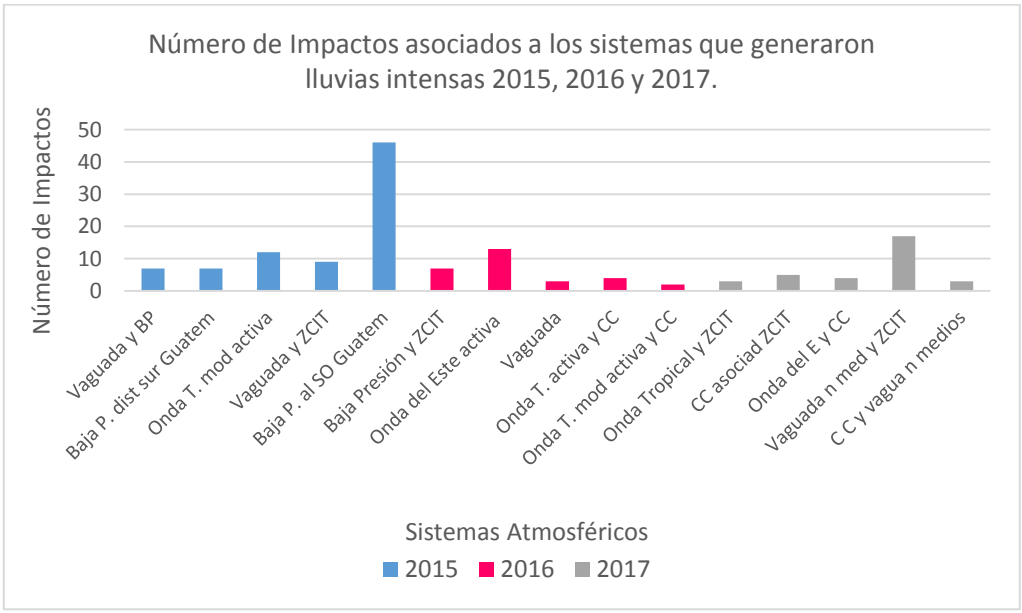


Figura 32. Número de impactos asociados a sistemas atmosféricos que generaron fuertes lluvias. Fuente: propia.

Capítulo 4.

8. Conclusiones y recomendaciones

8.1. Conclusiones

- Los sistemas atmosféricos asociados a precipitaciones mayores o iguales a 50 mm entre 2015 y 2017, de acuerdo a reanálisis, muestran que las ondas tropicales, ondas del Este y sistemas de vaguada tienen presiones atmosféricas en promedio de 1010 a 1013 hPa, mientras que las asociadas a sistemas de baja presión o la ZCIT, por lo general muestran presión atmosférica que oscila entre los 1006 a 1011 hPa.
- Los sistemas atmosféricos dominantes, de acuerdo a la caracterización en 200 hPa, fueron circulaciones anticiclónicas, vaguadas o circulaciones ciclónicas en fase con los sistemas de 850 hPa y superficie, como vaguadas, ondas tropicales y ondas del Este, asociadas a circulaciones ciclónicas en el Pacífico y en algunos casos a la ZCIT.
- Las anomalías de la presión atmosférica asociadas a circulaciones ciclónicas en el Pacífico, por lo general mostraron anomalías negativas, condición que da la pauta de que la presión atmosférica estuvo disminuida respecto del valor medio diario en presencia de este tipo de sistemas, que son generadores de abundantes nubes y lluvias.
- Las anomalías de presión negativa generalmente ocurrieron en los meses de junio, septiembre y octubre, consistentemente con los meses en los que estadísticamente hablando ocurre el máximo secundario y primario de precipitación, y octubre, es el mes del final de la estación lluviosa, pero que aún hay inestabilidad atmosférica en la región.
- Las anomalías del viento en 200 hPa, para la mayoría de los casos estudiados, muestran anomalías positivas mayores respecto a las del viento en 850 hPa, asociadas a sistemas que favorecen el ascenso vertical, tal es el caso de vaguadas troposféricas conocidas como TUTT, circulaciones ciclónicas y anticiclónicas que contribuyen a la convección o desarrollo de tormentas, como lo menciona Davison y Gálvez (2013; 2016).
- En el nivel de 850 hPa se presentaron anomalías cercanas a los valores neutros y positivas del viento, para todos los casos, indicando esta condición que el campo medio diario del viento estuvo, respectivamente, por el orden del promedio y más acelerado de las condiciones medias debido, probablemente, al aceleramiento del viento alisio, como también a la dirección del flujo ciclónico.

- El índice Total de Totales, para la mayoría de casos de los años en estudio refleja valores arriba de 44 unidades, asociado a la generación de tormentas, de acuerdo a la teoría, sin alcanzar la categoría de tormentas severas o profundas y menos la posibilidad de alcanzar tormentas severas con tornados, a pesar de esta condición, la mayoría de tormentas estudiadas produjeron impactos.
- De acuerdo a la cantidad de impactos que se generaron con la baja presión al suroeste de Guatemala en el 2015, se considera que el TT para este caso pudo haber estado dentro de la categoría de "posibilidad de tormentas severas", debido a estos resultados se puede decir, consistentemente con la opinión Davison y Gálvez (2016), que este índice está poco tropicalizado, a pesar que en los casos estudiados existe buena correlación con el GDI.
- De acuerdo a lo analizado para los años y casos en estudio el índice Lifted, en la mayoría de casos está dentro de la categoría moderadamente inestable de -3 a -6 a muy inestable de -6 a -9, categoría que es consistente con los impactos ocurridos.
- El índice CAPE, para la mayoría de los casos muestra que las condiciones fueron moderadamente inestables a muy inestables, es decir con valores de 1000 a 2500, representando bastante bien la inestabilidad atmosférica asociada a las tormentas e impactos ocurridos.
- El K Index reporta valores entre 34.45 asociado a una onda tropical y la ZCIT durante el 2017 y máximo valor también en el 2017 de 40.15, asociado a una vaguada en niveles medios y la ZCIT. Se reporta en la mayoría de los casos estudiados probabilidades de 60 a 80 % de que se presenten tormentas, y únicamente un caso, con casi 100 % de que se generen tormentas.
- El GDI, índice tropicalizado en términos generales para la mayoría de los casos, osciló entre 35 a 60, clasificándose para el mayor número de casos analizados en la categoría de potencial para la generación de tormentas dispersas con algunas lluvias intensas y el máximo valor de 60, con potencial para la producción de tormentas intensas dispersas o generalizadas con potencial de producir lluvias intensas.
- El GDI responde muy bien a la convección siempre y cuando esté asociado a sistemas convectivos en niveles medios y altos de la troposfera, es decir a perturbaciones que

apoyan la formación de nubes de amplio desarrollo, tal es el caso de vaguadas o circulaciones ciclónicas que contribuyen a la convección profunda.

- El mayor número de impactos registrados fue de 46 durante el 2015 y están asociados en su orden a 26 deslizamientos, 6 árboles caídos y 6 viviendas afectadas, entre otro tipo de impactos.
- El GDI en presencia de un sistema de baja presión, mientas no se ha desarrollado una situación de tipo temporal, responde muy bien a la convección, y tiende a sobrestimar, con valores hasta de 60 unidades, cuando se está en presencia de una condición tipo temporal.
- A pesar que de forma individual los índices para la mayoría de casos están asociados con inestabilidad atmosférica y la producción de tormentas, no todos los índices muestran un incremento simultáneo, tal es el caso que 7 de los 15 casos analizados presentan este comportamiento.
- Los índices que muestran mejor correlación y se relacionan entre sí es el GDI con K Index, tal como lo cita la teoría considerados como índices tropicalizados, y el GDI con el TT.
- El promedio de los índices analizados para los diferentes casos del 2015-2017, puede ser un buen indicador del valor a tomar en cuenta para pronosticar con bastante certeza la ocurrencia de tormentas intensas, tal es el caso del promedio para el GDI = 45.67, TT = 45.99, Lifted = -5.65, CAPE = 1525.67 y el K index = 36.71. Valores que corresponde aproximadamente a los obtenidos para el evento del 18 de octubre de 2015, donde ocurrió el mayor número de impactos registrados, un total de 46.
- Los valores máximos de los índices de estabilidad alcanzados en los diferentes casos estudiados para el GDI = 60, TT = 49.03, Lifted = -7.18, CAPE = 2520 y K index = 40.15, valores que dan la pauta, que en el trópico, o en El Salvador, no necesitan alcanzar los límites de estos índices para que produzcan intensas precipitaciones.
- De los tres años analizados, los municipios del AMSS con mayores impactos por lluvias intensas son San Salvador, Panchimalco y San Martín, ubicados al oeste, sur y este del departamento de San Salvador, respectivamente.
- De acuerdo a lo analizado, el mayor número de impactos por lluvias intensas está relacionado con deslizamientos, árboles caídos y viviendas afectadas, debido a las

fuertes lluvias y, seguramente también, porque previo y durante las tormentas se tiene la presencia de ráfagas de viento, de acuerdo a datos locales.

- Basado en los casos analizados el tipo y mayor número de hospitales, escuelas y vías que estuvieron expuestas ante las lluvias intensas y que pueden estar en riesgo para futuros eventos en las zonas cercanas a 500 m de los puntos analizados son aproximadamente 25 Unidades Comunitarias de Salud Integral Intermedia, entre 70 y 80 escuelas privadas y públicas y 40 rutas departamentales correspondientes al 2015, año en el que ocurrió el mayor número de impactos, a pesar que este año para nuestro país fue catalogado como "Niño fuerte".
- El mayor número de impactos registrado fue de 46 en el 2015 asociado a la baja presión al suroeste de Guatemala y flujo del sur. En el 2016 hubo 13 asociados al desplazamiento de la Onda del Este activa, debido a la ventilación en 200 hPa, y durante el 2017, se tuvo un máximo de 17, asociado a la combinación de la vaguada de niveles medios y a la ZCIT.
- Los sistemas atmosféricos que deben ser vigilados y ponerles mayor atención son las vaguadas, ondas del este y ondas tropicales, que tienen apoyo en capas medias y altas, tal es el caso, de la vaguada troposférica de capas altas, TUTT, además de la combinación de éstos sistemas con la ZCIT y o circulaciones ciclónicas en el Pacífico adyacente.
- En el departamento de San Salvador, en cada estación lluviosa, se presentan, por lo menos, 5 eventos con lluvias intensas mayores a 50 mm, asociados a vaguadas, ondas del este, ondas tropicales en combinación con bajas presiones y, en algunos casos, con la ZCIT, fenómenos que causan daño o impacto a la propiedad y, muy ocasionalmente, a la vida, según los años analizados.
- Este tipo de análisis es importante para la elaboración de los pronósticos que conllevan impactos, debido a que da la pauta del tipo de sistemas que pueden incidir con tormentas intensas en San Salvador para futuros eventos atmosféricos, así como también, identificar el tipo de impactos que pueden producir y las zonas más frecuentemente afectadas.

8.2. Recomendaciones

- Que el Observatorio Ambiental, específicamente el Centro de Pronóstico Meteorológico caracterice de forma sistemática más casos de estudio de años pasados para caracterizar las tormentas intensas tomando en cuenta el comportamiento de los índices de estabilidad haciendo uso de datos de reanálisis, previo a la fecha del evento, durante y posterior al evento, a diferentes horas, con la finalidad de analizar de mejor manera los rangos de los índices de estabilidad asociados a las tormentas intensas.
- Que se aplique la metodología estudiada en este trabajo para todo el país con el fin de sistematizar los impactos para los eventos pasados y futuros de lluvias intensas, con el propósito de contar con más información que sirva de insumo para la elaboración de pronósticos por impactos.
- Que se brinde continuidad a la base de datos de impactos aquí utilizada, de tal manera que se georreferencien los impactos y que se utilice ArcGIS, QGIS o un sistema automatizado para su visualización con el fin de correlacionar con capas existentes que pueden aportar más elementos de juicio para la elaboración de pronósticos por impactos, tal es el caso de la identificación de zonas recurrentes o exposición de personas o infraestructura.
- Conociendo el tipo de impactos mayormente recurrentes y los municipios con más afectaciones por lluvias intensas, se puede generar una serie de recomendaciones para la elaboración de pronósticos que toman en cuenta los impactos y también para los pronósticos de muy corto plazo que se hacen en la DOA.
- Que debido a que todos los índices aportan información se recomienda usarlos por separado, dando prioridad al GDI y K Index, debido a que resuelven para la mayoría de casos estudiados de mejor manera la convección.
- Se recomienda utilizar para futuros eventos, la intensidad de la precipitación para correlacionar la intensidad de la lluvia con los índices de estabilidad y los impactos.
- Que se utilicen otros Buffer o radios de diferente tamaño con el fin de evaluar los hospitales, escuelas y vías expuestas, así como también la cantidad de pobladores que se pueden ver afectados.
- Para futuros estudios se recomienda hacer uso de otro tipo de herramientas como el IDL (High Performance Computing, software científico especializado), con el fin de

presentar mapas con los índices de estabilidad para fácil visualización y comparación y evaluar el comportamiento y bondad que tienen.

- Se recomienda no desestimar valores de GDI de 25 a 35 cuando los otros índices de estabilidad atmosférica son relativamente altos, ya que pueden generarse fuertes tormentas y, a la vez, producir impactos, tal como ocurrió con la onda tropical moderadamente activa el 10 de octubre de 2015.
- Se recomienda utilizar una rejilla más fina para la elaboración de mapas de variables meteorológicas mediante reanálisis para mejor resolución, caracterización y análisis de los sistemas atmosféricos de futuras investigaciones.
- Se recomienda que para futuras investigaciones se tomen en cuenta y evalúen los impactos económicos a la infraestructura y sectores económicos.

9. Bibliografía

Alfaro, E., A. Quesada, y F. Solano, 2010: Análisis del Impacto en Costa Rica de Ciclones Tropicales Ocurridos en el Mar Caribe, desde 1968 al 2007. *Diálogos, Revista Electrónica de Historia*, **11**, 27-28.

Alfaro, E., y A. Quesada, 2010: Ocurrencia de ciclones tropicales en el Mar Caribe y sus impactos sobre Centroamérica 1. *Intersedes, Revista Electrónica de las Sedes Regionales de la Universidad de Costa Rica*, **11**, 137-138.

Amador, J., E. Alfaro, O. Lizano, y V. Magaña, 2006: Atmospheric forcing of the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography*, **69,** 115-117.

Amador, J. A., 2011. Socio-economic impacts associated with meteorological systems and tropical cyclones in Central America in 2010. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **92**, 184.

Amador, J. A., 2008: The Intra-Americas Seas Low-Level Jet (IALLJ): Overview and Future Research. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1146(1), 153-188. doi: 10.1196-annals.1446.012.

Amador, J., A. Duran, E. Rivera, G. Mora, F. Sáenz, B. Calderón and N. Mora, 2016: The easternmost tropical Pacific. Part II: Seasonal and intraseasonal modes of atmospheric variability, *Revista de Biología Tropical*, **64,** 43-50.

Amador, J., E. Alfaro, O. Lizano, y V. Magaña, 2006: Atmospheric forcing of the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography*, **69,** 134-135.

BM, 2016: Centroamérica 6C Estudio de la Urbanización en Centroamérica, Oportunidades de una Centroamérica Urbana. GSU10 América Latina y El Caribe, Report No: 106268, vi-vii.

COMET, 2011: Definición de Mesoescala, Corporación Universitaria de Investigación Atmosférica, UCAR. https://www.meted.ucar.edu/mesoprim/mesodefn_es/navmenu.php?tab=1&page=1.0.0

COMET, 2013: Sistemas Convectivos de Mesoescala Tropicales. University Corporation for Atmospheric Research, UCAR.
https://www.meted.ucar.edu/tropical/synoptic/trop_MCS_es/

COMET, 2014a: Tormentas Locales Severas Tropicales, Corporación Universitaria de Investigación Atmosférica, UCAR. https://www.meted.ucar.edu/tropical/synoptic/local_storms_es/

COMET, 2014b: Ondas Tropicales del Este, Corporación Universitaria de Investigación Atmosférica, UCAR. https://www.meted.ucar.edu/tropical/synoptic/Afr_E_Waves_es/navmenu.php?tab=1&page=9.2.0&type=flash

Davison, M., y J. Gálvez, 2013: ¿Ondas del Este o Vaguadas inducidas por la TUTT?, Presentación, Internacional Desk. NOAA.

Davison, M., y J. Gálvez, 2016: Índices de Estabilidad, WPC International Desk, Presentación. NOAA. http://ftp.wpc.ncep.noaa.gov/mike/CHILE_2016/Presentations-PDF/3_%C3%8Dndices%20de%20Estabilidad.pdf

DYGESTIC, EHPM, 2016*:* Encuestas de Hogares de Propósitos Múltiples, Dirección General de Estadísticas y Censos DYGESTIC. Gobierno de la República de El Salvador, Ministerio de Economía, 2-3.

Farfán, L., E. Alfaro, y E. Cavazos, 2013: Characteristics of tropical cyclones making landfall on the Pacific coast of Mexico: 1970-2010. *Atmósfera*, **26**, 164-168.

Fritsch, J., R. Kane, and C. Chelius, 1986: The Contribution of Mesoscale Convective Weather to the Warn-Season Precipitation in the United States. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, AMS, 25, 1333-1334.

Gálvez, J., y M. Davison, 2016: The Gálvez-Davison Index for Tropical Convection Systems Research Group, College Park, Maryland 5830 University Research Court, Suite 4128, College Park, MD, 20740, 6.

Guzmán, G., 1971: Meteorología Sinóptica y Climatología de Centroamérica. *Publicación Técnica No 10*, 51-52-57-58-65.

Hernández, J., 2012: Re-Análisis de las condiciones óptimas para generación de fuertes lluvias y Determinación de sus corredores. San Salvador, poster. Universidad de El Salvador.

Hidalgo, H.G., Durán-Quesada, A.M., Amador J.A. & Alfaro, E.J., 2015. The Caribbean Low-Level Jet, the Inter-Tropical Convergence Zona and the precipitation patterns in the Intra-Americas Sea: A proposed dynamical mechanism. Geografiska Annaler, Series A: Physical Geography, 97, 41–59. DOI:10.1111/geoa.12085

Ibarra, A., 2008: Centroamérica: una región de múltiples amenazas y alta vulnerabilidad. Algunos apuntes conceptuales. Evaluación y Prevención de Riesgos Ambientales en Centroamérica. Girona: Documenta Universitaria, 400-401.

Jacks, E., y J. Davison, 2010: Directrices sobre Sistemas de Alerta Temprana y Aplicación de Predicción Inmediata y Operaciones de Aviso. *WMO/TD No***.** 1559, 2-3.

Knaff, J. A., 1997: Implications of summertime sea level pressure anomalies in the tropical Atlantic region. J. Climate, 10, 789-804.

López, J., 2011: Metodología para la Predicción de Tormentas Eléctricas a partir de Mediciones de Campo Electrostático Ambiental y Sistemas de Localización de Rayos en Zona Montañosa, Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia, 5-7.

Maddox, R., 1980: Mesoscale Convective Complex, *Bulletin American Meteorological Society*, **61,** 1375-1377.

Manzanilla, A., M. Cortéz, y J. Pastrana, 2005: Un Estudio Explorativo de los Sistemas Convectivos de Mesoescala de México. Boletín del Instituto de Geografía, UNAM, **56**, 27-28.

MARN, 2009: Informe Técnico de la Baja Presión en el Pacífico y Huracán Ida y su Impacto en el Medioambiente. Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Náurales, 15-17

MARN, 2011: Descripción y Cronología de la Depresión Tropical 12 E, 10 -19 de 2011. Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 3-5.

MARN, 2005: Caracterización de las Condiciones Meteorológicas. Servicio Nacional de Estudios Territoriales. Ministerio de Medioambiente y Recurso Naturales, 28-51.

Mejía, J., y G. Poveda, 2005: Ambientes Atmosféricos de Mesoescala sobre Colombia durante 1998 según la Misión TRMM y Re-análisis NCEP/NCAR, *Cienc*, **29,** 496 - 497.

OMM, 2010: Directrices sobre Sistemas de Alerta Temprana y Aplicación de Predicción Inmediata y de Operaciones de Aviso. *WMO/TD No. 1559*, 5-10.

OMM, 2015: Directrices de la OMM sobre servicios de predicción y avisos multirriesgos que tienen en cuenta los impactos. *Tiempo Clima y Agua*, OMM–No. 1150, 2-3.

Perea, C., C. Jiménez, y J, Riesgo, 2015: Guía de Campos y Parámetros Operativos de Interés en el Diagnóstico Convectivo. AEMET, *Nota Técnica* 17, 1-17.

Pérez, P., E. Alfaro, H. Hidalgo, y F. Jiménez, 2016: Distribución espacial de impactos de eventos Hidrometeorológicos en América Central. *Revista de Climatología*, **16,** 64-65.

PRECANSA II, 2011: Centroamérica en Cifras, Datos de Seguridad Alimentaria Nutricional y Agricultura Familiar, 4-5.

Poveda, G., 1998. Retroalimentación entre el fenómeno de El Niño/Oscilación del Sur y la hidrología de Colombia, Tesis PhD., Universidad de Colombia, Sede Medellín.

Quirós Badilla, E., H. G. Hidalgo León. 2016a. Interacción de la Zona de Convergencia Intertropical del Pacífico Este con Sistemas Tropicales. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*. **15**(2), 33-47.

Quirós, E., y H. Hidalgo, 2016b. Variabilidad y conexiones climáticas de la zona de convergencia intertropical del Pacífico Este. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos.* 15(1), 21-36.

Retana, J., 2012: Eventos hidrometeorológicos extremos lluviosos en Costa Rica desde la perspectiva de la adaptación al cambio en el clima. *Revista de Ciencias Ambientales*, **44**, 10 -11.

Taylor, M., and E. Alfaro, 2005: Climate of Central America and the Caribbean. En: *Encyclopedia of World Climatology*: pp.183-189. Netherlands: Springer.

WPC, National Weather Service, Weather Prediction Center, Tropical Desk, 2014: The Gálvez-Davison Index (GDI), http://www.wpc.ncep.noaa.gov/international/gdi/

UNISDR, 2015: Impacto de los Desastres en América Latina y el Caribe 1990-2013. 2-3.

Wallace, M., & P, Hobbs, 2006: Atmospheric Escience And Introductory Survey, Second Edition, 19-22.

Anexos

Anexo 1.

Cuadro 10. Muestra de los cuadros que se utilizaron con la información base de las fechas de los eventos para cada año, municipio influenciado, lugar afectado, tipo de afectación, cantidad de lluvia, sistema atmosférico, imagen satelital, radar, coordenadas y enlace de noticias. Ejemplo para el año 2015. Fuente: propia.

Cuadro 10. Muestra las fechas de los eventos estudiados entre otro tipo de información relacionada con los impactos y sistema atmosféricos para el 2015.

Fecha	Municipio	LugarA	Afectacion	lluvia_mm	sistemaAtm	Imagen	Radar vinculo	y	X	link
31/08/2015	Apopa	Col. San Sebastiann Callejón del	Viviendas anegadas	Apopa 69.4,Gua	Vaguada y Baja PP		..\Mapas Modelos	13.70085700000	-89.23245800000	http://proteccion
31/08/2015	Nejapa	Col. Los Ángeles Calle principal d	Viviendas anegadas		Vaguada y Baja PP		..\Mapas Modelos	13.81463800000	-89.23545500000	http://proteccion
31/08/2015	Nejapa	Cantón Galera Quemada sector 2	Viviendas anegadas		Vaguada y Baja PP		..\Mapas Modelos	13.81363600000	-89.23345600000	http://proteccion
31/08/2015	Nejapa	Puente en la quebrada el garrob	Vehículo afectado		Vaguada y Baja PP		..\Mapas Modelos	13.82463800000	-89.23245300000	http://proteccion
31/08/2015	Nejapa	Calle el Garrobo, municipio de N	Vivienda afectada		Vaguada y Baja PP		..\Mapas Modelos	13.82363700000	-89.23345500000	http://proteccion
31/08/2015	Apopa	Km, 15 carretera de Apopa a Que	Árbol caído		Vaguada y Baja PP		..\Mapas Modelos	13.80867400000	-89.23245800000	http://proteccion
31/08/2015	Nejapa	Cantón Galera Quemada, cerca d	Vivienda destruida		Vaguada y Baja PP		..\Mapas Modelos	13.81463800000	-89.23245800000	http://proteccion
24/09/2015	Soyapango	Colonia Magaly	Viviendas anegadas	Aeropuerto de	Baja P. dist sur Guatemala		..\Mapas Modelos	13.71004500000	-89.13725270000	http://mediacent
24/09/2015	San Marcos	Colonia Las Mercedes	Deslizamiento	68.2 Panchimal	Baja P. dist sur Guatemala		..\Mapas Modelos	13.66095100000	-89.17298100000	https://www.lapr
24/09/2015	San Marcos	Colonia Santa Leonor	Deslizamiento		Baja P. dist sur Guatemala		..\Mapas Modelos	13.66953200000	-89.17398400000	https://www.lapr
24/09/2015	San Marcos	Colonia Marabí	Deslizamiento		Baja P. dist sur Guatemala		..\Mapas Modelos	13.66095100000	-89.17298100000	https://www.lapr
24/09/2015	Panchimalco	Km. 5 carretera a Los Planes de R	Deslizamiento		Baja P. dist sur Guatemala		..\Mapas Modelos	13.61322100000	-89.17893200000	https://www.lapr
24/09/2015	Cuscatancing	Calle a Monte Carmelo, Lot. Los (	Deslizamiento		Baja P. dist sur Guatemala		..\Mapas Modelos	13.66903900000	-89.17654300000	https://www.lapr
24/09/2015	Cuscatancing	Col. San Carlos 1, calle principal.	Árbol caído		Baja P. dist sur Guatemala		..\Mapas Modelos	13.66702800000	-89.16544200000	https://www.lapr
24/09/2015	Cuscatancing	Urb. Ciudad Futura, calle Goasco	Hundimiento		Baja P. dist sur Guatemala		..\Mapas Modelos	13.66833400000	-89.17454300000	https://www.lapr
10/10/2015	San Salvador	B Lourdes, calle Delgado 22 Av, S	Poste caído	51.2 Panchimal	Onda Tropical mod activa		http://www.snet.	13.69722100000	-89.17733100000	http://www.lapag
10/10/2015	San Salvador	B Lourdes, calle Delgado 22 Av, S	Vivienda afectada		Onda T. mod activa		http://www.snet.	13.69724100000	-89.17734100000	http://www.lapag
10/10/2015	San Martin	Col. San Joaquín, Pje. 10 (3 pasaj	Viviendas anegadas		Onda T. mod activa		http://www.snet.	13.73874400000	-89.06570300000	http://www.lapag
10/10/2015	San Salvador	Entrada principal de la Colonia C	Árbol caído		Onda T. mod activa		http://www.snet.	13.66455700000	-89.18417600000	http://www.lapag
10/10/2015	San Salvador	Bulevar de Los Héroes, frente a M	Árbol caído		Onda T. mod activa		http://www.snet.	13.70555700000	-89.21217600000	http://www.lapag
10/10/2015	San Salvador	Cantón San Antonio Abad, Calle :	Persona lesionada rayo		Onda T. mod activa		http://www.snet.	13.71931100000	-89.22813200000	http://www.lapag

Fuente propia.

Continuación de Cuadro 10.

10/10/2015	San Salvador	Cantón San Antonio Abad, Calle 15	Viviendas anegadas		Onda T. mod activa	http://www.snet.g	13.71931200000	-89.22814300000	http://www.lapagir
10/10/2015	Ciudad Delgad	Km 9 Y 11 Troncal del Norte	Árbol caído		Onda T. mod activa	http://www.snet.g	13.73908500000	-89.16107500000	http://www.lapagir
10/10/2015	San Martin	Km 13 carretera de ORO (frente C	Árbol caído		Onda T. mod activa	http://www.snet.g	13.73874400000	-89.06570300000	http://www.lapagir
10/10/2015	Panchimalco	Carretera aPanchimalco kilómetro	Deslizamiento		Onda T. mod activa	http://www.snet.g	13.61322100000	-89.17893200000	http://www.lapagir
10/10/2015	Panchimalco	Carretera aPanchimalco kilómetro	Árbol caído		Onda T. mod activa	http://www.snet.g	13.61333100000	-89.17895100000	http://www.lapagir
10/10/2015	Panchimalco	Carretera Antigua a Panchimalco a	Deslizamiento		Onda T. mod activa	http://www.snet.g	13.61342500000	-89.17875600000	http://www.lapagir
15/10/2015	San Mart ¡n	Col. San Andrés al final del pasaje	Deslizamiento	58.8 MARN	Vaguada y ZCIT	..\Mapas Modelos\	13.73865400000	-89.17853200000	https://twitter.com
15/10/2015	San Salvador	20 av. norte y calle 5 de nov en Ba	Hundimiento		Vaguada y ZCIT	..\Mapas Modelos\	13.70949900000	-89.19023800000	https://twitter.com
15/10/2015	San Salvador	Colonia Flor Blanca, a la altura de	Deslizamiento		Vaguada y ZCIT	..\Mapas Modelos\	13.70016100000	-89.21224500000	https://twitter.com
15/10/2015	San Salvador	Colonia Flor Blanca, a la altura de	Vivienda afectada		Vaguada y ZCIT	..\Mapas Modelos\	13.70016500000	-89.21224200000	https://twitter.com
15/10/2015	San Salvador	1 y 3 calle Poniente Frente a Casa	Árbol caído		Vaguada y ZCIT	..\Mapas Modelos\	13.72361700000	-89.18910300000	https://twitter.com
15/10/2015	San Salvador	Km 6 calle principal a los planes de	Muro colapsado		Vaguada y ZCIT	..\Mapas Modelos\	13.63784500000	-89.18726300000	https://twitter.com
15/10/2015	San Salvador	Colonia Harrison, pasaje los bueye	Vivienda destruida		Vaguada y ZCIT	..\Mapas Modelos\	13.68596800000	-89.18815600000	https://twitter.com
15/10/2015	Guazapa	Carretera Troncal del Norte, km. 2	Árbol caído		Vaguada y ZCIT	..\Mapas Modelos\	13.70085700000	-89.17684500000	https://twitter.com
15/10/2015	San Marcos	Colonia 10 de octubre, carretera a	Vivienda destruida		Vaguada y ZCIT	..\Mapas Modelos\	13.66095100000	-89.17298100000	https://twitter.com
18/10/2015	Apopa	Carretera Troncal del Norte Km 11	Árbol caído	51.6 Apopa, 74.2	Baja P. al SO Guatemala	..\Mapas Modelos\	13.70085700000	-89.17684500000	http://elsalvadortre
18/10/2015	San Martín	Cantón Delicias	Deslizamiento		Baja P. al SO Guatemala	..\Mapas Modelos\	13.74164300000	-89.08254100000	http://elsalvadortre
18/10/2015	San Martín	Carretena panamericana km 13 1/2	Árbol caído		Baja P. al SO Guatemala	..\Mapas Modelos\	13.74448600000	-89.08235100000	http://elsalvadortre
18/10/2015	San Martín	Comunidad Santa Gertrudis	Deslizamiento		Baja P. al SO Guatemala	..\Mapas Modelos\	13.74657500000	-89.08245200000	http://elsalvadortre
18/10/2015	San Martín	Comunidad Santa Gertrudis	Vivienda afectada		Baja P. al SO Guatemala	..\Mapas Modelos\	13.74557600000	-89.08335200000	http://elsalvadortre
18/10/2015	San Martín	Com.Jupiter y El Milagro	Deslizamiento		Baja P. al SO Guatemala	..\Mapas Modelos\	13.74448300000	-89.08235500000	http://elsalvadortre
18/10/2015	Ilopango	La Vueltona Canton Dolores Apulo	Árbol caído		Baja P. al SO Guatemala	..\Mapas Modelos\	13.70059800000	-89.07741900000	http://elsalvadortre
18/10/2015	Ilopango	Comunidad MontecristoII Pje San I	Muro colapsado		Baja P. al SO Guatemala	..\Mapas Modelos\	13.69047500000	-89.12950800000	http://www.elsalva
18/10/2015	Ilopango	200 mts antes de la vueltona	Derrumbe que obstruye la carretera.		Baja P. al SO Guatemala	..\Mapas Modelos\	13.69741400000	-89.12001200000	http://www.elsalva
18/10/2015	Ilopango	Carretera a changallo.	Deslizamiento		Baja P. al SO Guatemala	..\Mapas Modelos\	13.68681600000	-89.11818500000	http://www.elsalva
18/10/2015	Santo Tomás	colonia Retana , final Pasaje las Nu	Muro colapsado		Baja P. al SO Guatemala	..\Mapas Modelos\	13.64637600000	-89.14201800000	http://www.elsalva

Fuente propia.

Continuación de Cuadro 10.

18/10/2015	Santo Tomás	Canton EL guaje sector la Manzan	Muro colapsado		Baja P. al SO Guatemala	..\Mapas Modelos\	13.64470300000	-89.14988900000	http://www.elsalva
18/10/2015	Santo Tomás	Canton Chaltepe y colonia Retana	Deslizamientos		Baja P. al SO Guatemala	..\Mapas Modelos\	13.64370200000	-89.14572900000	http://ww+A50:L5(
18/10/2015	Santiago Texa(	Lotificacion Divina Providencia Cai	Deslizamiento		Baja P. al SO Guatemala	..\Mapas Modelos\	13.64624200000	-89.10387800000	http://www.elsalva
18/10/2015	Santiago Texa(	Lotificacion Divina Providencia Cai	Vivienda afectada		Baja P. al SO Guatemala	..\Mapas Modelos\	13.64738500000	-89.11636600000	http://www.elsalva
18/10/2015	Santiago Texa(	Carretera antigua a Ilopango Cant	Deslizamiento		Baja P. al SO Guatemala	..\Mapas Modelos\	13.64638400000	-89.11736400000	http://www.elsalva
18/10/2015	Santiago Texa(	calle que conduce a sector la Playa	Deslizamientos		Baja P. al SO Guatemala	..\Mapas Modelos\	13.64738500000	-89.12036600000	http://www.elsalva
18/10/2015	Santiago Texa(	Barrio el Calvario Pasaje Tempisqu	Muro colapsado		Baja P. al SO Guatemala	..\Mapas Modelos\	13.65838500000	-89.11936700000	http://www.elsalva
18/10/2015	santiago Texa(	Barrio San José Calle panoramica	Deslizamiento		Baja P. al SO Guatemala	..\Mapas Modelos\	13.64938600000	-89.12136500000	http://www.elsalva
18/10/2015	Santiago Texa(	Canton el Morro Caserio los Cruce	Deslizamiento		Baja P. al SO Guatemala	..\Mapas Modelos\	13.64539300000	-89.12136700000	http://www.elsalva
18/10/2015	Panchimalco	Cantón los troncones caserio los s	Poste caído		Baja P. al SO Guatemala	..\Mapas Modelos\	13.61322100000	-89.17893200000	http://www.elsalva
18/10/2015	Ayutuxtepequ(	Calle Estocolmo, colonia Escandia	Deslizamiento		Baja P. al SO Guatemala	..\Mapas Modelos\	13.74790700000	-89.20154000000	http://www.elsalva
18/10/2015	Ayutuxtepequ(	Colonia San Carlos	Deslizamiento		Baja P. al SO Guatemala	..\Mapas Modelos\	13.72437100000	-89.19975600000	http://www.elsalva
18/10/2015	Mejicanos	Canton San Ramon, Col Lorena, Ca	Vivienda afectada		Baja P. al SO Guatemala	..\Mapas Modelos\	13.72963300000	-89.22463200000	http://www.elsalva
18/10/2015	Ilopango	Amatitlán, Apulo	Deslizamiento		Baja P. al SO Guatemala	..\Mapas Modelos\	13.68681600000	-89.11818500000	http://www.elsalva
18/10/2015	Soyapango	Comunidad Martinez	Deslizamiento		Baja P. al SO Guatemala	..\Mapas Modelos\	13.71004500000	-89.13725300000	http://www.elsalva
18/10/2015	Soyapango	Zona insdustrial pje Sigma por alm	Árboes caídos		Baja P. al SO Guatemala	..\Mapas Modelos\	13.71066400000	-89.14603700000	http://www.elsalva
18/10/2015	Soyapango	Col. Las Victorias senda 1	Árboes caídos		Baja P. al SO Guatemala	..\Mapas Modelos\	13.71165400000	-89.14612800000	http://www.elsalva
18/10/2015	Soyapango	Calle agua Caliente	Deslizamiento		Baja P. al SO Guatemala	..\Mapas Modelos\	13.70951600000	-89.16550900000	http://www.elsalva
18/10/2015	Panchimalco	Caserio El Barrial , Pasaje Galán	Deslizamiento		Baja P. al SO Guatemala	..\Mapas Modelos\	13.61352500000	-89.17853500000	http://www.elsalva
18/10/2015	Panchimalco	Caserio El Barrial , Pasaje Galán	Vivienda afectada		Baja P. al SO Guatemala	..\Mapas Modelos\	13.61231100000	-89.18893200000	http://www.elsalva
18/10/2015	Panchimalco	Caserio El Barrial , Pasaje Galán	Vivienda afectada		Baja P. al SO Guatemala	..\Mapas Modelos\	13.61423100000	-89.17993200000	http://www.elsalva
18/10/2015	Panchimalco	Canton El Guayabo	Deslizamiento		Baja P. al SO Guatemala	..\Mapas Modelos\	13.61322100000	-89.17894200000	http://www.elsalva
18/10/2015	Panchimalco	Caserio el Cedrito Cantón El Cedro	Deslizamiento		Baja P. al SO Guatemala	..\Mapas Modelos\	13.61333100000	-89.17594100000	http://www.elsalva
18/10/2015	Panchimalco	Caserio el Cedrito Canton El Cedro	Vivienda afectada		Baja P. al SO Guatemala	..\Mapas Modelos\	13.61423100000	-89.18193100000	http://www.elsalva
18/10/2015	Ilopango	Amatitán, cantón dolores apulo.	Deslizamiento		Baja P. al SO Guatemala	..\Mapas Modelos\	13.68681600000	-89.11818500000	http://www.elsalva
18/10/2015	Ilopango	Amatitán, cantón dolores apulo.	Personas Autoevacuados		Baja P. al SO Guatemala	..\Mapas Modelos\	13.68781600000	-89.11918500000	http://www.elsalva
18/10/2015	San Salvador	Colonia Loma Linda, arriba de Esta	Deslizamiento		Baja P. al SO Guatemala	..\Mapas Modelos\	13.67613900000	-89.22636500000	http://www.elsalva
18/10/2015	Santo Tomás	Cantón casitas	Deslizamiento		Baja P. al SO Guatemala	..\Mapas Modelos\	13.62470300000	-89.14988900000	http://www.elsalva
18/10/2015	San Salvador	Barrio la Vega	Deslizamiento		Baja P. al SO Guatemala	..\Mapas Modelos\	13.69375000000	-89.18860200000	http://www.elsalva
18/10/2015	San Salvador	Colonia San Joaquín Poniente	Hundimiento		Baja P. al SO Guatemala	..\Mapas Modelos\	13.68596800000	-89.18815600000	http://www.elsalva
18/10/2015	San Salvador	Colonia San Francisco, Km 7 Plane	Deslizamiento		Baja P. al SO Guatemala	..\Mapas Modelos\	13.63784500000	-89.18726300000	http://www.elsalva
18/10/2015	Santiago Texa(	Barrio San José, Calle Panorámica	Deslizamiento		Baja P. al SO Guatemala	..\Mapas Modelos\	13.64738500000	-89.12036600000	http://www.elsalva
18/10/2015	San Salvador	Comunidad el Babadero por el cen	Árbol caído		Baja P. al SO Guatemala	..\Mapas Modelos\	13.69166000000	-89.20800500000	http://www.elsalva
18/10/2015	Ilopango	Cantón Changallo	Deslizamiento		Baja P. al SO Guatemala	..\Mapas Modelos\	13.68681700000	-89.11527500000	http://www.elsalva
18/10/2015	San Marcos	Pasajes 7 y 8 de la colonia Jardines	Deslizamiento		Baja P. al SO Guatemala	..\Mapas Modelos\	13.66095100000	-89.17298100000	http://www.elsalva

Fuente propia.

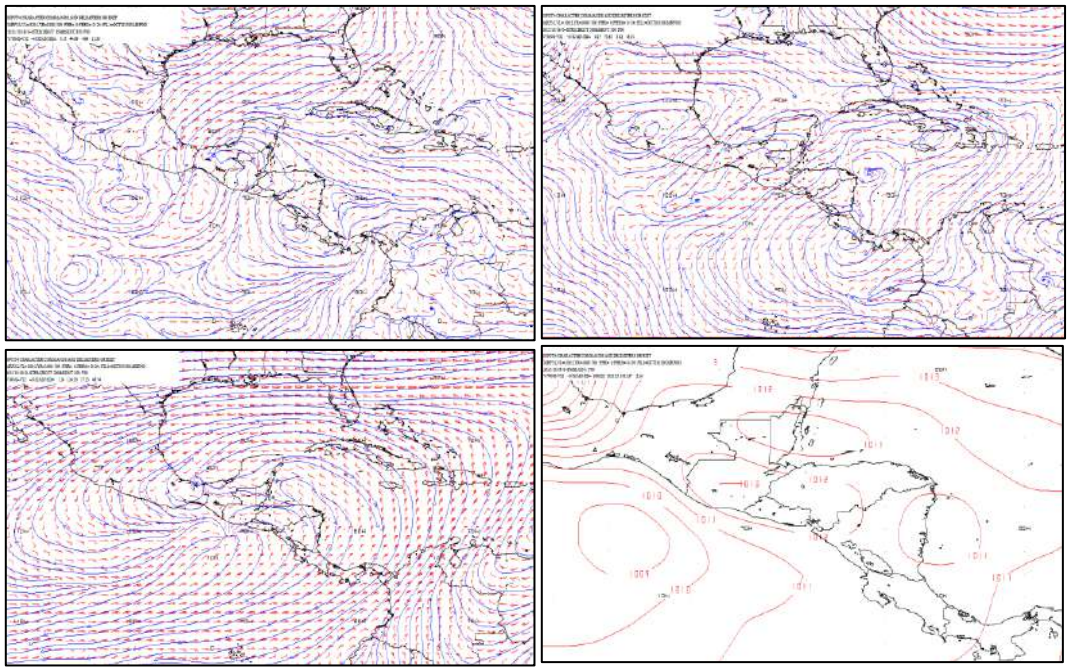
Anexo. 2. Cuadros de datos de reanálisis utilizados para los eventos que generaron impactos para los años 2015, 2016 y 2017, Cuadro 11.

Cuadro 11. Datos de reanálisis utilizados a las horas cercanas a la generación de las tormentas de los diferentes eventos para 2015, 2016 y 2017, para su respectivo análisis.

Fecha	Sistema	Presión CA	Humedad	Dir.Viento 850	Viento 500 kt	Viento 200 kt
31/08/2015	Vaguada y BP	1012	80	NE-05	NE-05	NE-15
24/09/2015	Baja P. dist sur Guatemala	1011	90	SO-15	SE-10	NE-10
10/10/2015	Onda Tropical mod activa	1012	80	NE-10	NE-15	NO-15
15/10/2015	Vaguada y ZCIT	1010	90	NE-05	O-05	SO-15
18/10/2015	Baja P. al SO Guatemala	1012	90	SO-10	SO-20	O-15
03/06/2016	Baja Presión y ZCIT	1010	90	SE-05	SE-05	NO-25
24/06/2016	Onda del Este activa	1012	80	NE-05	NE-10	NE-05
28/07/2016	Vaguada	1011	65	NE-05	NE-10	SO-15
12/09/2016	Onda T. activa y CC	1012	85	NE-05	SE-10	NE-20
19/10/2016	Onda T. mod activa y CC	1011	90	NE-05	NE-15	SO-05
14/06/2017	Onda Tropical y ZCIT	1011	80	NE-05	NE-15	SO-10
15/06/2017	CC asociad ZCIT	1012	85	NE-05	SE-10	SO-10
12/07/2017	Onda del Este y CC	1013	80	NE-10	NE-20	SO-10
20/07/2017	Vaguada n medios y ZCIT	1012	85	NE-10	NE-10	NO-15
22/09/2017	CC y vaguada niveles medios	1010	85	NE-10	NE-05	O-15

Fuente: propia.

Anexo.2. Muestra los mapas de variables meteorológicas con reanálisis para cada fecha y los años de 2015-2017 de los casos de estudio y a las horas cercanas a las tormentas.



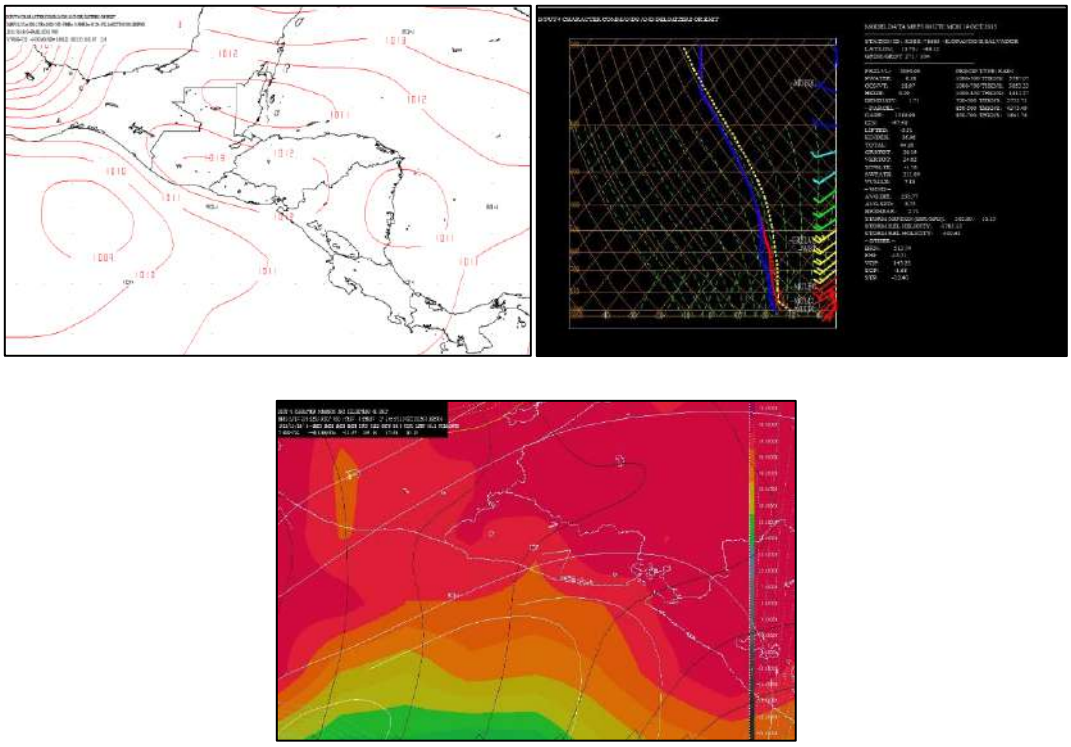


Figura 33. Muestra los mapas de variables meteorológicas que se obtuvieron de reanálisis NCEP/FNL, Operational Model Global Tropospheric Analysis, NCAR/UCAR, para cada evento. Condición atmosférica asociada a la baja presión al suroeste de Guatemala 18/10/2015.

Anexo. 3. Muestra los hospitales, escuelas y vías expuestas durante el 2015, 2016 y 2017 en un radio de 500 m.

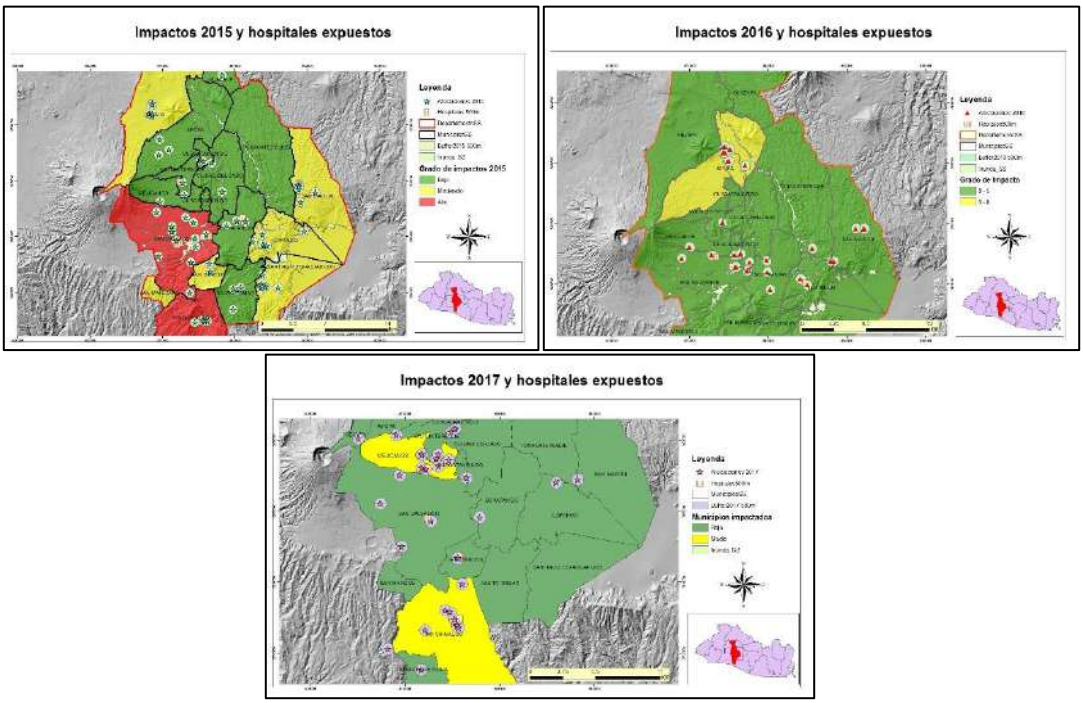


Figura 34. Muestra los hospitales expuestos durante el 2015, 2016 y 2017 en un radio de 500 m. Fuente: propia.

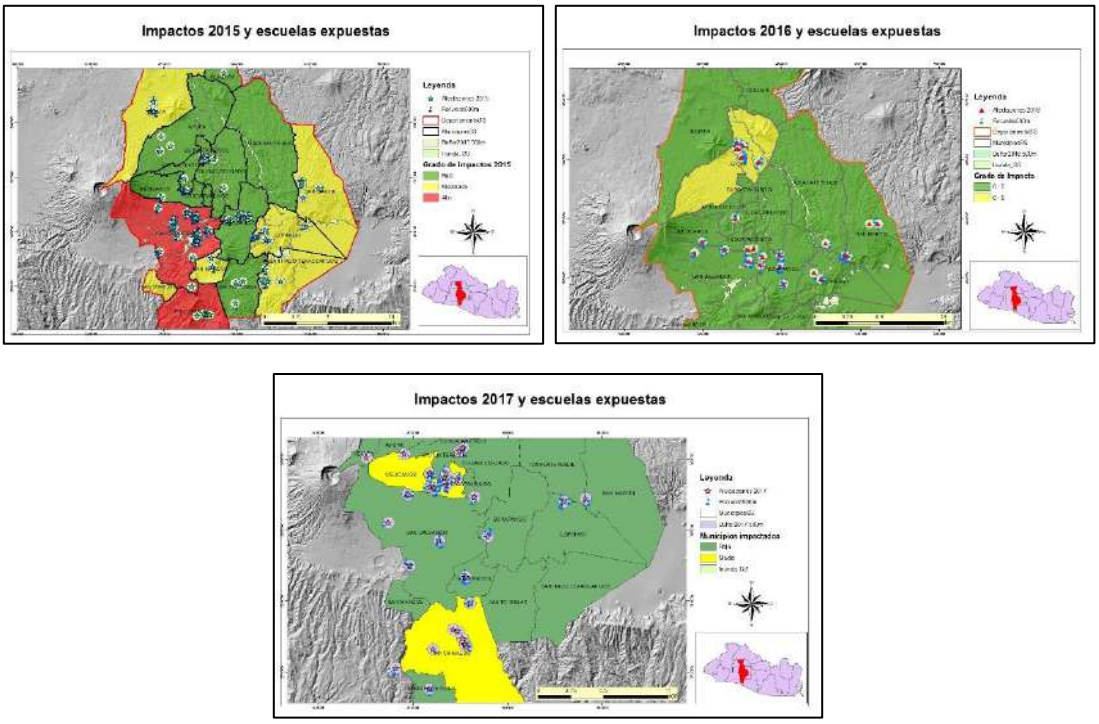


Figura 35. Muestra las escuelas expuestas durante el 2015, 2016 y 2017 en un radio de 500 m. Fuente: propia.

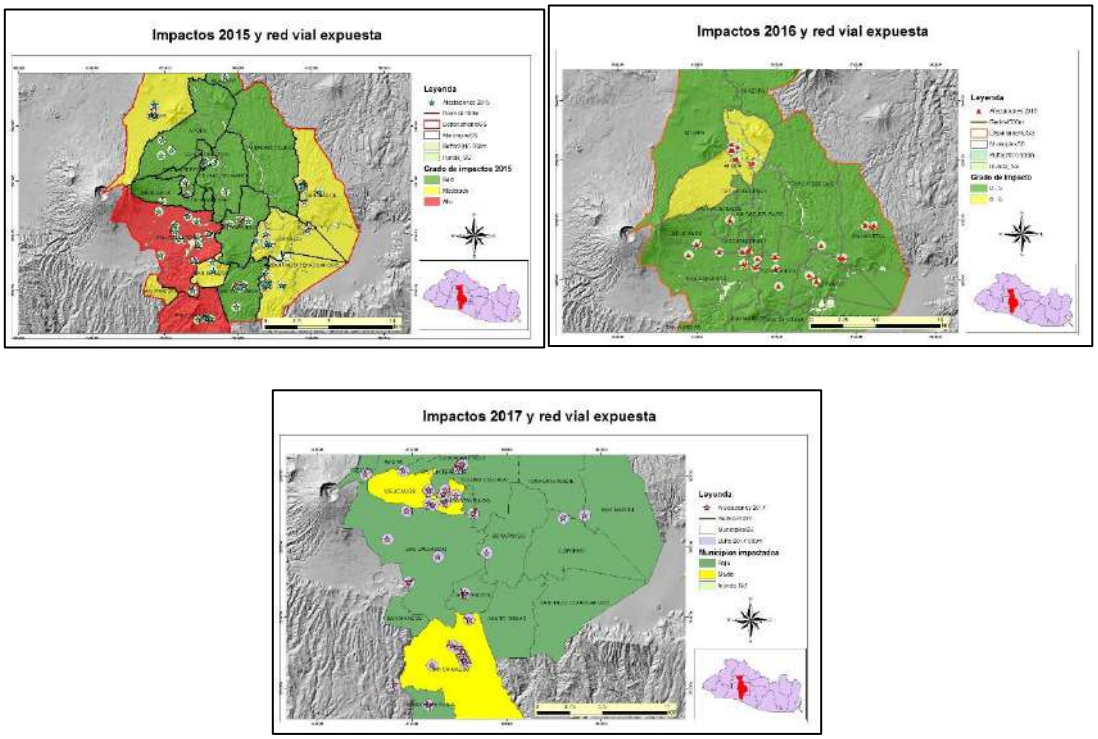


Figura 36. Muestra las vías expuestas durante el 2015, 2016 y 2017 en un radio de 500 m. Fuente: propia.