



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

ASIMILACIÓN DE DATOS DE SATÉLITE PARA LA CARACTERIZACIÓN
DE LA LLUVIA CICLÓNICA EN MÉXICO

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

PRESENTA:
SALMA ADRIANA JIMÉNEZ LÓPEZ

TUTOR
DR. ADRIÁN PEDROZO ACUÑA, INSTITUTO DE INGENIERÍA

MÉXICO, D. F., ENERO 2016

Jurado asignado:

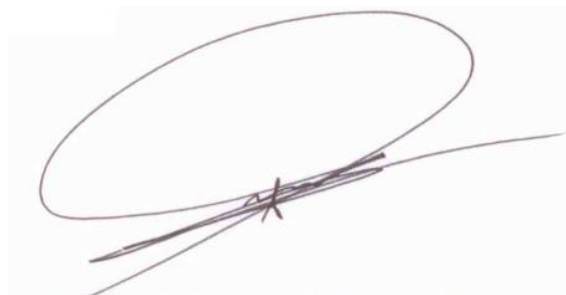
Presidente:	Dr. Óscar Arturo Fuentes Mariles
Secretario:	Dr. Ramón Domínguez Mora
Vocal:	Dr. Adrián Pedrozo Acuña
1er. Suplente:	Dr. Óscar Pozos Estrada
2do. Suplente:	Dr. José Agustín Breña Naranjo

Lugar donde se realizó la tesis:

Instituto de Ingeniería, UNAM

TUTOR DE TESIS:

Dr. Adrián Pedrozo Acuña

A handwritten signature in dark ink, featuring a large, stylized loop at the top and several horizontal strokes below it.

FIRMA

A mis padres.

A mi hermanito.

Al amor de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

En mi formación académica:

A la Universidad Nacional Autónoma de México, en donde he adquirido educación del más alto nivel, desde mi paso por la Escuela Nacional Preparatoria 2, por la Facultad de Ingeniería, y por el Posgrado de Ingeniería, sin duda el mejor privilegio.

Al Instituto de Ingeniería y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por otorgarme las oportunidades y recursos necesarios para realizar y culminar mis estudios de maestría.

Al Dr. Adrián Pedrozo Acuña, por su paciencia, consejo y guía. Su constancia y dedicación me motiva a seguir avanzando en mi camino académico y buscar mayores retos.

Al Dr. José Agustín Breña Naranjo y al Ing. Marco Rodrigo López López, quienes estuvieron envueltos en la realización de esta tesis.

A los miembros del jurado, al Dr. Carlos Agustín Escalante Sandoval, a la Dra. Lilia Reyes Chávez, a la Dra. Maritza Liliana Arganis Juárez y al Dr. Gabriel Echávez Aldape, de quienes recibí grandes enseñanzas en las asignaturas que cursé con cada uno de ellos.

En mi vida personal:

A mis padres, María del Socorro López Hernández y José de Jesús Jiménez Grimaldo, por traerme al mundo y concederme el hermoso placer de vivir. Mi infinita gratitud por el cálido hogar que me dieron, por su cariño, esfuerzo y dedicación incondicional. Su ejemplo nunca me dejará darme por vencida.

A mi hermanito, José de Jesús, por su complicidad, comprensión y afecto. ¡Sí se puede!

A Rogelio Adrián, mi alma gemela, por su apoyo, por creer en mí, por entenderme y por tomarme siempre de la mano. Para ti mi amor eterno.

A mis tíos, primos y sobrinos por compartir sus vivencias conmigo, son trocitos de felicidad y aprendizaje.

¡Gracias!

RESUMEN

Debido a la importancia del recurso hídrico, es necesario un buen entendimiento de la variabilidad espacio temporal de la precipitación. Los ciclones tropicales, a pesar de sus consecuencias adversas, también aportan un volumen significativo de agua, sobre todo en zonas áridas y semiáridas, por lo que su estudio es fundamental. Por la limitada disponibilidad de información de la red pluviométrica y su inadecuada repartición a lo largo y ancho del territorio nacional, es necesario recurrir a otras fuentes, como lo son las estimaciones satelitales de lluvia. Los datos proporcionados por la misión de la NASA conocida como TRMM, la cual monitorea la distribución y variación de la precipitación dentro de las regiones tropicales y templadas del mundo, permiten la valoración de la lluvia a escalas espacial y temporal nunca antes vistas. En primera instancia, se hizo un análisis de la actividad ciclónica en México, para un periodo de 16 años comprendido entre 1998 y 2013. Ya que los ciclones tropicales juegan un rol sustancial en la cantidad de lluvia que se precipita, se realizó una cuantificación de la contribución por estos eventos en el territorio del país, utilizando el producto pre-calibrado TMPA 3B42 de la TRMM.

Cada tipo de medición de lluvia tiene ventajas y limitaciones, por lo que es razonable combinar diferentes tipos de registros para aprovechar al máximo todas las fuentes de información existentes. Así, lecturas de pluviómetros pueden ser usadas para remover errores sistemáticos de datos menos precisos de satélites, y éstos luego pueden ser usados para calcular precipitación en áreas donde no se dispone de mediciones en tierra. En este sentido, algunos autores han establecido metodologías para complementar información pluviométrica con satelital, y obtener asimilaciones corregidas. En este trabajo se utilizó la técnica que propusieron Rozante et al. (2010), con la que se unió información satelital del producto no calibrado TMPA 3B42 RT de la TRMM con registros pluviométricos del sistema CLICOM, en la parte continental de México, para un par de eventos ciclónicos, además de que se llevaron a cabo comparativas de los 3 conjuntos de datos utilizados y el producto asimilado obtenido para cada uno.

ABSTRACT

Because of the importance of water resources, a good understanding of the spatiotemporal variability of precipitation is needed. Tropical cyclones, despite its adverse consequences, they also provide a significant volume of water, especially in arid and semiarid areas, so their study is fundamental. By the limited availability and inadequate distribution throughout the territory in México of rain gauge network information, it is necessary to use other sources, such as satellite estimates of precipitation. The data provided by the NASA mission known as TRMM, which monitor the distribution and variation of precipitation in tropical and temperate regions of the world, allow the assessment of the rain in spatial and temporal scales never seen before. At first instance an analysis was made of the cyclonic activity in Mexico, for a period of 16 years between 1998 and 2013. As tropical cyclones play a substantial role in the amount of rain which precipitates, a quantification of the contribution by these events was made in the country by using the pre-calibrated product TMPA 3B42 of TRMM.

Each type of measurement of rain has advantages and limitations, so it is reasonable to combine different types of records to take full advantage of all existing sources of information. Thus, rain gauges can be used to remove systematic errors of less accurate satellite data, and these can then be used to calculate rainfall in areas where there are no measurements on the ground. In this direction, some authors have established methodologies to complement pluviometric information with satellite data and get corrected assimilations. The technique proposed by Rozante et al. (2010), was used in this work, with which satellite information of the uncalibrated product TMPA 3B42 RT of TRMM was joined with rainfall records of CLICOM system in the continental part of México, for a couple of cyclonic events, additionally, comparisons of the 3 sets of data used and assimilated product obtained for each event were carried out.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS.....	4
ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO	5
CAPÍTULO 1. ACTIVIDAD CICLÓNICA EN MÉXICO	7
1.1. DEFINICIÓN	8
1.2. CARACTERÍSTICAS, ESTRUCTURA Y TRAYECTORIA.....	9
1.3. CICLOGÉNESIS Y TEMPORADA	11
1.4. CLASIFICACIÓN	12
1.5. EFECTOS	13
1.5.1. VIENTOS.....	13
1.5.2. MAREA DE TORMENTA	13
1.5.3. OLEAJE	14
1.5.4. PRECIPITACIÓN	15
1.5.5. BENEFICIOS.....	15
1.6. DETECCIÓN Y PRONÓSTICO	16
1.7. EVENTOS QUE IMPACTARON O GENERARON LLUVIA (1998 – 2013).....	17
CAPÍTULO 2. ESTIMACIÓN SATELITAL DE LA LLUVIA	23
2.1. PERCEPCIÓN REMOTA.....	23
2.2. SENSORES	24
2.2.1. TIPOS DE RESOLUCIÓN	26
2.3. SATÉLITES.....	28
2.3.1. ÓRBITA GEOESTACIONARIA O GEOSINCRÓNICA.....	28
2.3.2. ÓRBITAS POLAR Y HELIOSINCRÓNICA.....	29
2.3.3. ÓRBITA INCLINADA	31
2.4. BASE DE DATOS DE LLUVIA SATELITAL.....	31
2.5. TRMM	39
2.5.1. INSTRUMENTOS	39
2.5.2. TMPA.....	41

CAPÍTULO 3. CONTRIBUCIÓN DE LAS LLUVIAS POR CICLONES TROPICALES EN MÉXICO (1998 – 2013)	43
3.1. ANTECEDENTES	43
3.2. DATOS.....	45
3.3. METODOLOGÍA	45
3.3.1. INTERPOLACIÓN IDW.....	48
3.4. PRECIPITACIONES ANUALES.....	49
3.5. LLUVIAS ANUALES POR CICLONES TROPICALES.....	49
3.6. CONTRIBUCIÓN DE LAS LLUVIAS POR CICLONES TROPICALES	52
3.7. TRAYECTORIAS DE LOS 102 CT'S	62
CAPÍTULO 4. ASIMILACIÓN DE LLUVIA ESTIMADA DE SATÉLITE CON INFORMACIÓN PLUVIOMÉTRICA PARA EVENTOS CICLÓNICOS	65
4.1. ANTECEDENTES	65
4.2. DATOS.....	68
4.3. METODOLOGÍA	69
4.3.1. TÉCNICA MERGE.....	70
4.3.2. ANÁLISIS OBJETIVO DE BARNES.....	71
4.4. RESULTADOS.....	73
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES.....	77
REFERENCIAS.....	85

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA Y ELEVACIONES DE LA REPÚBLICA MEXICANA.....	7
FIGURA 1.2. IMAGEN SATELITAL DEL HURACÁN MITCH EN EL MAR CARIBE, 26 DE OCTUBRE DE 1998 (NOAA, 1998).	9
FIGURA 1.3. CONDICIONES ATMOSFÉRICAS EN LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE UN CT (JIMÉNEZ ET AL., 2013).....	9
FIGURA 1.4. VISUALIZACIÓN ESQUEMÁTICA DE LOS VIENTOS DEL HURACÁN MITCH EN EL MAR CARIBE, 26 DE OCTUBRE DE 1998 (GFDL/NOAA, 1999).....	10
FIGURA 1.5. TRAYECTORIAS PROMEDIO DE LOS CT'S EN EL MUNDO (ATLAS NACIONAL DE RIESGOS, 2015).	11
FIGURA 1.6. DAÑOS OCASIONADOS POR VIENTOS DEL HURACÁN KATRINA EN LUISIANA, E. U., 29 DE AGOSTO DE 2005 (THONMPSON, 2005).	13
FIGURA 1.7. SILOS DAÑADOS POR VIENTOS DEL HURACÁN LANE EN SINALOA, 16 DE SEPTIEMBRE DE 2006 (UEPC – SINALOA, 2006).	13
FIGURA 1.8. EFECTO DE LA MAREA DE TORMENTA EN EL INCREMENTO DEL NIVEL DEL MAR (NOAA, 2010).	14
FIGURA 1.9. INUNDACIÓN COSTERA CAUSADA POR EL HURACÁN KENNA EN PUERTO VALLARTA, 25 DE OCTUBRE DE 2002 (NPV, 2012).	14
FIGURA 1.10. FERRI BAHÍA ESPÍRITU SANTO ENCALLADO POR LA MAREA DEL HURACÁN WILMA EN QUINTANA ROO, 21 DE OCTUBRE DE 2005 (HISTAMAR, 2005).....	14
FIGURA 1.11. OLEAJE CAUSADO POR EL HURACÁN KENNA PUERTO VALLARTA, 25 DE OCTUBRE DE 2002 (NPV, 2012).	14
FIGURA 1.12. NUBOSIDAD DE LOS CT'S SIMULTÁNEOS MANUEL E INGRID SOBRE TERRITORIO MEXICANO, 15 DE SEPTIEMBRE DE 2013 (PEDROZO-ACUÑA ET AL., 2014).	15
FIGURA 1.13. EL HURACÁN ODILE BENEFICIÓ AL RIEGO LLENANDO A LA PRESA PICACHOS EN SINALOA, 22 SEPTIEMBRE DE 2014 (SIETE24, 2014).	16
FIGURA 1.14. IZQUIERDA: AVIÓN CAZA HURACANES XC-130 DE LAS FUERZAS AÉREAS DE LOS E. U.; DERECHA: FOTOGRAFÍA DEL OJO DEL HURACÁN JOHN, 23 DE AGOSTO DE 1994 (CAZAHUR, 2012).	17
FIGURA 1.15. DISTRIBUCIÓN MENSUAL DE LOS CT'S QUE GENERARON LLUVIA EN MÉXICO (1998-2013).	20

FIGURA 1.16. DISTRIBUCIÓN ANUAL DE LOS CT'S QUE GENERARON LLUVIA EN MÉXICO (1998-2013).	20
FIGURA 1.17. DISTRIBUCIÓN POR CATEGORÍA DE LOS CT'S QUE GENERARON LLUVIA EN MÉXICO (1998-2013). ..	20
FIGURA 1.18. DISCRETIZACIÓN ANUAL POR CATEGORÍA DE LOS CT'S QUE GENERARON LLUVIA EN MÉXICO (1998-2013).	21
FIGURA 2.1. ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO (ES, 2012).	25
FIGURA 2.2. ÓRBITA GEOESTACIONARIA O GEOSINCRÓNICA (OG, 2015).	29
FIGURA 2.3. ÓRBITA POLAR O HELIOSINCRÓNICA (OP, 2015).....	30
FIGURA 2.4. FRANJA DE BARRIDO DE LA ÓRBITA INCLINADA DEL SATÉLITE DE LA TRMM (NASA, 1997).	31
FIGURA 2.5. SENSORES CON LOS QUE CONTÓ EL SATÉLITE DE LA TRMM (NASA, 2015b).	39
FIGURA 2.6. DIAGRAMA DE LAS FRANJAS DE MEDICIÓN DE LOS INSTRUMENTOS DEL TRMM (NASA, 2011).....	41
FIGURA 3.1. (A) PRECIPITACIÓN MEDIA TOTAL, (B) LLUVIA PROMEDIO POR CT'S Y (C) CONTRIBUCIÓN DE LA LLUVIA POR CT'S, PARA NORTE Y CENTRO AMÉRICA Y EL CARIBE DEL PERIODO COMPRENDIDO ENTRE 1998 Y 2009, (PRAT Y NELSON, 2013A).....	44
FIGURA 3.2. ARCHIVOS DEL TMPA 3B42 DE LA TRMM PARA EL CICLÓN TROPICAL KATRINA DE 1999 Y SU TRAYECTORIA (LÍNEA EN COLOR ROSA).....	46
FIGURA 3.3. MALLA GENERADA PARA LA EXTRACCIÓN DE DATOS DE LA PORCIÓN CONTINENTAL DEL TERRITORIO MEXICANO CON RESOLUCIÓN DE 0.25°	47
FIGURA 3.4. MAPAS DE PRECIPITACIÓN ANUAL EN MM PARA MÉXICO (1998-2013).....	50
FIGURA 3.5. MAPAS DE LLUVIA ANUAL POR CT'S EN MM PARA MÉXICO (1998-2013).....	51
FIGURA 3.6. MAPAS DE LA CONTRIBUCIÓN DE LA LLUVIA ANUAL POR CT'S PARA MÉXICO (1998-2013).....	53
FIGURA 3.7. ARCHIVOS DEL TMPA 3B42 DE LA TRMM DE LOS DÍAS EN QUE LA TORMENTA TROPICAL MANUEL (TRAYECTORIA EN COLOR MORADO) Y EL HURACÁN INGRID (TRAYECTORIA EN COLOR BLANCO) ACTUARON SIMULTÁNEAMENTE EN AMBAS COSTAS DE MÉXICO EN 2013.....	54
FIGURA 3.8. FUNCIONES DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD DE LAS CONTRIBUCIONES DE LA LLUVIA POR CT'S A LAS LÁMINAS DE PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL.....	56
FIGURA 3.9. ACUMULADOS DE LA CONTRIBUCIÓN DE LA LLUVIA ANUAL POR CT'S EN MÉXICO (1998-2013).	56

FIGURA 3.10. CONTRIBUCIONES DE LA LLUVIA ANUAL POR CT'S (ARRIBA) E INTENSIDADES DE PRECIPITACIÓN CICLÓNICA MÁXIMA REGISTRADA EN 24 HORAS (ABAJO), SEPARADAS SEGÚN CATEGORÍAS (1998-2013)...	57
FIGURA 3.11. MAPA DE LA CONTRIBUCIÓN MEDIA DE LA LLUVIA POR CT'S A LA PRECIPITACIÓN TOTAL EN % PARA MÉXICO, DEL PERIODO COMPRENDIDO ENTRE 1998 Y 2013.....	59
FIGURA 3.12. LOCALIZACIÓN DE LAS 13 REGIONES HIDROLÓGICAS ADMINISTRATIVAS EN MÉXICO.....	60
FIGURA 3.13. CONTRIBUCIONES DE LA LLUVIA ANUAL POR CT'S A CADA REGIÓN HIDROLÓGICA ADMINISTRATIVA EN MÉXICO (1998-2013). ESCALA DE COLORES IGUAL A LA DE LA FIGURA 3.12.	61
FIGURA 3.14. TRAYECTORIAS DE LOS 102 CT'S QUE GENERARON LLUVIA EN TERRITORIO MEXICANO EN EL PERIODO COMPRENDIDO ENTRE 1998 Y 2013.	62
FIGURA 4.1. IMAGEN COMPARATIVA DE DATOS Y RESULTADOS DE DINKU ET AL. (2014).....	66
FIGURA 4.2. ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS CON REGISTROS PARA LOS CT'S ALEX Y KARL OCURRIDOS EN 2010....	69
FIGURA 4.3. IDENTIFICACIÓN DE CELDAS EN DONDE HAY ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS.....	70
FIGURA 4.4. SECCIÓN QUE ILUSTRAS EL DOMINIO DONDE SE APLICA EL MÉTODO Y LOS DIFERENTES ELEMENTOS UTILIZADOS EN EL ANÁLISIS OBJETIVO DE BARNES (ROZANTE ET AL., 2010).	71
FIGURA 4.5. SENSIBILIDAD DE LOS ACUMULADOS DE PRECIPITACIÓN EN MM PARA EL CT ALEX A 4 CONJUNTOS DE DATOS: A) ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS DEL CLICOM, B) TMPA 3B42 RT DE LA TRMM, C) TMPA 3B42 DE LA TRMM Y D) MERGÉ GENERADO CON LA TÉCNICA DE ROZANTE ET AL. (2010).....	74
FIGURA 4.6. SENSIBILIDAD DE LOS ACUMULADOS DE PRECIPITACIÓN EN MM PARA EL CT KARL A 4 CONJUNTOS DE DATOS: A) ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS DEL CLICOM, B) TMPA 3B42 RT DE LA TRMM, C) TMPA 3B42 DE LA TRMM Y D) MERGÉ GENERADO CON LA TÉCNICA DE ROZANTE ET AL. (2010).....	75
FIGURA 5.1. SERIES TEMPORALES DE LLUVIA MEDIA ANUAL EN MÉXICO PARA EL TMPA 3B42 DE LA TRMM (LÍNEA AZUL) Y LOS REGISTROS DE LAS ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS DEL CLICOM (LÍNEA VERDE).	77
FIGURA 5.2. DIAGRAMAS DE DISPERSIÓN PARA: A) INTENSIDADES MÁXIMAS DE PRECIPITACIÓN (IMP) DEL CLICOM VS LAS DEL 3B42RT, B) ELEVACIONES DE LAS ESTACIONES VS IMP DEL 3B42 MENOS IMP DEL CLICOM, Y C) VELOCIDADES DE VIENTOS MÁXIMOS (VVM) DE LOS CT'S VS IMP DEL 3B42.....	82

LISTA DE TABLAS

TABLA 1.1. CLASIFICACIÓN DE LOS CT'S (ROSENGAUS ET AL., 2002).....	12
TABLA 1.2. CT'S SELECCIONADOS QUE IMPACTARON Y/O GENERARON LLUVIA EN MÉXICO EN EL PERIODO COMPRENDIDO ENTRE 1998 Y 2013.	18
TABLA 2.1. BANDAS DEL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO PARA LA ESTIMACIÓN DE LA LLUVIA CON SENSORES.....	24
TABLA 2.2. ESTIMACIONES DE LLUVIA A PARTIR DE UN SOLO TIPO DE SENSOR SATELITAL (IPWG, 2015).	32
TABLA 2.3. ESTIMACIONES DE LLUVIA QUE RESULTAN DE LA COMBINACIÓN DE DIVERSOS TIPOS DE SENSORES SATELITALES (IPWG, 2015).	34
TABLA 2.4. ALGORITMOS PARA LA ESTIMACIÓN DE LLUVIA BASADOS EN SENSORES QUE MIDEN EN EL ESPECTRO VISIBLE E INFRARROJO (IPWG, 2015).....	36
TABLA 2.5. ALGORITMOS PARA LA ESTIMACIÓN DE LLUVIA BASADOS EN SENSORES QUE MIDEN EN EL ESPECTRO DE LAS MICROONDAS (IPWG, 2015).....	36
TABLA 2.6. ALGORITMOS PARA LA ESTIMACIÓN DE LLUVIA QUE COMBINAN TANTO MEDICIONES EN EL ESPECTRO VISIBLE E INFRARROJO COMO EL DE LAS MICROONDAS (IPWG, 2015).....	36
TABLA 2.7. ALGORITMOS QUE COMBINAN MÚLTIPLES ESTIMACIONES DE LLUVIA SATELITAL (IPWG, 2015).	37
TABLA 2.8. ALGORITMOS PARA LA ESTIMACIÓN DE LLUVIA QUE COMBINAN DATOS DE DIVERSOS SENSORES SATELITALES Y MEDICIONES PLUVIOMÉTRICAS (IPWG, 2015).	37
TABLA 3.1. CONTRIBUCIONES POR CATEGORÍA DE LA LLUVIA POR CT'S A LA LÁMINA DE PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL EN MÉXICO DE 1998 A 2013 EN % (MM).	55
TABLA 3.2. REGIONES HIDROLÓGICAS ADMINISTRATIVAS DE MÉXICO.	59
TABLA 4.1. INFORMACIÓN NECESARIA PARA LA TÉCNICA MERGE.....	71

INTRODUCCIÓN

Los efectos de los CT's (Ciclones Tropicales) llegan a ser catastróficos, pues provocan cuantiosas pérdidas humanas y económicas, de hecho, se ubican como la segunda causa principal de muertes relacionadas con desastres naturales (Peduzzi et al., 2012). También producen graves inundaciones costeras debido al oleaje de tormenta inducida, que han originado, sólo en los Estados Unidos, pérdidas económicas del orden de cientos de miles de millones de dólares (Michel-Kerjan, 2012). Varios estudios han señalado que, además de los fuertes vientos y altos niveles de agua, incluso acarrear lluvias torrenciales cuando tocan tierra (Gao et al., 2009; Dong et al., 2010; Nogueira y Keim, 2010). Tales cantidades de precipitación tienen el potencial de ocasionar inundaciones graves, las cuales contribuyen a un gran porcentaje de los daños registrados causados por los CT's (Larson et al. 2005; Chen et al., 2015). Sin embargo, también aportan grandes beneficios, ya que son un factor importante que contribuye a los procesos hidrológicos subterráneos (Descroix et al., 2007), a la recarga de los mantos acuíferos y almacenamiento en lagos y embalses, y por lo tanto pueden aliviar condiciones de estrés hídrico en las regiones afectadas por sequías y/o que enfrentan escasez persistente de agua (Kam et al., 2013), facilitando con ello la existencia de agua para la agricultura, la generación hidroeléctrica y el suministro de agua potable. Por ejemplo, Maxwell et al. (2012), encontraron que aproximadamente el 40 % de las sequías que tuvieron lugar en el sureste de los Estados Unidos durante la segunda mitad del siglo XX se terminaron abruptamente gracias a ellos.

Por su localización geográfica, México es una nación vulnerable a la influencia de CT's que se generan tanto en el océano Atlántico como en el Pacífico. Por lo anterior, no es sorpresa que las inundaciones sean el mayor y más costoso desastre natural en nuestro país. Esto ha sido observado recientemente durante la incidencia de los eventos tales como Manuel (2013) y Odile (2014) en la costa del Pacífico, o Alex (2010) e Ingrid (2013) en el Golfo de México, los cuales produjeron fuertes inundaciones causando considerables trastornos sociales y pérdidas económicas (Pedrozo-Acuña et al., 2014). Si bien, este tipo de eventos

también han dejado lluvias moderadas y significativas en regiones situadas en torno a la trayectoria principal de los huracanes, y por lo tanto, llevado agua a acuíferos, embalses y presas, la cuantificación y contribución de éstas a la precipitación total anual sigue siendo desconocida, por lo que esta tesis de maestría se enfoca primordialmente en proveer estas cifras. El estudio de la aportación de los CT's puede mejorar nuestra comprensión sobre las diferentes fuentes de precipitación (ciclónica, convectiva y orográfica) y el control que ejercen éstas sobre el balance hídrico, así como en la identificación de sus patrones geográficos e interanuales. Además, el conocimiento de las fuentes y destinos de la lluvia puede ser utilizada para establecer un marco modelo para determinar la sensibilidad del balance hídrico a futuros cambios en las precipitaciones.

Trabajos previos han investigado la contribución de las lluvias ciclónicas, los cuales se han beneficiado en gran medida de la llegada de la teledetección con sensores remotos basada en satélites, sobre todo de aquellos que se utilizan para monitorear las variables climáticas de la Tierra. De hecho, han mostrado el potencial para evaluar la distribución de la precipitación inducida por CT's (Lonfat et al., 2004), describir su estructura (Rodgers et al., 2001) y para detectar la contribución de éstos en los mayores eventos de lluvia registrados en el mundo (Breña-Naranjo et al., 2014). Por otra parte, los conjuntos de datos de precipitación obtenidos por satélite han aumentado la habilidad de evaluar la respuesta hidrológica de las cuencas a las lluvias ciclónicas (Villarini et al., 2011; Chen et al., 2015).

La misión satelital de observación conjunta entre la NASA (National Aeronautics and Space Administration, o Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio) de los Estados Unidos y la JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency, o Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial) de Japón, que juntas forman la NASDA (National Space Development Agency, o Agencia Nacional de Desarrollo Espacial), conocida como TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission, o Misión de Medición de Lluvias Tropicales), que monitorea la distribución y variabilidad de la precipitación en las regiones tropicales y templadas del mundo, ha demostrado la capacidad de cuantificar las tasas de lluvia a escalas espacial y temporal nunca antes vistas (Kummerow et al., 1998). Los instrumentos primarios para estimar precipitación en el satélite TRMM de esta misión fueron el PR (Precipitation Radar, o Radar de Precipitación), el TMI (TRMM Microwave Imager, o

Generador de Imágenes por Microondas de la TRMM) y el VIRS (Visible and Infrared Radiometer System, o Sistema Radiométrico Visible e Infrarrojo) (Kummerow et al., 2000). El conjunto de datos proporcionado por ésta se han utilizado para estimar la contribución de las lluvias por CT's entre los 35° S y 35° N (Yokoyama y Takayabu, 2008). Sin embargo, sus productos TMPA (TRMM Multisatellite Precipitation Analysis, o Análisis de Precipitación Multisatelital de la TRMM), 3B42 y 3B42 RT (Real Time, o en Tiempo Real) por ejemplo, proveen una cobertura cuasi global (50° S - 50° N) de mediciones de precipitación con una resolución espacial de 0.25° x 0.25° (mallado con celdas de aproximadamente 25 km) y resoluciones temporales tri-horarias y diarias (Huffman et al., 2007). El producto pre-calibrado TMPA 3B42 de la TRMM ha sido empleado anteriormente para evaluar la magnitud de las tasas y acumulados totales de lluvia ciclónica mundial y su contribución en más de seis regiones en la Tierra que son constantemente influidas por los CT's (Jiang y Zipser, 2010; Jiang et al., 2011; Prat y Nelson, 2013a). Además, las investigaciones de CT's basados en los registros del TRMM se han llevado a cabo también con diferentes propósitos, como examinar el papel de la asimetría de tormenta (Lonfat et al., 2004), extensión de área (Matyas, 2014) y convección en el núcleo interno (Chang et al., 2014).

Es sabido que la medición y estimación de la precipitación está sujeta a diversos errores debido a problemas instrumentales, naturaleza del sistema de medición, simplificaciones teóricas, relación no lineal entre la variable observada y la lluvia, entre otras razones (Nikolopoulos et al., 2010; Semire et al., 2012). Sumado a lo anterior, las evaluaciones directas e indirectas de la precipitación cubren un amplio rango de escalas, desde observaciones terrestres puntuales hasta agregaciones espaciales. Frente a los datos convencionales (pluviómetros y radares), las determinaciones con sensores satelitales proporcionan información hasta en regiones que resultan inaccesibles para los otros sistemas de observación. Cada tipo de monitoreo de lluvia tiene diferentes ventajas y limitaciones, por lo que es razonable combinar diferentes tipos de registros para aprovechar al máximo todas las fuentes de información disponibles. Así, lecturas de pluviómetros pueden ser usadas para remover errores sistemáticos de datos regionales menos precisos de sensores de radares y satélites, y éstos luego pueden ser usados para estimar precipitación en áreas donde no hay cifras en tierra disponibles (Gorenburg et al.,

2001; Collier, 2002; Mazzetti y Todini, 2004; Ebert et al., 2007). En este sentido, existen técnicas establecidas para complementar información pluviométrica con satelital, y obtener asimilaciones corregidas. Investigaciones previas donde se hace uso de datos de la TRMM para obtener productos ajustados, han mostrado buenos resultados (Huffman et al., 2007; Vila et al., 2009). Por su parte, Rozante et al. (2010), establecieron una metodología de fusionado que consiste en llenar los vacíos espaciales de las mediciones pluviométricas con información del producto no calibrado TMPA 3B42 RT de la TRMM, seguida por una interpolación de distancias ponderadas y un procedimiento de suavizado iterativo (Barnes, 1973).

Cabe resaltar que gran parte del trabajo realizado en esta tesis, fue publicado en un artículo aceptado en la revista *Physics and Chemistry of the Earth* (Breña-Naranjo et al., 2015).

Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es caracterizar a la lluvia ciclónica en territorio Mexicano en cuanto a su contribución, mediante el uso y asimilación de información satelital. Para llevar a cabo lo anterior, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Estudiar el comportamiento de la actividad ciclónica en México, para un periodo de 16 años comprendido entre 1998 y 2013, con el fin de identificar a los CT's que impactaron o generaron precipitación en el territorio del país.
- Realizar una estimación de la contribución de las lluvias con los eventos mencionados en el objetivo anterior, en términos tanto absolutos como relativos, esto es, obteniendo los valores anuales acumulados y los relacionados a la precipitación total anual respectivamente, así como identificar las zonas que presenten las mayores aportaciones, mediante el uso de un producto satelital pre-calibrado.
- Combinar información de la red de observación pluviométrica nacional y la estimada con un producto satelital no calibrado, con el propósito de obtener datos ajustados (asimilación).
- Hacer comparaciones de los diferentes conjuntos de datos de lluvia utilizados y obtenidos.

Organización del Trabajo

El trabajo está integrado por cinco capítulos, estructurados como se especifica a continuación:

Capítulo 1. Actividad Ciclónica en México.

En este capítulo se presenta la investigación que se llevó a cabo sobre la actividad ciclónica en México. Para profundizar en el conocimiento de los CT's se hace un resumen de ciertos aspectos indispensables como su definición, características, efectos, clasificación, entre otros. Así mismo, se expone el comportamiento de los 102 eventos que impactaron y/o generaron precipitación en el territorio del país en el periodo de 16 años comprendido entre 1998 y 2013.

Capítulo 2. Estimación Satelital de la Lluvia.

Aquí se define que es la percepción remota; se habla acerca de sensores, bandas espectrales que captan y sus tipos de resoluciones, así como de las plataformas en las que se montan, llamadas satélites, la clasificación de éstos y sus características según el tipo de órbita que tienen. Además se hace un resumen de la gran variedad de conjuntos de datos y algoritmos que proveen estimaciones de precipitación, haciendo especial énfasis en la TRMM.

Capítulo 3. Contribución de las Lluvias por Ciclones Tropicales en México (1998 - 2013).

Primeramente se presenta una revisión del estado del arte, a través de una serie de investigaciones previas orientadas al estudio de la contribución de los CT's, las cuales recurrieron a estimaciones satelitales de precipitación para tal propósito. Posteriormente, se describen los datos utilizados y la metodología seguida para cuantificar la lluvia asociada a los CT's. Finalmente se presentan los resultados y análisis de esta sección, que describen y caracterizan el comportamiento de la contribución por precipitación ciclónica en el territorio.

Capítulo 4. Asimilación de Lluvia Estimada de Satélite con Información Pluviométrica para Eventos Ciclónicos.

En esta sección también se hizo una revisión de antecedentes, donde se citan estudios que han establecido o usado técnicas para fusionar diferentes conjuntos de datos de información de lluvia provenientes de diversos tipos de mediciones (pluviómetros, radares y sensores satelitales). Después, se describen los datos usados y la metodología para la combinación que se aplicó a un par de eventos ciclónicos. Al final, se muestran los resultados de las asimilaciones y se hace el análisis de comparación con las diferentes bases de datos utilizadas para cada evento.

Capítulo 5. Conclusiones.

En este último apartado se resumen y discuten los principales resultados encontrados en los capítulos 3 y 4, se dan las conclusiones a las que se llegó y se sugieren algunas ideas para las futuras líneas de investigación que se desprenden de esta tesis.

CAPÍTULO 1

ACTIVIDAD CICLÓNICA EN MÉXICO

Por su ubicación geográfica y configuración del territorio (Figura 1.1), México es un país vulnerable a la influencia de CT's que se generan tanto en el océano Atlántico (llegan por costas del Golfo de México y el Mar Caribe) como en el Pacífico.

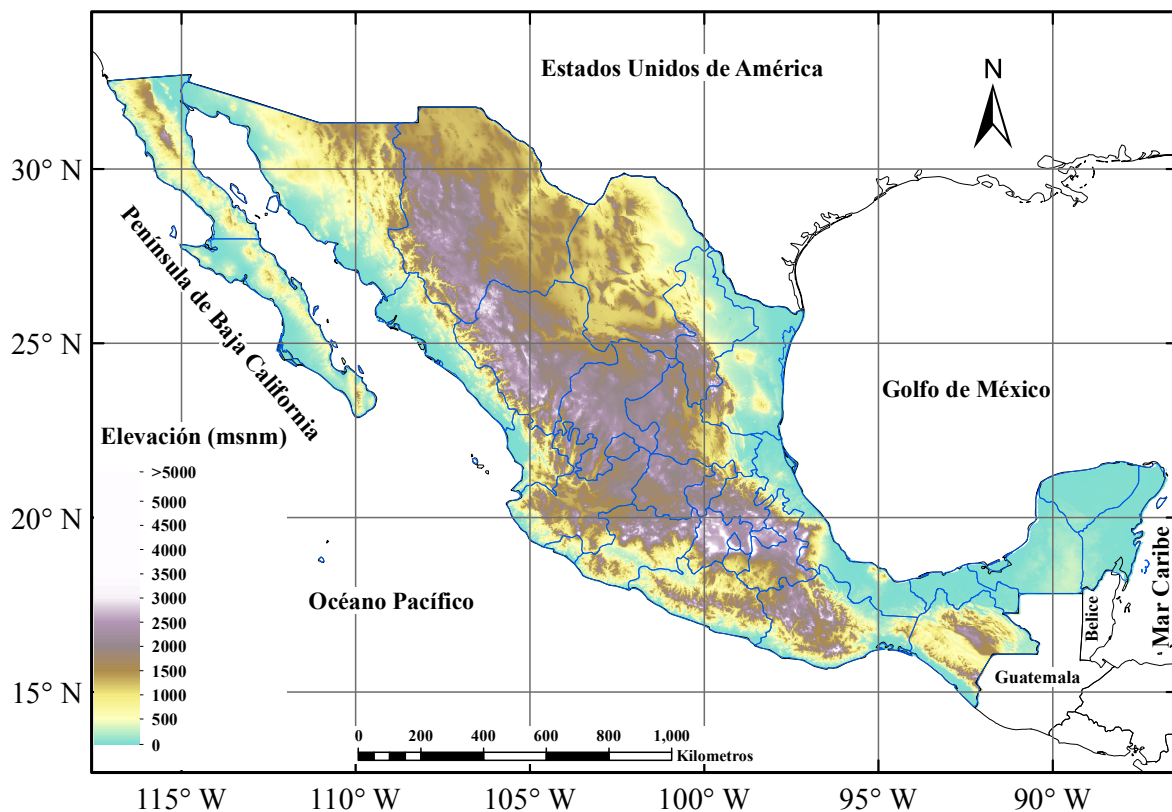


Figura 1.1. Ubicación geográfica y elevaciones de la República Mexicana.

En la Figura 1.1 se simbolizan en color blanco las elevaciones altas, mientras que en color azul se representan las bajas, estas últimas, si están cerca de la costa, son más susceptibles a los efectos de los CT's. Se puede apreciar que las planicies costeras tienen un ancho comprendido de 300 km, como en el caso de la costa del Golfo de México, que se adentra hasta el estado de Nuevo León, o inclusive de 150 km, en el estado de Sonora. En las costas de Chiapas, Oaxaca y Guerrero los anchos de planicie son menos extensos

(aproximadamente de 40 km), aunque en el límite superior de dichas planicies rápidamente se presentan elevaciones alrededor de los 2000 msnm. Por otro lado, la porción continental que incluye a la Península de Yucatán, Tabasco y el sur de Veracruz es prácticamente plana y no representa obstáculo alguno al paso de CT's. Las montañas en el sur de la Península de Baja California (más o menos entre los 500 y los 1000 msnm), no son tan altas como las del resto del país y representan obstáculos moderados al paso de los CT's. Se distingue también, que el macizo montañoso de Chiapas se encuentra claramente separado del resto de la topografía del país, creándose un corredor de baja altura en el Istmo de Tehuantepec que facilita la conexión del aire marítimo entre el Pacífico y el Golfo de México al paso de CT's (en ambos lados) que alinean sus flujos con este corredor (Rosengaus et al., 2002).

1.1. Definición

CT (Ciclón Tropical) es un término general para otras expresiones del mismo fenómeno meteorológico:

- **Huracán:** conocido así en el noroeste del Océano Atlántico, Mar Caribe, Golfo de México, en aguas de las Antillas y en el centro y este del norte del Océano Pacífico. La palabra huracán se deriva de Huraken, dios de las tormentas, adorado por los indios ribereños del Mar Caribe. Esta palabra fue adoptada por los españoles y portugueses, los anglosajones la interpretaron como **hurricane** y los franceses como **orugan**.
- **Ciclón:** llamado así en la Bahía de Bengala, el Mar Arábigo, en el Océano Índico y en el suroeste del Océano Pacífico.
- **Tifón:** nombrado así en el noroeste del Océano Pacífico, en el Mar de China, en aguas de la costa de Japón y al este de la India.
- **Wily-willy:** se refiere así en el sur del Océano Pacífico, al este de Samoa y en la costa este de Australia.
- **Baguio:** denominado así en las Filipinas.

Técnicamente todos los anteriores son CT's.

1.2. Características, Estructura y Trayectoria

Un CT es una gran masa de aire húmedo que se alimenta de energía térmica proveniente del mar en los niveles bajos de la atmósfera. Visto desde arriba (Figura 1.2), tiene un área casi circular, con un diámetro de varios cientos de km. Tiene vientos fuertes que circulan superficialmente bien definidos y organizados, que giran en forma de remolino o espiral, ya sea en sentido contrario a las manecillas del reloj en el hemisferio norte, o bien, en el sentido de las manecillas del reloj en el hemisferio sur, debido a la rotación de la Tierra y a la acción de los vientos alisios y contralisios respectivamente, alrededor de una zona central llamada ojo. Las presiones van disminuyendo hacia éste último. La energía de un CT aumenta conforme es mayor la diferencia de presiones entre su centro con respecto a la de su periferia, ésta última es del orden de 1013 mb (101.3 kPa o 788 mm de Hg). Frecuentemente se trasladan con velocidades comprendidas entre 10 y 40 km/h.



Figura 1.2. Imagen satelital del huracán Mitch en el Mar Caribe, 26 de Octubre de 1998 (NOAA, 1998).

La zona central se asemeja a un cilindro de 20 a 30 km de diámetro y una altura de alrededor de 15 km, su base está en contacto con la superficie de la Tierra y se distinguen tres capas como se observa en la parte lateral derecha de la Figura 1.3.

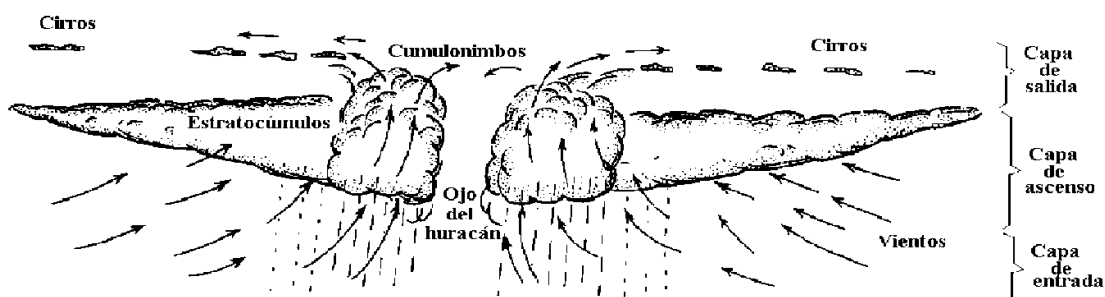


Figura 1.3. Condiciones atmosféricas en la sección transversal de un CT (Jiménez et al., 2013).

La capa de entrada es la más cercana al mar, tiene una altura del orden de 1 km. Las corrientes con gran cantidad de humedad se dirigen a través de ella hacia el centro (convergencia), las más intensas se presentan cerca de la mitad de su espesor. En la capa de ascenso, la humedad sube con vientos helicoidales, donde no presenta convergencia ni divergencia de corrientes, comienza alrededor de 1 km y termina cerca de los 6 km. La capa de salida se encuentra a partir de los 6 km de elevación. Las corrientes se mueven del centro hacia el exterior y con la altura tienden a ser radiales (zona de divergencia). La intensidad de estas corrientes es casi la mitad de las de entrada. (Figura 1.4).

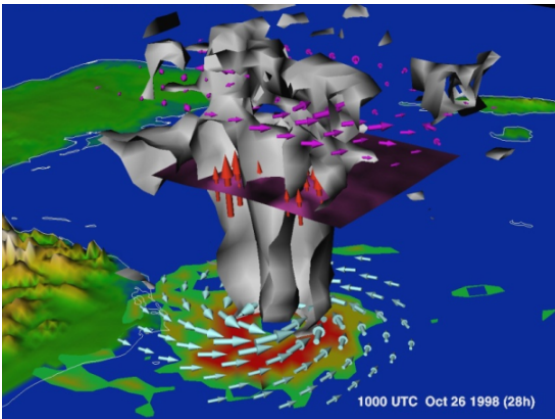


Figura 1.4. Visualización esquemática de los vientos del huracán Mitch en el Mar Caribe, 26 de Octubre de 1998 (GFDL/NOAA, 1999).

La trayectoria de un CT es debida principalmente a que está sumergido en una región de aire en movimiento de mayor tamaño, conocida como corriente conductora, que provoca la circulación de las capas de entrada y salida, así como de la convección de nubes cumulonimbos en la dirección de dicho flujo. También está influenciada por la fuerza de Coriolis.

Las trayectorias de los CT's se esquematizan generalmente por una línea continua, sin embargo, es muy común encontrar oscilaciones alrededor de lo que se considera su trayectoria media. Los patrones de trayectorias promedio de los CT's en el mundo están ilustrados en la Figura 1.5 y presentan una característica en común: la tendencia a moverse hacia el polo del hemisferio en que se encuentran.

Los CT's en el noreste del Océano Pacífico generalmente mantienen sus trayectorias sobre el mar y sólo un tercio recurva hacia tierra o pasa cerca de la costa de México (Rosendal, 1962; Jáuregui, 1987).

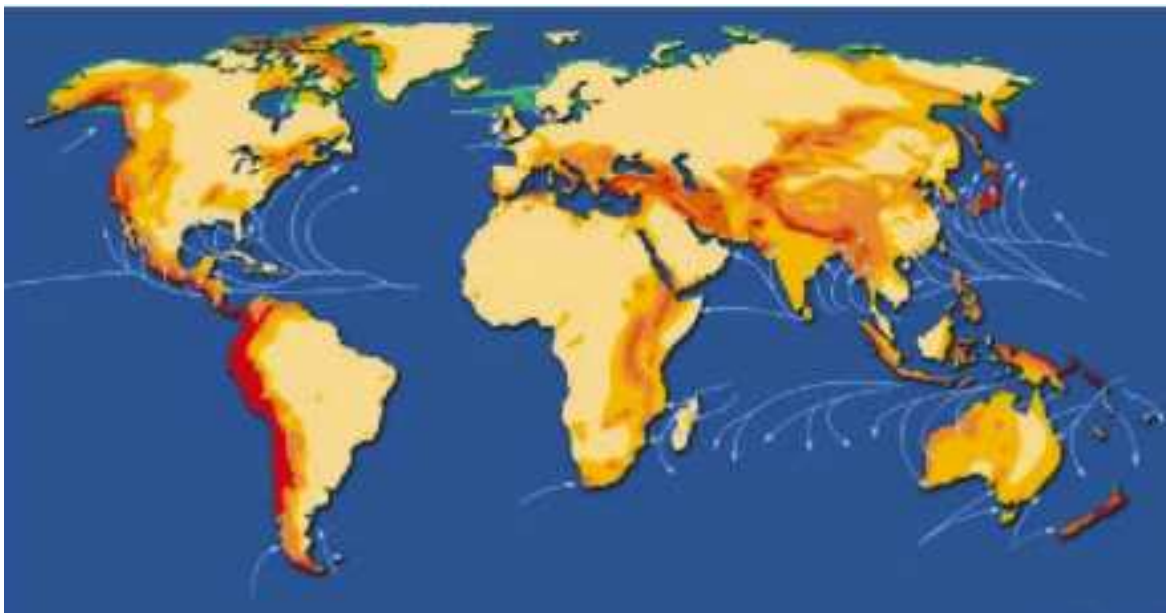


Figura 1.5. Trayectorias promedio de los CT's en el mundo (Atlas Nacional de Riesgos, 2015).

1.3. Ciclogénesis y Temporada

A las regiones donde se originan los CT's se les conoce como zonas ciclogénéticas. Como su nombre lo indica, se generan en las regiones tropicales de nuestro planeta, en aguas oceánicas cercanas al ecuador. Se forman en el mar entre las latitudes 5° a 30°, tanto en el hemisferio norte como en el sur, en la época en que la temperatura del agua es mayor o igual a 26 °C. De hecho, el Mar Caribe, así como las aguas del Océano Pacífico cercanas a la costa sur de México, mantienen temperaturas que permiten sustentar CT's durante todo el año (Rosengaus et al., 2002). Los sectores donde se generan los CT's que llegan a México, según la costa por la que provienen son:

- Océano Pacífico: Golfo de Tehuantepec.
- Océano Atlántico: Sonda de Campeche (porción sur de la costa hacia el Golfo de México), Mar Caribe (alrededor de los 13° N y 65° W) y sur de las Islas Cabo Verde (cerca de los 12° N y 57 65° W, región este del Atlántico).

La temporada de CT's en las costas hacia el Océano Atlántico inicia el 1° de junio, mientras que en la costa hacia el Océano Pacífico es el 15 de mayo. Históricamente, los meses de julio, agosto y septiembre son los que presentan un mayor número de eventos. El término de ésta es el 30 de noviembre en ambos casos.

1.4. Clasificación

La clasificación de los CT's se define de acuerdo con la velocidad de sus vientos sostenidos según la escala Saffir-Simpson, la presión mínima que existe en su centro o la marea de tormenta que inducen (Tabla 1.1).

Tabla 1.1. Clasificación de los CT's (Rosengaus et al., 2002).

Tipo de CT		Vientos Máximos (km/h)	Marea (m)	Presión (mb)
Depresión Tropical (DT)		< 63	---	1005 - 1008
Tormenta Tropical (TT)		63 - 118	< 1.2	985 - 1004
Huracán	Categoría 1 (H1)	119 - 153	1.2 - 1.5	980 - 984
	Categoría 2 (H2)	154 - 177	1.6 - 2.4	965 - 979
	Categoría 3 (H3)	178 - 209	2.5 - 3.6	945 - 964
	Categoría 4 (H4)	210 - 249	3.7 - 5.5	920 - 944
	Categoría 5 (H5)	> 249	> 5.5	< 920

El término velocidad de los vientos sostenidos se refiere a la velocidad de los vientos que se presentan sobre el borde derecho del ojo, durante 1 minuto y a 10 metros de altura sobre la superficie.

Los vientos máximos se refieren a la mayor velocidad de los vientos sostenidos, pueden alcanzar valores que son de 10 a 25 % más grandes que éstos últimos y según Rosengaus (1988), éste es el índice de intensidad más común y más adecuado para labores de protección civil.

Otros parámetros que miden la magnitud de los CT's son:

- Velocidad de traslación: es la rapidez con la que se transporta de un punto a otro en su trayectoria.
- Dirección de traslación: describe el ángulo con que se desplaza de un punto a otro en su trayectoria.

1.5. Efectos

Los efectos de los CT's se deben principalmente a cuatro aspectos: viento, oleaje, marea de tormenta y precipitación. La presencia de éstos genera consecuencias adversas, sin embargo, las lluvias que generan también poseen grandes beneficios.

1.5.1. Vientos

Los vientos son fuertes y con ráfagas que persisten por varias horas. Primero soplan en cierta dirección, luego disminuyen bruscamente cuando pasa el ojo y se reinician en forma súbita en dirección opuesta a la inicial. La energía cinética de éstos origina grandes fuerzas de arrastre sobre objetos que se encuentran en su trayecto y pueden convertirse en proyectiles. Las fuerzas mencionadas dependen del área expuesta de los cuerpos y del cuadrado de la velocidad del viento, por lo que, al intensificarse los vientos, incrementan su capacidad de destrucción (Figura 1.6). Es común encontrarse con árboles, líneas eléctricas, torres y muros derrumbados así como construcciones dañadas (Figura 1.7).



Figura 1.6. Daños ocasionados por vientos del huracán Katrina en Luisiana, E. U., 29 de agosto de 2005 (Thompson, 2005).



Figura 1.7. Silos dañados por vientos del huracán Lane en Sinaloa, 16 de septiembre de 2006 (UEPC - Sinaloa, 2006).

1.5.2. Marea de tormenta

La marea de tormenta (Figura 1.8) se refiere a la sobrelevación del agua del mar, debido a la acción de los vientos y a la baja presión atmosférica del centro del CT. Cuando a ella se le suma el ascenso de la marea ordinaria (astronómica), es aún mayor el aumento de la cota, lo que amplifica los posibles daños tales como inundaciones costeras (Figura 1.9), destrucción de infraestructura turística, así como dejar en tierra embarcaciones (Figura 1.10).

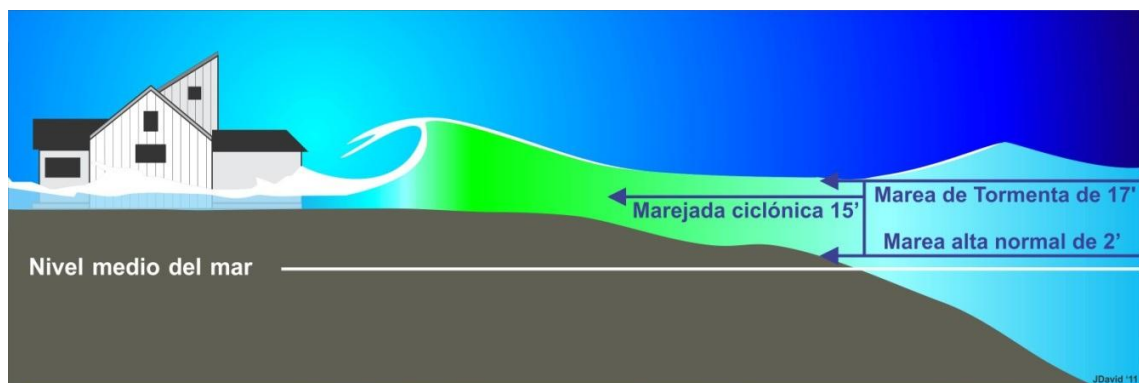


Figura 1.8. Efecto de la marea de tormenta en el incremento del nivel del mar (NOAA, 2010).



Figura 1.9. Inundación costera causada por el huracán Kenna en Puerto Vallarta, 25 de octubre de 2002 (NPV, 2012).

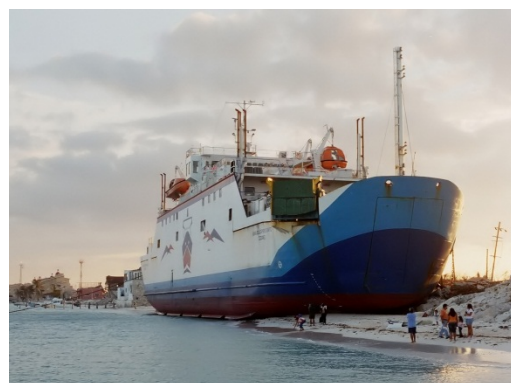


Figura 1.10. Ferri Bahía Espíritu Santo encallado por la marea del huracán Wilma en Quintana Roo, 21 de octubre de 2005 (HISTAMAR, 2005).

1.5.3. Oleaje

Los vientos transfieren energía, por medio de la fuerza de fricción, a la superficie del mar, formando así ondulaciones. Cuando son fuertes los vientos y persisten en un área amplia del mar, es mayor la energía que recibe éste y se forman olas de gran altura (Figura 1.11). En la proximidad de las costas las olas están condicionadas a la profundidad y por ello se presenta su rompiente. Lo anterior, sumado a la marea de tormenta, puede provocar

fuertes empujes sobre las estructuras y arrastrar grandes cantidades de arena.



Figura 1.11. Oleaje causado por el huracán Kenna Puerto Vallarta, 25 de octubre de 2002 (NPV, 2012).

1.5.4. Precipitación

Los CT's están acompañados por intensas precipitaciones. Éstas últimas dependen del área en planta y velocidad de desplazamiento del evento. Si éste permanece o se mueve con lentitud en la proximidad del continente o bien, después de impactarlo, la ocurrencia de núcleos de lluvia fuerte sobre un mismo lugar pueden causar desbordamiento de ríos y generar inundaciones, así como deslizamiento de laderas. Por ejemplo, en la Figura 1.12 se muestra la nubosidad debida a los CT's simultáneos Manuel e Ingrid (trayectorias en puntos azules y rojos respectivamente), los que produjeron lluvias entre el 12 y 20 de septiembre de 2013 (las estrellas representan la localización de sus centros el día 15) afectando al 77 % del territorio Mexicano.

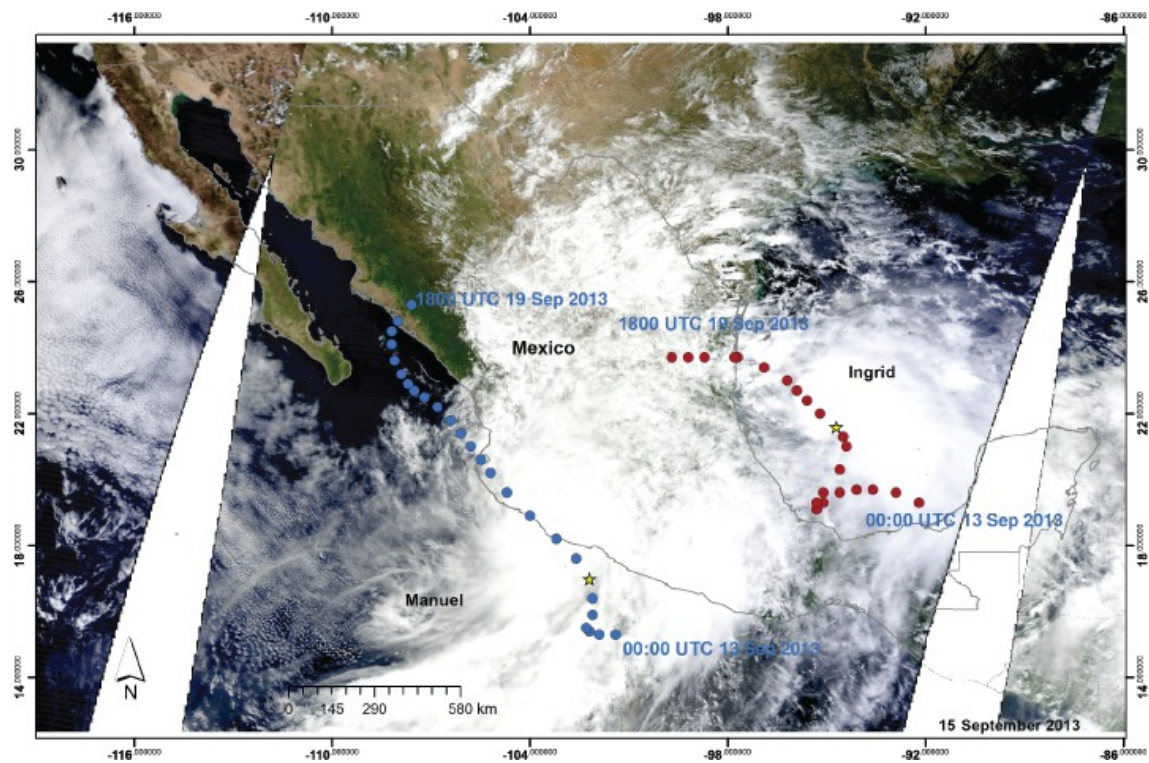


Figura 1.12. Nubosidad de los CT's simultáneos Manuel e Ingrid sobre territorio Mexicano, 15 de septiembre de 2013 (Pedrozo-Acuña et al., 2014).

1.5.5. Beneficios

A pesar de que los CT's pueden causar muchos daños, gracias a la lluvia que acarrear, también aportan un volumen importante de agua, sobre todo en zonas áridas y semiáridas del país, por lo que pueden aliviar condiciones de estrés hídrico en estas regiones, ya que es factible que los acuíferos se recarguen, además de que los lagos y presas eleven sus

niveles, facilitando con ello el suministro de agua para el consumo humano, la agricultura y la generación hidroeléctrica. Los beneficios obtenidos pueden durar varios años. Por ejemplo, el huracán Odile de 2014, ayudó a incrementar el almacenamiento de algunas presas del noreste del país, una de ellas fue la presa Picachos en Sinaloa (Figura 1.13), de modo que se mitigaron los riesgos por falta de abastecimiento de agua potable y riego. Otro ejemplo es Juliette, del 2001, que ayudó a la recarga de acuíferos tales como los de Baja California Sur y Sonora. Otros beneficios son que los ciclones tropicales pueden desalojar contaminantes de bahías y también que en ocasiones, la arena pueda ser llevada de la plataforma continental a las playas (Jiménez et al., 2013).



Figura 1.13. El huracán Odile benefició al riego llenando a la presa Picachos en Sinaloa, 22 septiembre de 2014 (Siete24, 2014).

1.6. Detección y Pronóstico

Debido a las características de los CT's, su observación se debe hacer desde un punto de vista que ofrezca la mejor perspectiva, lo que sólo desde el espacio exterior es posible. Para lograrlo, en un tiempo relativamente breve se utilizan satélites meteorológicos (de ellos se hablará en el capítulo 2). La información captada por éstos se transmite a centros de monitoreo que la estudian, procesan e interpretan para hacer pronósticos de las trayectorias y características de los CT's, con base en modelos matemáticos que son alimentados con datos tales como radiosondeos, estaciones hidroclimatológicas, boyas, radares y registros obtenidos por los aviones caza huracanes (Figura 1.14). Por la gran cantidad de variables físicas y la complejidad del fenómeno, hasta el momento no existe un modelo que pronostique con exactitud la trayectoria de un CT. Todo lo anterior se hace con el propósito de mantener informada a la población por medio de la emisión de avisos de alerta, para que actúe oportunamente y lleve a cabo las medidas preventivas.



Figura 1.14. Izquierda: Avión caza huracanes XC-130 de las Fuerzas Aéreas de los E. U.; Derecha: Fotografía del ojo del huracán John, 23 de agosto de 1994 (CazaHur, 2012).

El PCT (Programa de Ciclones Tropicales) de la OMM (Organización Meteorológica Mundial) tiene por objeto establecer centros coordinados regionales, cuya función es vigilar, predecir, detectar y seguir a todos los CT's de sus asignaciones respectivas. Los centros proporcionan a los SMN's (Servicios Meteorológicos Nacionales) la información, advertencias y orientación en tiempo real, y éstos a la vez mantienen informados a los centros de prevención y autoridades nacionales, así como a la población con el objeto de reducir al mínimo las pérdidas de vidas humanas y los daños materiales.

1.7. Eventos que Impactaron o Generaron Lluvia (1998 – 2013)

Para el periodo de 16 años comprendido entre 1998 y 2013, se seleccionaron 102 CT's para su estudio (Tabla 1.2), que son aquellos que impactaron o generaron lluvia en territorio Mexicano, de acuerdo a:

- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) y SMN (Servicio Meteorológico Nacional), según los Resúmenes (1998 - 2009) y Análisis (2010 y 2011) de las Temporadas de Ciclones Tropicales (RyATCT, 2015).
- Comité de Huracanes de la Asociación Regional IV de la OMM, según el Examen de la Temporada de Huracanes Anterior -2012- (OMM, 2013).
- INAPESCA (Instituto Nacional de Pesca) de la SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación), según el documento Temporada de Huracanes 2013 (INAPESCA, 2014).

Tabla 1.2. CT's seleccionados que impactaron y/o generaron lluvia en México en el periodo comprendido entre 1998 y 2013.

Año	Costa	Nombre	Categoría Impacto (s)	Inicio	Fin	Día Impacto	Vientos Máximos Impacto (km/h)
1998	Pacífico	Frank	TT	06-ago	09-ago	09-ago	65
	Pacífico	Isis	TT (H1)	01-sep	03-sep	02-sep	110
	Atlántico	Charley	DT	21-ago	24-ago	23-ago	37
	Atlántico	Mitch	DT (IT)	21-oct	05-nov	01-nov (3-nov)	45 (65)
1999	Pacífico	Greg	H1	05-sep	09-sep	08-sep	120
	Atlántico	DT 2	DT	02-jul	03-jul	03-jul	55
	Atlántico	Bret	DT	18-ago	25-ago	25-ago	37
	Atlántico	DT 7	DT	05-sep	08-sep	06-sep	55
	Atlántico	DT 11	DT	04-oct	06-oct	04-oct	55
Atlántico	Katrina	DT	28-oct	01-nov	31-oct	45	
2000	Pacífico	Miriam	TT	15-sep	17-sep	17-sep	65
	Pacífico	Norman	TT (DT)	19-sep	22-sep	20-sep (22-sep)	75 (55)
	Pacífico	Rosa	TT	03-nov	08-nov	08-nov	75
	Atlántico	Beryl	TT	13-ago	15-ago	15-ago	75
	Atlántico	Gordon	DT	14-sep	18-sep	14-sep	55
	Atlántico	Keith	TT (H1)	28-sep	06-oct	03-oct(05-oct)	75 (148)
2001	Pacífico	Juliette	H1 (DT)	21-sep	02-oct	29-sep (30-sep)	120 (55)
	Pacífico	Lorena	TT	01-oct	04-oct	03-oct	75
	Atlántico	Chantal	TT	15-ago	22-ago	21-ago	85
	Atlántico	Iris	DT	04-oct	09-oct	09-oct	55
2002	Pacífico	Julio	TT	25-sep	26-sep	26-sep	65
	Pacífico	Kenna	H4	21-oct	25-oct	25-oct	230
	Atlántico	Isidore	H3	14-sep	26-sep	22-sep	205
2003	Pacífico	Carlos	TT	25-jun	27-jun	27-jun	95
	Pacífico	Ignacio	H2	22-ago	27-ago	25-ago	165
	Pacífico	Marty	H2	18-sep	24-sep	22-sep	160
	Pacífico	Nora	DT	01-oct	09-oct	08-oct	45
	Pacífico	Olaf	TT	03-oct	08-oct	07-oct	100
	Atlántico	Claudette	TT (DT)	08-jul	16-jul	11-jul (16-jul)	90 (55)
	Atlántico	Erika	H1	14-ago	16-ago	16-ago	120
Atlántico	Larry	TT	01-oct	06-oct	05-oct	95	
2004	Pacífico	Javier	DT	10-sep	19-sep	19-sep	55
	Pacífico	Lester	TT	11-oct	13-oct	12-oct	75
	Pacífico	DT 16E	DT	25-oct	26-oct	26-oct	55
2005	Pacífico	Dora	TT	03-jul	06-jul	04-jul	65
	Atlántico	Bret	TT	28-jun	29-jun	29-jun	65
	Atlántico	Cindy	DT	03-jul	06-jul	04-jul	55
	Atlántico	Emily	H4 (H3)	10-jul	21-jul	18-jul (20-jul)	215 (205)
	Atlántico	Gert	TT	23-jul	25-jul	24-jul	75
	Atlántico	José	TT	22-ago	23-ago	23-ago	85
	Atlántico	Stan	TT (H1)	01-oct	05-oct	02-oct (04-oct)	75 (130)
Atlántico	Wilma	H4	15-oct	25-oct	21-oct	230	
2006	Pacífico	John	H2	28-ago	04-sep	01-sep	175
	Pacífico	Lane	H3	13-sep	17-sep	16-sep	205
	Pacífico	Norman	DT	08-oct	15-oct	15-oct	55
	Pacífico	Paul	DT	21-oct	26-oct	25-oct	45
2007	Pacífico	Bárbara	TT	29-may	02-jun	02-jun	85
	Pacífico	Henriette	H1 (H1)	30-ago	06-sep	04-sep (05-sep)	130 (120)
	Atlántico	Dean	H5 (H2)	13-ago	23-ago	21-ago (22-ago)	260 (155)
	Atlántico	Lorenzo	H1	25-sep	28-sep	28-sep	130
2008	Pacífico	DT 5E	DT	05-jul	07-jul	06-jul	55
	Pacífico	Julio	TT	23-ago	26-ago	24-ago	75
	Pacífico	Lowell	DT	06-sep	11-sep	11-sep	45
	Pacífico	Norbert	H2 (H1)	03-oct	12-oct	11-oct (11-oct)	165 (140)

	Pacífico	Odile	TT	08-oct	12-oct	11-oct	100
	Atlántico	Arthur	TT	31-may	02-jun	31-may	65
	Atlántico	Dolly	TT (TT)	20-jul	25-jul	21-jul (24-jul)	85 (65)
	Atlántico	Marco	TT	06-oct	07-oct	07-oct	65
2009	Pacífico	DT 1E	DT	18-jun	19-jun	19-jun	55
	Pacífico	Andrés	TT	21-jun	24-jun	23-jun	110
	Pacífico	Jimena	H2 (TT)	28-ago	04-sep	02-sep (03-sep)	165 (65)
	Pacífico	Olaf	DT	01-oct	03-oct	03-oct	45
	Pacífico	Patricia	DT	11-oct	14-oct	14-oct	45
	Pacífico	Rick	TT	15-oct	21-oct	21-oct	90
	Atlántico	Ida	H1	04-nov	10-nov	08-nov	150
2010	Pacífico	Agatha	TT	29-may	30-may	29-may	75
	Pacífico	DT 11E	DT	03-sep	04-sep	04-sep	55
	Pacífico	Georgette	TT (TT)	21-sep	23-sep	21-sep (22-sep)	65 (65)
	Atlántico	Alex	TT (H2)	25-jun	01-jul	27-jun (30-jun)	65 (165)
	Atlántico	DT 2	DT	07-jul	09-jul	08-jul	55
	Atlántico	Hermine	TT	05-sep	07-sep	06-sep	95
	Atlántico	Karl	TT (H3)	14-sep	18-sep	15-sep (17-sep)	100 (185)
	Atlántico	Matthew	TT	23-sep	26-sep	25-sep	55
	Atlántico	Richard	DT	20-oct	26-oct	25-oct	55
2011	Pacífico	Beatriz	H1	19-jun	21-jun	21-jun	150
	Pacífico	DT 8E	DT	31-ago		31-ago	50
	Pacífico	Jova	H2	05-oct	12-oct	12-oct	160
	Pacífico	DT 12E	DT	12-oct		12-oct	55
	Atlántico	Arlene	TT	28-jun	30-jun	30-jun	100
	Atlántico	Harvey	DT (DT)	18-ago	22-ago	21-ago (22-ago)	55 (55)
	Atlántico	Nate	TT	07-sep	11-sep	11-sep	95
	Atlántico	Rina	TT	23-oct	28-oct	27-oct	95
2012	Pacífico	Bud	TT	20-may	26-may	25-may	55
	Pacífico	Carlotta	H1	14-jun	18-jun	16-jun	150
	Pacífico	Norman	DT	28-sep	29-sep	29-sep	55
	Pacífico	Paúl	TT	13-oct	17-oct	17-oct	120
	Atlántico	Ernesto	TT (DT)	01-ago	10-ago	08-ago (09-ago)	140 (95)
	Atlántico	Helene	TT	09-ago	18-ago	18-ago	65
2013	Pacífico	Bárbara	H1	28-may	30-may	29-may	120
	Pacífico	Erick	H1	04-jul	09-jul	06-jul	130
	Pacífico	Ivo	TT	22-ago	25-ago	24-ago	74
	Pacífico	Juliette	TT	28-ago	29-ago	29-ago	100
	Pacífico	Lorena	DT	05-sep	07-sep	07-sep	60
	Pacífico	Manuel	TT (H1)	13-sep	20-sep	15-sep (19-sep)	110 (120)
	Pacífico	Octave	DT	12-oct	15-oct	14-oct	55
	Pacífico	Raymond	H2	19-oct	30-oct	21-oct	165
	Pacífico	Sonia	TT	01-nov	04-nov	04-nov	75
	Atlántico	Barry	DT (TT)	17-jun	20-jun	18-jun (20-jun)	60 (75)
	Atlántico	Fernand	TT	25-ago	26-ago	26-ago	92
	Atlántico	DT 8	DT	06-sep	07-sep	06-sep	55
	Atlántico	Ingrid	TT	12-sep	17-sep	16-sep	115
	Atlántico	Karen	TT	03-oct	06-oct	03-oct	85

56 de los 102 CT's mencionados anteriormente llegaron por la costa del Pacífico y el resto, 46, por la del Atlántico. Su distribución mensual y anual se muestra en las Figuras 1.15 y 1.16 respectivamente.

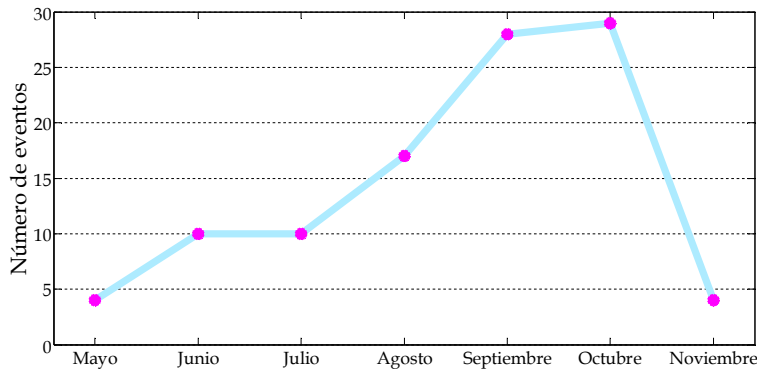


Figura 1.15. Distribución mensual de los CT's que generaron lluvia en México (1998-2013).

Se puede corroborar que la temporada de CT's en México va de mayo a noviembre (Figura 1.15), los meses de septiembre y octubre son los que tienen mayor ocurrencia de CT's, con 28 y 29 eventos respectivamente. El pico entre agosto y octubre representa al 73 % de CT's.

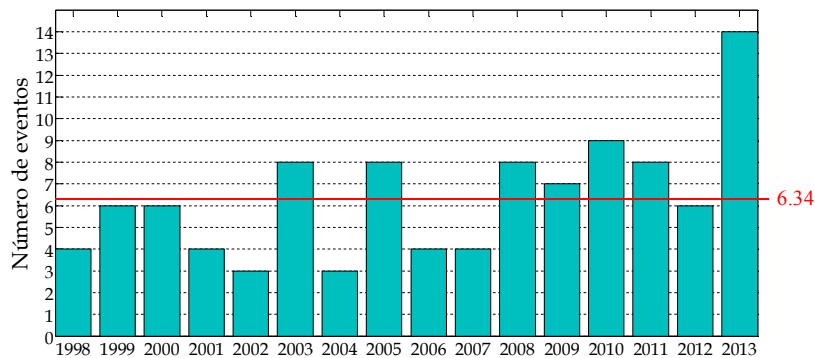


Figura 1.16. Distribución anual de los CT's que generaron lluvia en México (1998-2013).

El año con el mayor número de eventos (Figura 1.16) es 2013 con 14 CT's, seguido por 2010 con 9, mientras que los años con menor actividad fueron 2002 y 2004, ya que presentaron sólo 3 eventos cada uno. El promedio anual de CT's de este periodo es de 6.34.

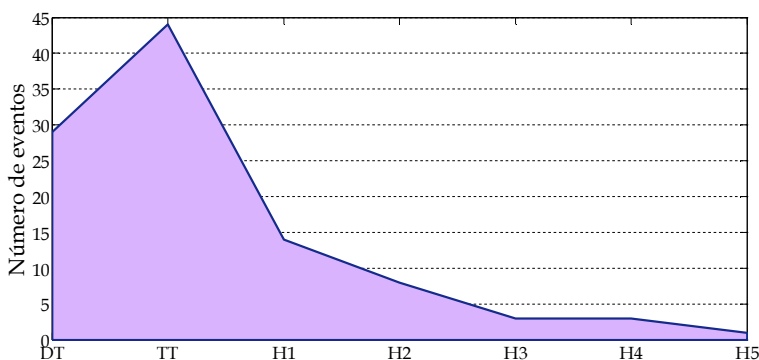


Figura 1.17. Distribución por categoría de los CT's que generaron lluvia en México (1998-2013).

En la Figura 1.17 se muestran los conteos según la categoría de impacto, en el caso de los eventos que tuvieron 2, se tomó en cuenta a la más intensa. Las TT's son las que se presentan con mayor frecuencia con 44 eventos, lo que equivale al 43 %, seguidas por las DT's con 29 eventos (28 %). A continuación se hace una discretización anual:

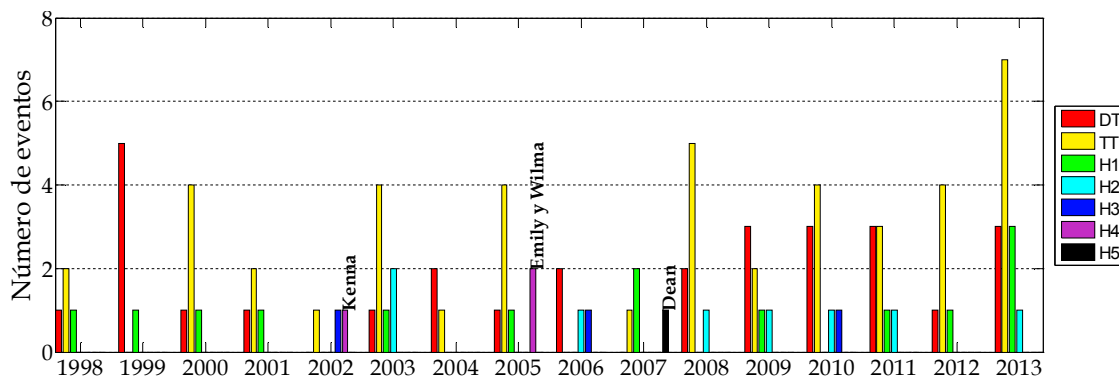


Figura 1.18. Discretización anual por categoría de los CT's que generaron lluvia en México (1998-2013).

Como se observa en la Figura 1.18, se ve que el año 2007 fue el único en el que se presentó un H5 (Dean). En 2002 y 2005 se presentaron 1 (Kenna) y 2 (Emily y Wilma) eventos de magnitud H4 respectivamente; 2013 fue el año que acumuló más TT's y el mayor número de H1, mientras que 1999 presentó el mayor número de DT's.

CAPÍTULO 2

ESTIMACIÓN SATELITAL DE LA LLUVIA

La cuantificación de la lluvia ciclónica es de gran interés para diferentes áreas de aplicación como la agricultura, la hidrología y la climatología, entre otras. La percepción remota por medio de sensores a bordo de satélites tiene un rol clave en la estimación de esta variable.

2.1. Percepción Remota

La percepción remota o teledetección es el proceso mediante el cual se obtiene información acerca de algo sin estar en contacto directo, e involucra los siguientes elementos:

1. Fuente; provee energía electromagnética al objeto de interés, según ésta existen dos tipos de teledetección:
 - Pasiva: cuando la energía suministrada es de una fuente natural.
 - Activa: cuando la radiación proporcionada es de una fuente artificial.
2. Objeto de interés; dependiendo de sus propiedades, la respuesta puede presentar uno o más de los siguientes comportamientos de la energía electromagnética recibida:
 - Dispersión.
 - Reflexión.
 - Absorción.
 - Transmisión.
3. Sensor; este instrumento se monta en una plataforma llamada satélite y detecta la respuesta emitida por el objeto de interés.
4. Transmisión, recepción y procesamiento de la información; la detección se transmite a una estación receptora, en donde los datos se procesan.
5. Usuario; utiliza la información en demandas específicas.

2.2. Sensores

Los sensores que se utilizan para estimar lluvia realizan las lecturas en diferentes bandas (Tabla 2.1) del espectro electromagnético (Figura 2.1), con diversas técnicas que han ido evolucionando desde medidas de la radiación en el espectro visible e infrarrojo (azul), en microondas pasivas (púrpura) y activas (verde), hasta metodologías que fusionan la información obtenida por las anteriores.

Tabla 2.1. Bandas del espectro electromagnético para la estimación de la lluvia con sensores.

Bandas del espectro	Símbolo	Longitudes de onda	Sensor	Satélite
Ultravioleta	UV	0.01 - 0.38 μm		
Visible	VIS	0.38 - 0.78 μm		
Infrarrojo Cercano	NIR	0.78 - 1.30 μm	SEVIRI	METEOSAT
Infrarrojo de Onda Corta	SWIR	1.30 - 3.00 μm	AVHRR	NOAA, METOP
Infrarrojo de Onda Media	MWIR	3.00 - 6.00 μm	VIRS	TRMM
Infrarrojo Térmico	TIR	6.00 - 15.0 μm		
Infrarrojo Lejano	FIR	15 μm - 1 mm		
Onda Submilimétrica	Sub-mm	100 μm - 1mm		
Microondas Pasivas	MWP	1 mm - 30 cm	SSM/I ASCAT TMI	DMSP METOP TRMM
Microondas Activas	MWA	aprox 2.17 cm	PR	TRMM

Los sensores que miden la radiación en longitudes de onda del rango visible e infrarrojo, se basan en el hecho de que los procesos de formación de lluvia implican la existencia de gotas de gran tamaño y/o de partículas de hielo en la nube, que frecuentemente se difunden hacia la cima de ésta, entonces la detección de la temperatura y el brillo se correlacionan positivamente y se pueden dar estimaciones de la presencia, ausencia, crecimiento o disminución de nubes precipitantes. Diversos autores (Dinku et al., 2009; OMM, 2011; Tapiador et al., 2012) indican que las principales limitaciones de estos sensores están referidas al tipo de nubes y condiciones atmosféricas locales, tales como:

- Variación local: sistemas multicapa de nubes pueden bloquear la vista de la lluvia subyacente, además, la relación entre la temperatura en el tope de la nube y la lluvia es altamente dependiente de la estación y el lugar.

- Efecto de lluvia cálida: regiones cerca de la costa o en zonas de montaña pueden experimentar lluvias provenientes de nubes que no llegan lo suficientemente alto en la atmósfera para registrarse como nubes frías.
- Efecto de nubes cirros: son nubes lo suficientemente arriba en la atmósfera, compuestas de cristales de hielo y que el satélite detecta como muy frías, y por tanto se asocia con presencia de lluvia aunque no la desarrollen.

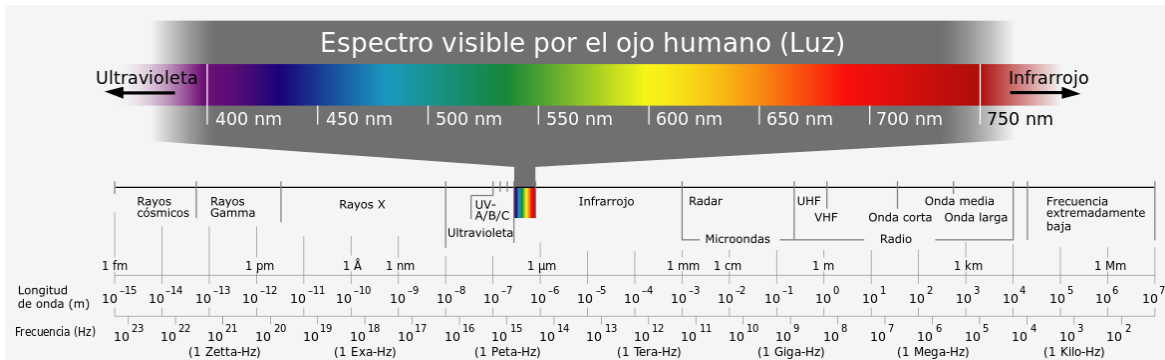


Figura 2.1. Espectro electromagnético (ES, 2012).

Los sensores que operan en la banda de las microondas están principalmente basados en detectar la emisividad y dispersión de la energía electromagnética que interactúa directamente con las nubes y la lluvia, interpretando a la radiación recibida como el contenido total de agua en la vertical y midiendo la irradiación neta térmica que emana de la parte superior de la atmósfera. La mayoría operan en frecuencias de 6-190 GHz. En superficies homogéneas y de baja emisividad, por ejemplo en los océanos, las ondas por debajo de los 20 GHz representan mejor a la lluvia, ya que presentan un coeficiente de emisión proporcional a los valores integrados verticalmente. En cambio, en la superficie de la tierra, debido a su alta y variable emisividad, es común usar frecuencias por encima de los 60 GHz, en las que se detecta a la lluvia con el mecanismo de dispersión por hielo, pero no se detecta lluvia por debajo del punto de congelación. Su principal limitación es que tienen baja resolución temporal y dificultad en la diferenciación de la señal procedente de otros tipos de superficies y coberturas con espectros similares al de la precipitación (Tapiador et al., 2012), además suele no detectar a la lluvia procedente de nubes que no contienen cantidades considerables de hielo en su región superior (OMM, 2011).

En las mediciones espaciales de la lluvia en un área, el mayor grado de exactitud se obtiene sobre los océanos tropicales, donde el método de combinación de bandas del espectro infrarrojo es tan eficaz como las técnicas de microondas para lluvia en períodos largos (del orden de varios meses). Sin embargo, en los fenómenos por separado los errores pueden ser grandes, ya que la lluvia cálida es un fenómeno común en algunas zonas del trópico. Las técnicas de microondas ganan en eficacia a medida que se avanza hacia latitudes superiores, donde la lluvia convectiva es menos frecuente. Es posible conseguir un grado de exactitud un poco menor mediante técnicas de infrarrojos para lluvias convectivas sobre la superficie de la tierra, debido a la gran diversidad dinámica y microfísica de los sistemas lluvia-nube. Ello da lugar a una mayor variabilidad entre la lluvia y las propiedades en las regiones superiores de las nubes. El grado de acierto de las técnicas de microondas es también menor sobre la superficie de la tierra, ya que su emisividad reduce considerablemente la utilidad de las frecuencias inferiores a 35 GHz.

En la actualidad, para beneficiarse de las fortalezas de los diferentes tipos de sensores, y minimizar los impactos de sus limitaciones, se usan metodologías que combinan la mejor lluvia identificada por sensores de microondas con la mayor frecuencia espacio temporal de sensores de imágenes visibles e infrarrojas (Sorooshian et al., 2002; Dinku et al., 2009; Kidd y Levizzani, 2011), logrando mayor grado de exactitud. Mejoras en la detección implican mayores estudios para aportar nuevas ideas a los algoritmos de estimación de lluvia. Al respecto, Levizzani (2008), indica que se deben explorar las características de la nube en cuanto a su radiación, microfísica y dinámica, principalmente en el contenido de hielo y su estructura vertical. Por otro lado, Sorooshian et al. (2011), indican que para detectar de forma confiable los eventos extremos deben considerarse observaciones adicionales como por ejemplo: rayos y cobertura de nubes.

2.2.1. Tipos de resolución

Son cuatro tipos de resolución que caracterizan a los sensores, a continuación se da una breve descripción de cada uno:

- Espectral: Describe la capacidad del sensor para detectar pequeños intervalos de longitudes de onda. En general se refieren al número, espaciamiento y ancho de las

bandas que el sensor es capaz de captar y diferenciar. Cuanto más estrechas sean estas bandas, mayor será la resolución y más completa y precisa serán muestreadas las firmas espectrales y, por lo tanto, se podrá encontrar, clasificar y caracterizar más fácilmente el objeto de interés.

- Espacial: Es el nivel de detalle del campo instantáneo de vista del sensor. Descrita usualmente en términos de la unidad de área más pequeña detectada, llamada resolución de la celda, que puede ser distinguida y grabada en un pixel. Un pixel es la unidad más pequeña de una imagen, y un arreglo matricial de ellos genera una imagen bidimensional. Entre más alta sea esta resolución, la detección de un área menor será más detallada, y la observación del objeto de interés determinará las características geométricas, ubicación, tamaño, forma, etc., con más facilidad.

- Temporal: Es una medida de la frecuencia (intervalo de revisita) con la que un sensor es capaz de obtener información de un punto o área específica, dependiendo de la órbita del satélite en el que estén (se habla de satélites y sus órbitas en la siguiente sección). Unos tienen resoluciones de 7 a 16 días; otros, gracias a que poseen sensores que pueden orientarse a diferentes ángulos y observar diferentes enfoques, permiten lograr períodos mucho más cortos, incluso de 2 o 3 días; algunos poseen espacios de 12 horas, lo cual permite una cobertura diaria global diurna y una nocturna; y hay los que pueden proveer información cada 30 minutos. Mientras menor sea el lapso transcurrido, mayor será la resolución. Altas resoluciones de este tipo son importantes en el monitoreo de eventos que cambian en períodos relativamente cortos, como inundaciones.

- Radiométrica: Hace referencia al número de niveles digitales utilizados para representar la información recibida por el sensor. La radiancia asociada a un pixel es traducida a un valor numérico entero, denominado nivel digital, y simbolizado como

una intensidad visual. El conjunto de niveles digitales genera una escala de grises, y su número se expresa en términos del tamaño del byte (arreglo de bits) necesario para almacenar el valor del nivel de gris máximo. Un bit es la unidad fundamental de un sistema binario, que posee sólo los dígitos 0 y 1; usando un arreglo de bits se puede convertir un número cualquiera. Los valores que pueden ser interpretados en una base binaria son de la forma 2^n , donde n es el tamaño del byte; por ejemplo, para 5 bits tendremos 32 valores, para 8 bits 256 valores, para 11 bits 2048, etc. Cuanto más grande sea el número de niveles digitales, mayor será este tipo de resolución, y estarán mejor representados los detalles del objeto de interés.

2.3. Satélites

Los satélites se han convertido en una de las herramientas más prácticas que ha producido la tecnología espacial, y que, entre otras aplicaciones, dan una visión global del tiempo atmosférico, lo que proporciona datos actualizados de las condiciones meteorológicas, y éstos se pueden utilizar para predicciones de algunas variables climáticas e investigación.

Se considera al TIROS (Television Infrared Observation Satellite, u Observación Satelital de Televisión Infrarroja) 1 el primer satélite meteorológico, lanzado el 1° de abril de 1960 por la NASA.

La clasificación de los satélites está dada según su órbita, o sea, la trayectoria que sigue alrededor de la Tierra. Estas órbitas se definen de acuerdo con la capacidad y el propósito del satélite y pueden variar en términos de la altura, orientación y rotación relativas a la Tierra. El tiempo que tarda el satélite en recorrer una vez la órbita, se denomina período orbital.

2.3.1. Órbita geoestacionaria o geosincrónica

Los satélites de órbita geoestacionaria (Figura 2.2) giran en torno a la Tierra cerca o sobre el plano del Ecuador, siguiendo a ésta en su movimiento de rotación, por lo que siempre se encuentran observando una misma área sobre la superficie terrestre. También se les llama de órbita geosincrónica cuando la inclinación orbital es de 0° con respecto al plano ecuatorial.

Sus características principales son:

- Orbitan a 36,000 km de altura.
- Periodo orbital de 24 horas.
- Cobertura de un área fija.
- Resolución temporal alta: actualizaciones cada 15 ó 30 minutos.
- Velocidad de giro aproximada de 100 rpm.



Figura 2.2. Órbita geostacionaria o geosincrónica (OG, 2015).

Algunos de los satélites meteorológicos que se encuentran observando nuestro planeta en este tipo de órbita son:

- GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite, o Satélite Geoestacionario Operacional Ambiental), lanzados por Estados Unidos y administrados por la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, o Administración Nacional Oceánica y Atmosférica).
- METEOSAT (Meteorological Satellite, o Satélite Meteorológico), lanzados por la Unión Europea y administrados por la EUMETSAT (European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites, u Organización Europea para la Explotación de Satélites Meteorológicos).
- MTSAT (Multifunctional Transport Satellites, o Satélites de Transporte Multifuncionales) son propiedad de Japón y administrados por la JMA (Japan Meteorological Agency, o Agencia Meteorológica Japonesa).
- FY-1 (Feng Yun, o Vientos y Nubes), son propiedad de China y administrados por la CMA (China Meteorological Administration, o Administración Meteorológica China).
- INSAT (Indian National Satellite System, o Sistema Nacional de Satélites de la India), lanzados por India y administrados por la ICC (INSAT Coordination Committee, o Comité de Coordinación del INSAT).

2.3.2. Órbitas polar y heliosincrónica

Los satélites de órbita polar (Figura 2.3) giran en torno a la Tierra de polo a polo, en dirección norte a sur y viceversa, generalmente una pasada es durante el día y la otra en la

noche. También los hay de órbita heliosincrónica cuando están sincronizados con el Sol, lo que significa que hacen sus observaciones bajo las mismas condiciones generales de luz.

Los satélites de este tipo permiten observar los fenómenos atmosféricos situados en zonas geográficas de altas latitudes, por encima de los 60°, a diferencia de los satélites geoestacionarios, debido a la esfericidad de la Tierra. Cada vez que completan una vuelta, la Tierra ha rotado 25° de longitud, por lo que monitorizan una franja diferente en cada órbita.

Sus características más importantes son:

- Orbitan de 700 a 900 km de altura.
- Periodo orbital aproximado de 100 minutos.
- Resolución espacial alta.
- Resolución temporal baja: 1 o 2 actualizaciones por día.
- Orbitan sin rotar sobre un eje.



Figura 2.3. Órbita polar o heliosincrónica (OP, 2015).

Algunos de los satélites meteorológicos que se encuentran observando nuestro planeta en este tipo de órbita son:

- NOAA, lanzados por Estados Unidos y administrados por la NOAA.
- DMSP (Defense Meteorological Satellite Program, o Programa de Satélites Meteorológicos de Defensa), lanzados por Estados Unidos y administrados por el AFSPC (Air Force Space Command, o Mando Espacial de la Fuerza Aérea).
- METEOR (Meteorological Satellite, o Satélite Meteorológico), lanzado por Rusia y administrado por ROHYDROMET (Russian Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring, o Servicio Federal Ruso para la Hidrometeorología y Monitoreo Ambiental).
- METOP (Meteorological Operational Satellite Program, o Programa Satelital Meteorológico Operacional), lanzados por la Unión Europea y administrados por EUMETSAT.

2.3.3. Órbita inclinada

Existen además satélites que no tienen órbitas de las antes mencionadas, en estos casos la trayectoria ha sido modificada para satisfacer requerimientos específicos. Las órbitas inclinadas tienen ángulos diferentes a los 0 o 90 grados según la región de interés, suelen tener alturas de unos cientos de km y periodos orbitales de pocas horas.

Un ejemplo de este tipo fue la del satélite de la TRMM (Figura 2.4), que formaba un ángulo de 35° sobre y debajo de la línea del Ecuador, estaba posicionada a 402.5 km por encima de la superficie terrestre y tenía un periodo orbital de 92.4 minutos, con el fin de mejorar la frecuencia de muestreo de la lluvia tropical.

El swath o franja de barrido es el área muestreada por el sensor conforme un satélite recorre su órbita (Figura 2.4).

En el EOPORTAL (Earth Observational Portal, o Portal Observacional Terrestre) de la ESA (European Space Agency, o Agencia Espacial Europea) se puede encontrar una base de datos sobre el pasado, presente y futuro de todos los tipos de misiones satelitales y sus sensores, en una amplia lista que se actualiza constantemente con los últimos detalles (EOPORTAL, 2015).

2.4. Base de Datos de Lluvia Satelital

En el 2001 se crea el IPWG (International Precipitation Working Group, o Grupo de Trabajo para la Precipitación Internacional), que proporciona un foro para el intercambio de información sobre mediciones de lluvia satelital y su repercusión en la predicción numérica del clima y estudios hidrometeorológicos (IPWG, 2015).

Actualmente existe una gran variedad de conjuntos de datos y algoritmos que proveen estimaciones de precipitación satelital, algunos se resumen en las siguientes tablas:

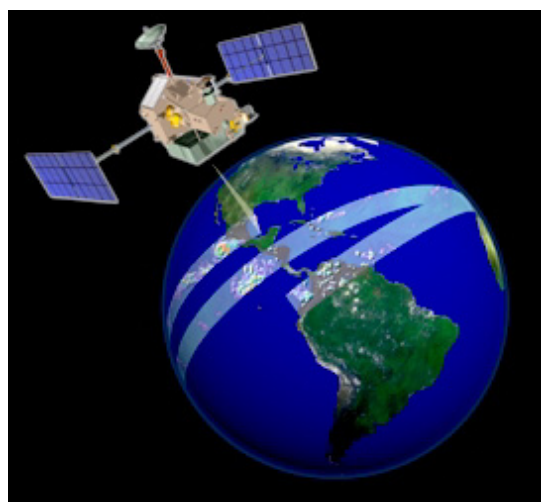


Figura 2.4. Franja de barrido de la órbita inclinada del satélite de la TRMM (NASA, 1997).

Tabla 2.2. Estimaciones de lluvia a partir de un solo tipo de sensor satelital (IPWG, 2015).

Algoritmo	Datos de entrada	Escalas espacial/temporal	Cobertura/ Fecha de inicio	Actualizaciones	Latencia	Creadores
AMP-4	AMSU-A/B, AMSU/MHS	Nivel 2 (swath,pixel)/orbital	Global/ 2002	Orbital (~100 min)	4 horas	MIT y Prince of Songkla Univ. (Surussavadee y Staelin)
AMP-5	AMSU-A/B, AMSU/MHS	Nivel 2 (swath,pixel)/orbital	Global/ 2002	Orbital (~100 min)	4 horas	MIT y Prince of Songkla Univ. (Surussavadee y Staelin)
GPI	GEO-IR, LEO-IR en vacíos de GEO	2.5°/ mensual	Global, 40°N-S/ 1986 a Feb. 2004	Mensual	1 semana	NOAA/NWS CPC (Xie)
	GEO-IR, LEO-IR	2.5°/ 5 días	Global, 40°N-S/ 1986 a Nov. 2004	5 días	1 semana	NOAA/NWS CPC (Xie)
GPROF 2004	GEO-IR, LEO-IR	1°/ diaria	Global, 40°N-S/ Oct. 1996	Mensual	1 semana	NOAA/NWS CPC (Xie)
	AMSR-E	0.5°/ orbital	Global, 70°N-S/ Jun. 2002 a Oct. 2011	Diaria	1 día	NSIDC (Kummerow)
GPROF 2010	AMSR-E	0.25°/diaria (asc. y desc.); 0.25°/mensual	Global, 70°N-S/ Jun. 2002 a Oct. 2011	Diaria; mensual	1 día; 1 mes	Colorado State Univ. (Kummerow)
	SSM/I	0.25°/diaria (asc. y desc.); 0.25°/mensual	Global, 70°N-S/ Jul. 1987 a Nov. 2009	Diaria; mensual	1 día; 1 mes	Colorado State Univ. (Kummerow)
		Nivel 2 (swath,pixel)/orbital	Global, 70°N-S/ Jul. 1987 a Nov. 2009	Diaria; mensual	1 día; 1 mes	Colorado State Univ. (Kummerow)
	SSMIS	0.25°/diaria (asc. y desc.); 0.25°/mensual	Global, 70°N-S/ Oct. 2003	Diaria; mensual	1 día; 1 mes	Colorado State Univ. (Kummerow)
GPROF 2010 (3G68)	TMI	0.25°/diaria (asc. y desc.); 0.25°/mensual	Global, 40°N-S/ Dic. 1997	Diaria; mensual	1 día; 1 mes	Colorado State Univ. (Kummerow)
	TMI	0.5°/horaria; 0.1°/horaria	Global, 40°N-S/ Dic. 1997	Diaria	4 días	NASA/GSFC PPS (Kummerow)

HOAPS 3.2	SSM/I	Swath; 0.5°/ 6 horas, mensual	Oceanos, 80°N-S/ 1987 a 2008	No rutinario	No rutinario	HOAPS/DWD EUMETSAT CM-SAF, Univ. of Hamburg, MPI (Andersson, Fennig, Klepp)
Hydro Estimator	GEO-IR	4 km/15 min (instantanea), 7 días (acumulación)	Global, 65°N-S/ Ene. 2007	15 min	20 min	NOAA/NESDIS/STAR (Kuligowski)
METH	SSM/I, SSMIS	2.5°/ mensual	Oceanos, 60°N-S/ Jul. 1987 a 2010	Mensual	1 mes	George Mason Univ. (Chiu)
METH (3A11)	TMI	5°/ mensual	Oceanos, 40°N-S/ Ene. 1998	Mensual	1 semana	NASA/GSFC PPS (Chiu)
MiRS	AMSU/MHS, SSMIS	Swath	Global/ Ago. 2007	Orbital, diaria	4 horas	NOAA OSDPD (Boukabara)
NESDIS/ FNMOC Scattering index	SSM/I	1°/mensual; 2.5°/5 días, mensual	Global/ Jul. 1987 a Nov. 2009	Diaria	1 a 2 horas	NESDIS/STAR (Ferraro)
NESDIS High Frequency	AMSU/MHS	0.25°/diaria; 1°/5 días, mensual; 2.5°/5 días, mensual	Global/ 2000	Diaria	1 semana	NESDIS/STAR (Weng y Ferraro)
OPI	AVHRR	2.5°/ diaria	Global/ 1979	Diaria	1 día	NOAA/NWS CPC (Xie)
PR OBS 1 V.1.7	SSMIS (y campos de ECMWF)	Swath	Europa/ Mar. 2008	Orbital	2.5 horas	H SAF (Casella, Sand, Panegrossi, Dietrich)
PR OBS 2 V.2.4	AMSU/MHS	Swath	Europa/ Ene. 2009	Orbital	20 min	H SAF (Casella, Sand, Panegrossi, Dietrich)
RSS	TMI, AMSR-E, SSM/I, SSMIS, Windsat	0.25°/ 1, 3, 7 días, mensual	Oceanos/ Jul. 1987	1, 3, 7 días, mensual	6 a 12 horas, 1 día, 1 semana	RSS (Wentz y Hilburn)
TAMSAT	METEOSAT TIR	0.0375°/ 10 días, mensual, estacional	Africa/ Ene. 1983	10 diarias	1 a 2 días	Univ. Reading, Met. Dept., TAMSAT Res. Group (Tarnavsky)
TRMM PR (3G68)	PR	0.5°/ horaria	Global, 37°N-S/ Dic. 1997	Diaria	4 días	NASA/GSFC PPS (Iguchi)

Tabla 2.3. Estimaciones de lluvia que resultan de la combinación de diversos tipos de sensores satelitales (IPWG, 2015).

Algoritmo	Datos de entrada	Escalas espacial/ temporal	Cobertura/ Fecha de inicio	Actuali- zaciones	Latencia	Creadores
AIRS AIRG2SSD	AIRS, AMSU, HSB-SR	Nivel 2G swath/ segmentos de órbita	Global/ Sep. 2002	Diaria	1 día	NASA/GSFC GES DISC (Susskind)
AIRS AIRX3STD, AIRX3ST8, AIRX3STM	AIRS, AMSU, HSB-SR	1°/diaria; 1°/8 días; 1°/mensual	Global/ Sep. 2002	Diaria, 8 días, mensual	1 día	NASA/GSFC GES DISC (Susskind)
CMORPH	TMI, AMSR-E, SSM/I, SSMIS, AMSU, MHS, vectores IR	8 km/ 30 min	50°N-S/ 1998	Diaria	18 horas	NOAA/CPC (Xie)
CMORPH V.1.0 RAW	TMI, AMSR-E, SSM/I, SSMIS, AMSU, MHS, vectores IR	0.25°/ 3 horas	50°N-S/ 1998	Diaria	18 horas	NOAA/CPC (Xie)
GSMaP NRT	TMI, AMSR-E, SSM/I, SSMIS, AMSU, vectores IR	0.1°/ horaria	60°N-S/ Oct. 2007	1 hora	4 horas	JAXA (Kachi y Kubota)
GSMaP MWR	TMI, AMSR-E, AMSR, SSM/I, vectores IR	0.25°/ horaria, diaria, mensual	60°N-S/ 1998 a 2006	1 hora	4 horas	JAXA (Aonashi y Kubota)
GSMaP MVK	TMI, AMSR-E, AMSR, SSM/I, SSMIS, AMSU, vectores IR	0.1°/ horaria	60°N-S/ 2000 (datos disponibles 2003 a 2008)	Mensual	4 horas	JAXA (Ushio)
GSMaP MVK+	TMI, AMSR-E, AMSR, SSM/I, AMSU, vectores IR	0.1°/ horaria	60°N-S/ 2003 a 2006	1 hora	4 horas	JAXA (Ushio)

MPE	METEOSAT 7, 8, 9, 10 IR y SSM/I, SSMIS	MFG: pixeles originales/ 30 min	Océano Índico, 8°W-122°E, 65°N-S	30 min	10 min	EUMETSAT
	METEOSAT 7, 8, 9, 10 IR y SSM/I, SSMIS	MSG: pixeles originales/ 15 min	Europa y Africa, 79°W-E, 8165°N-S	15 min	10 min	EUMETSAT
NRL Real Time	SSM/I, F16/SSMIS, cal. IR (Met. Coinc. Prob)	0.25°/ horaria	40°N-S/ Jul. 2000	Horaria	3 horas	NRL Monterey
PERSIANN	TMI, AMSR-E, SSM/I, SSMIS, AMSU, MHS, cal. IR	0.25°/ 30 min	60°N-S/ Mar. 2000	Horaria	1 día	UC Irvine (Hsu)
PERSIANN CCS	Grid Geo-IR	0.04°/ 30 min	60°N-S/ 2003	Horaria	1 hora	UC Irvine (Hsu)
PR OBS 3	SSMIS, AMSU/MHS, MSG-IR	5 km/ 15 min	Europa/ Ene. 2009	15 min	15 min	HSAF (Melfi y Cattani)
PR OBS 4	SSMIS, AMSU/MHS, MSG-IR	8 km/ 30 min	Europa/ Nov. 2011	1 hora	3 horas	HSAF (Melfi y Laviola)
TCI (3G68)	PR, TMI	0.5°/ horaria	Global, 37°N-S/ Dic. 1997	Diaria	4 días	NASA/GSFC PPS (Haddad)
TOVS	HIRS, MSU-SR	1°/ diaria	Global/ 1979 a Abr. 2005	Diaria	1 mes	NASA/GSFC 610 (Suskind)
TRMM RT HQ V.7 (3B40 RT)	TMI, SSM/I, SSMIS, AMSR-E, AMSU, MHS	0.25°/ 3 horas	Global, 70°N-S/ Mar. 2000	3 horas	9 horas	NASA/GSFC PPS (Huffman y Adler)
TRMM RT VAR V.7 (3B41 RT)	MW-VAR (IR)	0.25°/ horaria	Global, 50°N-S/ Mar. 2000	1 hora	9 horas	NASA/GSFC PPS (Huffman y Adler)
TRMM RT HQ VAR V.7 (3B42 RT)	TMI PR HQ MW-VAR (IR)	0.25°/ 3 horas	Global, 50°N-S/ Mar. 2000	3 horas	9 horas	NASA/GSFC PPS (Huffman y Adler)

Tabla 2.4. Algoritmos para la estimación de lluvia basados en sensores que miden en el espectro visible e infrarrojo (IPWG, 2015).

Nombre del algoritmo	Institución	Desarrollador
FENG-YUN	CMA, China	L. Naimeng
EURAINSAT/A 1.0	EURAINSAT Project, EU	F. J. Tapiador
HPI	EUMETSAT, EU	T. Heinemann
HydroEstimator for Short Term (1 a 6 hr) Extreme Precipitation	NOAA/NESDIS, EU	B. Kuligowski
MTSAT Real Time Image	JMA, Japan	N. Ohkawara

Tabla 2.5. Algoritmos para la estimación de lluvia basados en sensores que miden en el espectro de las microondas (IPWG, 2015).

Nombre del algoritmo	Institución	Desarrollador
AMSR-E L2 NOAA-NESDIS Global Rain Rates	NOAA/NESDIS, EU	R. R. Ferraro
AMSU NOAA-NESDIS Orbital, Pentad and Monthly Global Rain Rates	NOAA/NESDIS, EU	R. R. Ferraro
MIRS	NOAA/NESDIS, EU	S. A. Boukabara
SSM/I NOAA-NESDIS Orbital, Pentad and Monthly Global Rain Rates	NOAA/NESDIS, EU	R. R. Ferraro
TRMM HQ (3B40 RT)	NASA/GSFC, EU	G. J. Huffman

Tabla 2.6. Algoritmos para la estimación de lluvia que combinan tanto mediciones en el espectro visible e infrarrojo como el de las microondas (IPWG, 2015).

Nombre del algoritmo	Institución	Desarrollador
CMORPH	NOAA, EU	R. Joyce
EURAINSAT/B 1.0	EURAINSAT project, EU	C. Kidd
GSMaP	Osaka University, Japan	T. Ushio y K. Okamoto
MPE (Multisensor Precipitation Estimate)	EUMETSAT, Germany	T. Heinemann
NRL Blended Satellite Technique	Naval Research Laboratory, EU	F. J. Turk
PERSIANN	Univ. of California Irvine, EU	K.-L. Hsu
PERSIANN-CCS	Univ. of California Irvine, EU	Yang Hong
SCaMPR (Self-Calibrating Multivariate Precipitation Retrieval)	NOAA-NESDIS-STAR, EU	B. Kuligowski
TRMM HQ/VAR (3B42 RT)	NASA/GSFC, EU	G. J. Huffman

Tabla 2.7. Algoritmos que combinan múltiples estimaciones de lluvia satelital (IPWG, 2015).

Nombre del algoritmo	Institución	Desarrollador
GMSRA (GOES Multispectral Rainfall Algorithm)	NOAA/NESDIS, USA	M.Ba y A. Gruber
GPCP 1 Degree Daily	NASA/GSFC, USA	G. J. Huffman
GPCP Satellite Gauge Combination	NASA/GSFC, USA	G. J. Huffman
TRMM VAR (3B41 RT)	NASA/GSFC, USA	G. J. Huffman

En la parte continental de la superficie terrestre, las únicas mediciones que cumplen las necesidades de cobertura espacial y longitud del registro de precipitaciones son los pluviómetros, que incluso tienen grandes deficiencias, sobretodo en regiones escasamente pobladas. No obstante, se incluyen como datos de entrada, junto con observaciones de sensores satelitales, en algunos algoritmos de estimación de lluvia (Tabla 2.8), debido a su estatus como lo más parecido que tenemos a la realidad, usándolos con precaución en zonas de escasa cobertura.

Tabla 2.8. Algoritmos para la estimación de lluvia que combinan datos de diversos sensores satelitales y mediciones pluviométricas (IPWG, 2015).

Algoritmo	Datos de entrada	Escalas espacial/temporal	Cobertura/ Fecha de inicio	Actualizaciones	Latencia	Creadores
CAMS/OPI	CMAP-OPI, pluviómetros	2.5°/ mensual	Global/ 1979	Mensual	5 días	NOAA/NWS CPC (Xie)
	OPI, SSM/I, SSMIS, GPI, MSU, pluviómetros	2.5°/ mensual	Global/ 1979 a Oct. 2010	Estacional	3 meses	NOAA/NWS CPC (Xie)
CMAP	OPI, SSM/I, GPI, MSU, pluviómetros	2.5°/ 5 días	Global/ 1979 a Sep. 2009	Estacional	3 meses	NOAA/NWS CPC (Xie)
	OPI, SSM/I, GPI, pluviómetros	2.5°/ 5 días en Tiempo Real	Global/ 2000	5 días	1 día	NOAA/NWS CPC (Xie)
CMORPH V.1.0 BIAS CORRECTED	TMI, AMSR-E, SSM/I, SSMIS, AMSU, MHS, IR vectors, pluviómetros CPC, GPCP 5 días	0.25°/ 3 horas	50°N-S/ 1998	Diario	18 horas	NOAA/CPC (Xie)

CMORPH V.1.0 BLENDED	TMI, AMSR-E, SSM/I, SSMIS, AMSU, MHS, vectores IR, pluviómetros	0.25°/ 3 horas	50°N-S/ 1998	Diario	18 horas	NOAA/CPC (Xie)
GPCP 1° 1 día (V.1.2)	SSM/I, SSMIS, TMP1 (IR), TOVS, AIRS, GPCP mensual	1°/ diario	Global, 50°N-S/ Oct. 1997 a Jul. 2011	Mensual	3 meses	NASA/GSFC 612 (Huffman)
GPCP 5 días V.1.1	OPI, SSM/I, GPI, MSU, pluviómetros, GPCP mensual	2.5°/ 5 días	Global/ 1979 a 2008	Estacional	3 meses	NOAA/NWS CPC (Xie)
GPCP V.2.2 SG	GPCP-OPI, SSM/I, SSMIS-AGPI (IR), pluviómetros, TOVS, AIRS	2.5°/ mensual	Global/ 1979 a 2010	Mensual	2 meses	NASA/GSFC 612 (Huffman y Adler)
PERSIANN CDR	GRIDSAT IRWIN, GPCP mensual	0.25°/ diario	60°N-S/ 1980	Mensual	2 meses	UC Irvine (Hsu)
PR OBS 5	PR-OBS-3, pluviómetros, radares, NWP	5 km/ 3 horas	Europa/ Ene. 2009	3 horas	30 min	H SAF (Vocino)
RFE	GPI, SSM/I, pluviómetros	10 km/ diario	Africa/ Oct. 2000	Diario	6 horas	NOAA/NWS CPC (Xie)
	GPI, SSM/I, pluviómetros	10 km/ diario	Sur de Asia/ Abr. 2001	Diario	6 horas	NOAA/NWS CPC (Xie)
TRMM 3B43 V.7	TCI, TMI, SSM/I, SSMIS, AMSR-E, AMSU, MHS, MW-VAR (IR), pluviómetros	0.25°/ mensual	Global, 50°N-S/ Ene. 1998	Mensual	2 meses	NASA/GSFC PPS (Huffman y Adler)
TRMM 3B42 V.7	TCI, TMI, SSM/I, SSMIS, AMSR-E, AMSU, MHS, MW-VAR (IR), pluviómetros GPCC	0.25°/ 3 horas, diaria	Global, 50°N-S/ Ene. 1998	Mensual	2 meses	NASA/GSFC PPS (Huffman y Adler)

2.5. TRMM

El 27 de noviembre de 1997 fue lanzado el satélite de la TRMM y recogió continuamente datos por más de 16 años, terminando el 1° de abril de 2015, debido a que agotó su combustible, lo que produjo la disminución en la altitud de su órbita, que fue baja, casi circular, no heliosincrónica, ligeramente inclinada, concentrada en observar los trópicos y que realizaba alrededor de 16 órbitas en 24 horas. TRMM se refiere tanto a la misión espacial como a la investigación y procesamiento de su información. El 27 de febrero de 2014, el GPM (Global Precipitation Measurement, o Medidor de Precipitación Global) fue lanzado, dándole continuidad a la misión, que provee datos hasta la fecha, los cuales han sido y seguirán siendo herramientas muy útiles en diversas aplicaciones climáticas, meteorológicas, hidrológicas, etc. (NASA, 2015a).

2.5.1. Instrumentos

El satélite de la TRMM contó con 5 sensores a bordo (Figura 2.5). Los 3 instrumentos primarios para estimar lluvia fueron el PR, el TMI y el VIRS. Los otros 2 son el LIS (Lightning Imaging Sensor, o Sensor de Imágenes de Relámpagos) y el CERES (Clouds and the Earth's Radiant Energy Sensor, o Sensor de Energía Radiante de la Tierra y Nubes) (JAXA, 2015).

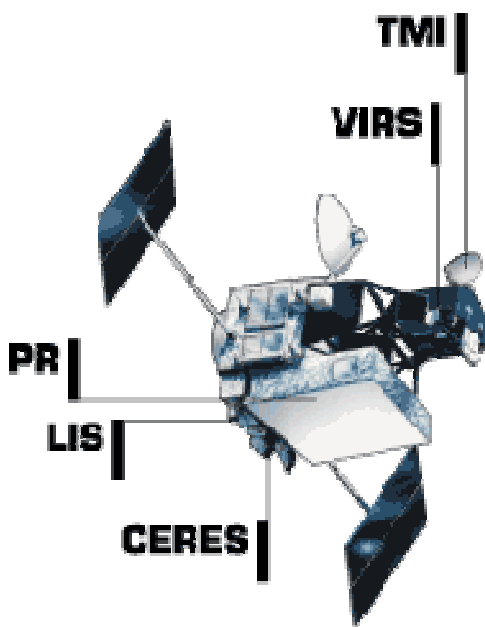


Figura 2.5. Sensores con los que contó el satélite de la TRMM (NASA, 2015b).

- **PR.** El radar meteorológico de precipitación es el primer instrumento diseñado para generar mapas tridimensionales de la estructura de las tormentas sobre la superficie terrestre y oceánica. Las mediciones que éste hizo proveen información sobre intensidad y distribución de la lluvia, el tipo de precipitación, la dimensión vertical o profundidad de la tormenta, así como la altitud a la cual la nieve se convierte en agua de lluvia, si fuese el caso, además de estimar el calor obtenido a diferentes alturas en la atmósfera.
- **TMI.** El sensor pasivo generador de imágenes por microondas del TRMM fue diseñado para brindar información cuantitativa de la lluvia. El funcionamiento de este dispositivo se basa en la medición de la energía de microondas emitida por la Tierra hacia la atmósfera. A partir de estos datos, el TMI fue capaz de cuantificar la cantidad de vapor de agua, el agua contenida en las nubes y la intensidad de lluvia en la atmósfera.
- **VIRS.** El escáner de radiación visible e infrarroja sirvió como un medidor de lluvia indirecto, que proporcionó un estándar de transferencia a otras mediciones que son llevadas a cabo normalmente usando otros satélites como los GOES.
- **LIS.** El sensor de imágenes de relámpagos fue un dispositivo complejo para detectar y localizar relámpagos dentro de las regiones tropicales. Resultó de una combinación de elementos ópticos y electrónicos, incluyendo un detector de brillo de estrellas capaz de visualizar relámpagos en nubes de tormenta. Su campo de visión permitió observar un mismo punto terrestre o una nube durante 80 segundos, suficiente tiempo para estimar la relación de destellos y determinar si la tormenta crecía o decaía.
- **CERES.** Midió los niveles de energía proveniente de la parte alta de la atmósfera y estimó los de la superficie terrestre. Mediante información extraída de un banco de imágenes de nubes de alta resolución, determinó las propiedades de las nubes, incluyendo la cantidad de nubosidad, la altitud, el espesor y el tamaño de partículas de las nubes.

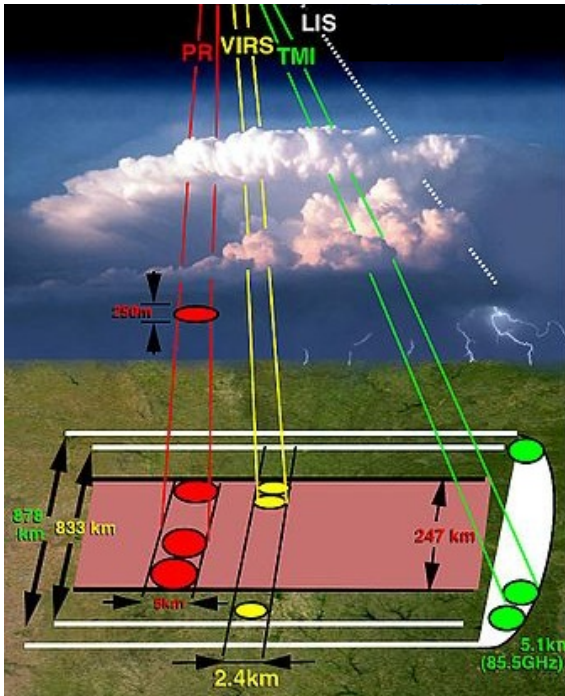


Figura 2.6. Diagrama de las franjas de medición de los instrumentos del TRMM (NASA, 2011).

2.5.2. TMPA

El TMPA (Huffman et al., 2007) se refiere al conjunto de algoritmos, que están destinados a proveer productos con la mejor estimación de precipitación posible, tanto en tiempo real como post real, mediante esquemas secuenciales de calibración, que van combinando múltiples mediciones de las diferentes bandas electromagnéticas, tanto de sensores propios del TRMM como con sensores de otros satélites y algunos además se apoyan en registros hechos en tierra con pluviómetros (Adler et al., 2000; Huffman et al., 2009; JAXA, 2015). Los diferentes productos que existen ya en su última versión (V.7) son: 3B40 RT, 3B41 RT, 3B42 RT, 3B42 y 3B43, cuyas características principales y clasificación se pueden encontrar en las tablas de la sección 2.4 de esta tesis.

Todos los datos disponibles de esta misión se encuentran en la referencia TRMM, 2015.

CAPÍTULO 3

CONTRIBUCIÓN DE LAS LLUVIAS POR CICLONES TROPICALES EN MÉXICO (1998 – 2013)

3.1. Antecedentes

Trabajos previos han investigado la contribución de las lluvias ciclónicas, muchos de ellos se han beneficiado en gran medida de la llegada de la percepción remota con sensores a bordo de satélites y algunos han enfocado sus estudios en:

- Estados Unidos (Atallah et al., 2007; Brun y Barros, 2014; Kam et al., 2013; Knight y Davis, 2009; Konrad et al., 2002; Larson et al., 2005; Nogueira y Keim, 2011; Prat y Nelson, 2013b; Rodgers et al., 2001).
- Australia (Chen et al., 2013; Dare et al., 2012; Ng et al., 2014).
- Este de Asia (Cheng et al., 2008; Lee et al., 2010; Ren et al., 2006; Wang y Chen, 2008; Yu et al., 2009).

Los productos de estimación de precipitación satelital TMPA de la TRMM han sido empleados satisfactoriamente para cuantificar la magnitud de las aportaciones y acumulados totales de lluvia ciclónica; específicamente el 3B42 se ha usado en investigaciones a escala global (Jiang y Zipser, 2010; Jiang et al., 2011), así como en las regiones o cuencas del mundo que son constantemente influenciadas por CT's (Prat y Nelson, 2013a).

En el artículo publicado y escrito por Prat y Nelson (2013a), se encontraron resultados de una de sus zonas de estudio que son de interés para la comparativa en esta tesis, y cuyos mapas correspondientes se muestran en la Figura 3.1. Ellos estiman un 5.5 % de contribución promedio de lluvia por CT's en norte y centro América y el Caribe para el periodo comprendido entre 1998 y 2009.

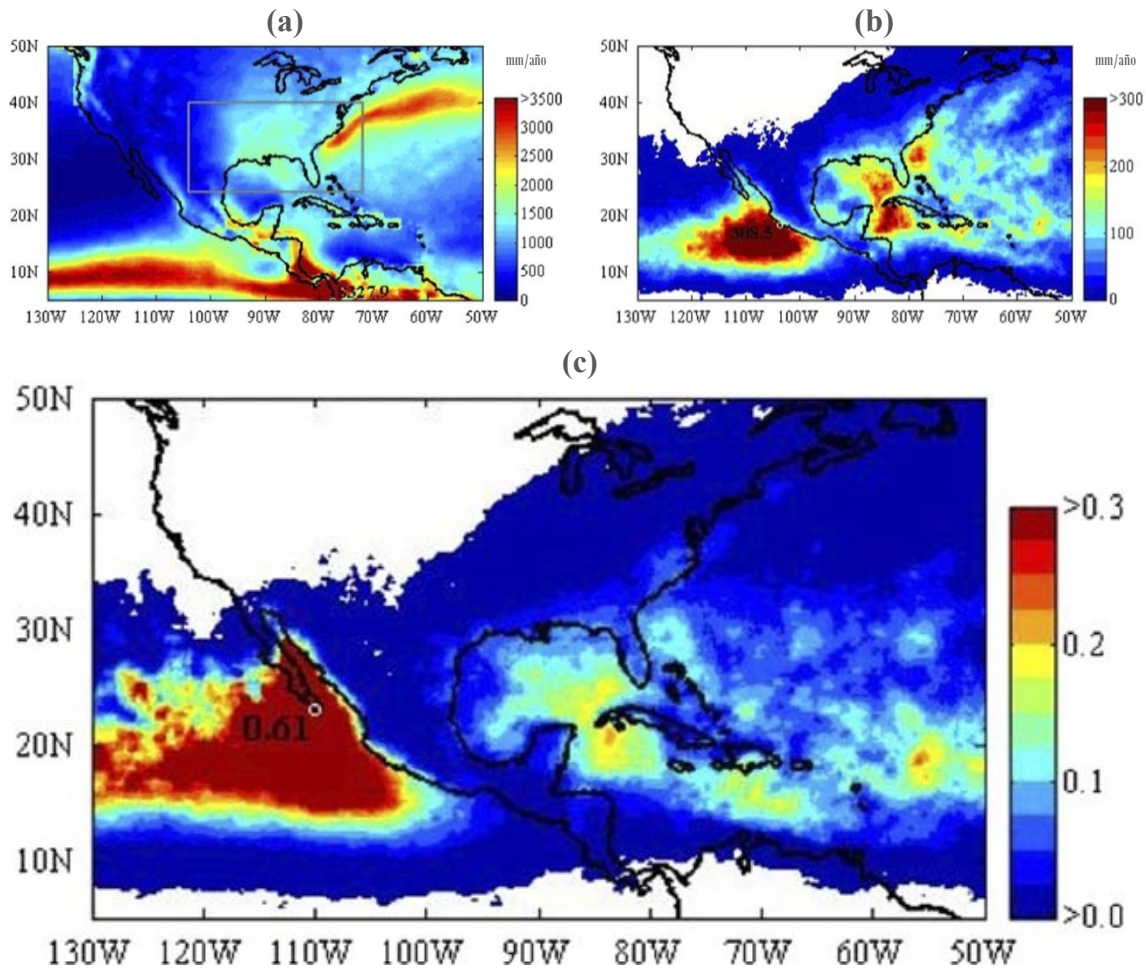


Figura 3.1. (a) Precipitación media total, (b) lluvia promedio por CT's y (c) contribución de la lluvia por CT's, para norte y centro América y el Caribe del periodo comprendido entre 1998 y 2009, (Prat y Nelson, 2013a).

Otras estimaciones previas de la aportación por precipitación ciclónica para México se pueden encontrar en Jiang y Zipser (2010), Larson et al. (2005) y Rodgers et al. (2001). Estos estudios demostraron que la Península de Baja California es no sólo la región en el país, si no la región en toda la superficie terrestre del mundo, que recibe la mayor cantidad de lluvia ciclónica relativa a la precipitación total media anual, con porcentajes que oscilan entre el 55 y 60 % (Jiang y Zipser, 2010; Prat y Nelson, 2013a). Otras regiones que reciben aportes importantes de precipitación por CT's son las costas centro a norte del Pacífico y la Península de Yucatán con tasas de hasta 20 % (Rodgers et al., 2001). Los valores de las contribuciones en estas tres regiones, durante la temporada alta de CT's, son significativamente mayores, alcanzando hasta los 90 %, en relación a la precipitación total mensual (Larson et al., 2005).

3.2. Datos

Los estudios de esta tesis se enfocan a la porción continental del territorio Mexicano, que está dentro de las latitudes 14° a 33° norte y longitudes 86° a 118° oeste (Figura 3.3).

Para el análisis en este capítulo se consideraron 16 temporadas ciclónicas, comprendidas entre 1998 y 2013, donde se seleccionaron un total de 102 CT's (ver [sección 1.7](#) para más detalles).

Se utilizó el conjunto de datos de precipitación del producto pre-calibrado TMPA 3B42 V.7 de la TRMM (ver [sección 2.5.2](#) para más detalles), en adelante 3B42, con escala temporal diaria y que está disponible en la referencia TRMM_3B42_daily, 2015.

La información de las trayectorias de los CT's proviene del IBTrACS (International Best Track Archive for Climate Stewardship, o Administración Internacional de los Archivos para el Mejor Seguimiento del Clima). Esta base de datos, respaldada por los RSMC's (Regional Specialized Meteorological Centers, o Centros Meteorológicos Regionales Especializados) de todo el mundo, es una fuente conocida que reúne los más completos registros globales históricos de todas las características y actividad de los CT's, como localización de los centros, intensidades, entre otros parámetros importantes, con una resolución de 6 horas (Knapp et al., 2010). Este conjunto de datos está disponible en la referencia IBTrACS, 2015.

3.3. Metodología

Primero se hizo la identificación de los días en que cada uno de los 102 CT's generaron lluvia directamente en el territorio nacional. Para ello se utilizó a la aplicación ArcMap del software ArcGIS (Geographic Information System, o Sistema de Información Geográfica), en donde se cargaron los archivos del 3B42 correspondientes a los periodos comprendidos entre el inicio y fin de cada evento (ver Tabla 1.2 de la [sección 1.7](#) para más detalles). Posteriormente, con la ayuda de las trayectorias provenientes del IBTrACS, se les dio seguimiento a los ciclones y finalmente se seleccionaron los archivos en los que la precipitación de los CT's ya caía en el país. Por ejemplo, para Katrina de 1999, que comenzó el 28 de octubre y terminó el 1 de noviembre, se cargaron 5 archivos que se

muestran en la Figura 3.2 además de su trayectoria (línea en color rosa). Se puede ver que la lluvia desprendida por Katrina empezó a tocar tierra en el sureste de la Península de Yucatán el 30 de octubre y finalizó el 1 de noviembre, por lo que se seleccionaron 3 archivos del 3B42 para este evento en particular.

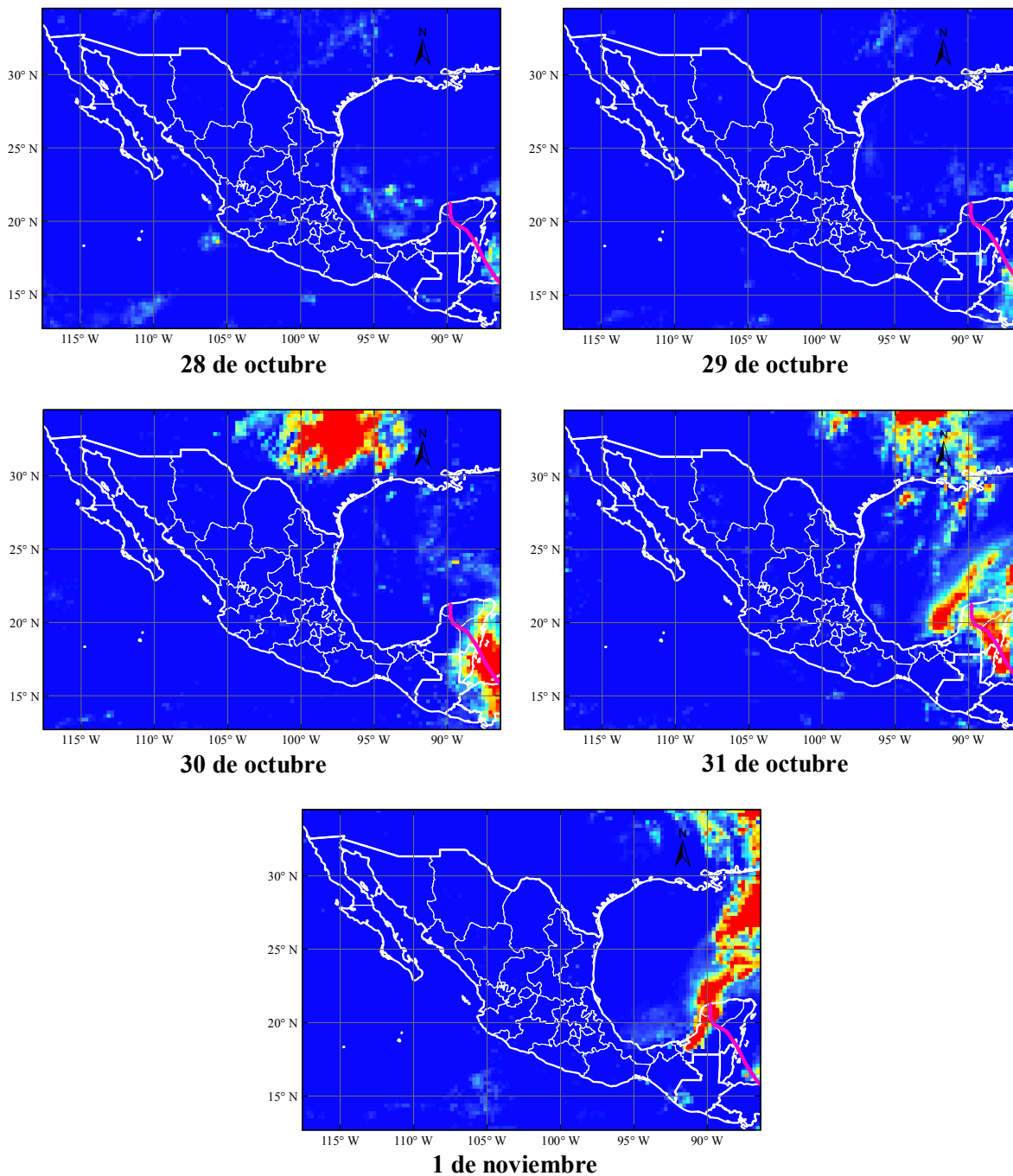


Figura 3.2. Archivos del TMPA 3B42 de la TRMM para el ciclón tropical Katrina de 1999 y su trayectoria (línea en color rosa).

Debido a que el 3B42 tiene una escala espacial de 0.25° , se generó una malla en ArcMap que coincidiera con esta resolución, solo para la porción continental del territorio Mexicano (Figura 3.3), y que sirvió para extraer la información requerida de los archivos seleccionados, en función a las coordenadas del centroide de cada una de sus celdas.

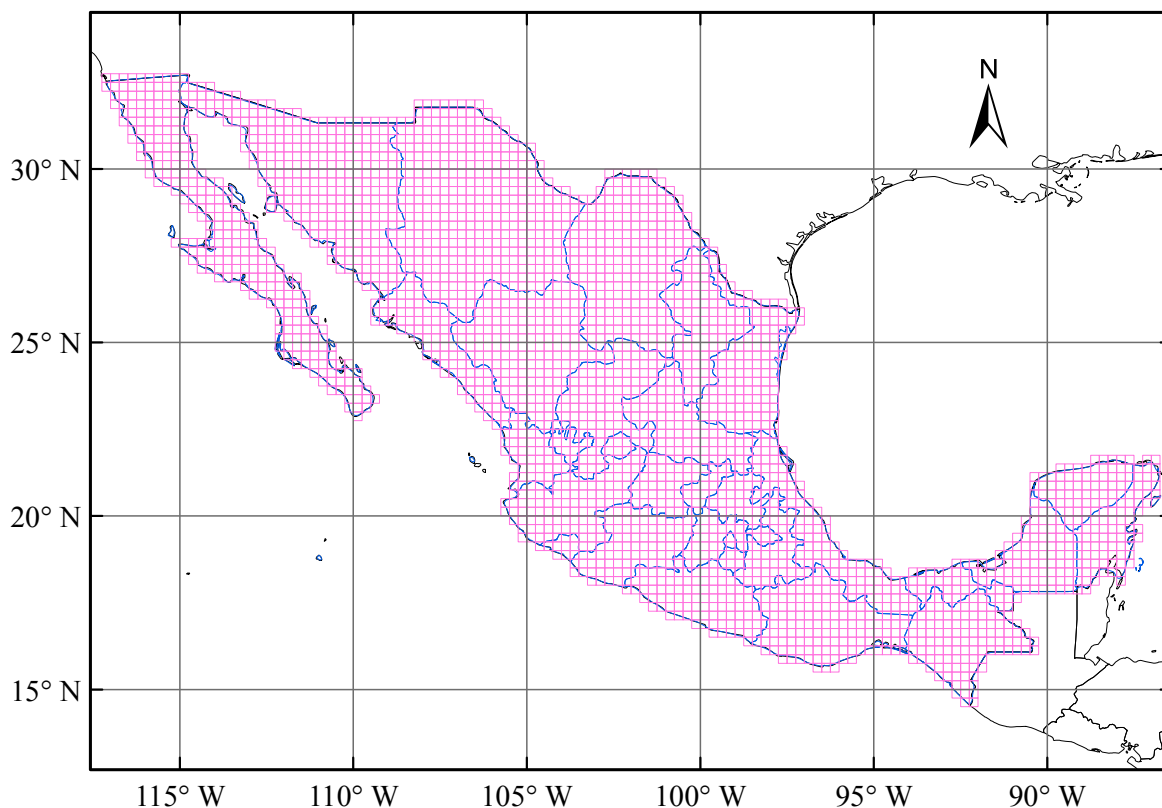


Figura 3.3. Malla generada para la extracción de datos de la porción continental del territorio Mexicano con resolución de 0.25° .

Con el programa MATLAB (Matrix Laboratory, o Laboratorio de Matrices) se hicieron los acumulados por celdas para:

- Cada uno de los 102 eventos.
- Precipitaciones anuales.
- Lluvias anuales por CT's.
- Total de precipitación para el periodo comprendido entre 1998 y 2013.
- Total de lluvia ciclónica para las 16 temporadas.

La información anterior también se cargó en ArcMap y se obtuvieron los raster deseados para la presentación de los resultados.

3.3.1. Interpolación IDW

La generación de mapas se llevó a cabo mediante el método IDW (Inverse Distance Weighting, o Ponderación Inversa de la Distancia), herramienta disponible en ArcGIS, la cual interpola una superficie raster a partir de información puntual, y que matemáticamente se expresa como:

$$Z(S_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i * Z(S_i) \quad (1)$$

En la Ecuación 1, $Z(S_0)$ es el valor a predecir, N es el número de muestras alrededor del punto a predecir, λ_i son los pesos asignados a cada punto vecino y $Z(S_i)$ son los valores medidos.

Los pesos de los puntos medidos están dados por:

$$\lambda_i = \frac{d_{io}^{-p}}{\sum_{i=1}^N d_{io}^{-p}} \quad (2)$$

En donde d es la distancia entre el lugar de predicción (S_0) y el lugar muestral (S_i); p es un factor de reducción de peso, cuyo valor se encuentra minimizando el error cuadrático medio o error de predicción.

La técnica IDW se basa en la similitud de los valores que tienen distribución espacial más próxima, y por lo tanto, tienen más peso o influencia sobre el punto a estimar (Murillo et al., 2012); el valor de salida de una celda, se encuentra limitado al rango de valores utilizados para interpolar; por lo anterior, los mapas de este capítulo fueron creados en función de $N = 4$ y con un tamaño de celda de 0.072° .

El procedimiento IDW tiene un excelente desempeño cuando se cuenta con información lo suficientemente densa y bien distribuida, y ya que las coordenadas de los centroides de la malla, con la información de los acumulados de lluvia del 3B42, están uniformemente distribuidos espacialmente, se facilita la aplicación de este tipo de interpolación.

3.4. Precipitaciones Anuales

En la Figura 3.4, se pueden observar los mapas de la distribución de la precipitación anual en el territorio de la República Mexicana de 1998 a 2013. Existe una gran variabilidad espacial de la lluvia, aunque es consistente año tras año. La precipitación se nota más abundante hacia la costa del Océano Atlántico (Golfo de México y Mar Caribe) que hacia la del Pacífico. Las regiones áridas y semiáridas de México, con lluvias anuales menores a 800 mm, se localizan en gran parte del norte del territorio; la zona más seca del país es la porción noroeste, sobretodo la Península de Baja California, que en todos los años presenta áreas con precipitaciones menores a 100 mm. Las regiones con lluvias anuales que oscilan entre 800 y 1200 mm son dominantes a lo largo de la costa central del Pacífico y la zona al norte de la costa del Golfo de México. Finalmente, los climas húmedos, con precipitaciones anuales mayores a 1200 mm, se encuentran en la Península de Yucatán, en las zonas central y sur de la costa del Golfo de México y en la costa sur del Pacífico.

3.5. Lluvias Anuales por Ciclones Tropicales

Los mapas de la distribución de la lluvia anual por CT's en el territorio del país de 1998 a 2013 se muestran en la Figura 3.5. La región situada entre las partes más al sur de las costas del Golfo de México y del Océano Pacífico, es la que presenta las precipitaciones anuales por CT's más grandes, con valores superiores a 2000 mm en los años 1998 y 2013, estos valores llegan a alcanzar los 800 mm en los años 1999, 2005 y 2010, mientras que para el resto sólo llegan a los 400 mm. Lo anterior podría explicar la magnitud de las inundaciones extremas que se producen constantemente en los estados de Guerrero, Veracruz y Tabasco, provocadas principalmente por actividad ciclónica (Pedrozo-Acuña et al., 2014).

La variabilidad espacial de la lluvia anual por CT's se observa extraordinariamente alta, con valores que oscilan de menores a 50 mm en la Península de Baja California (y gran parte del norte de México), a mayores de 2400 mm en las sierras del sureste de México para los años 1998 y 2013. A excepción de estos 2, los valores de precipitación para el resto de los años son sustancialmente menores y bastante uniformes, con un claro aumento en el gradiente de la lluvia de noroeste a sureste (Figura 3.5).

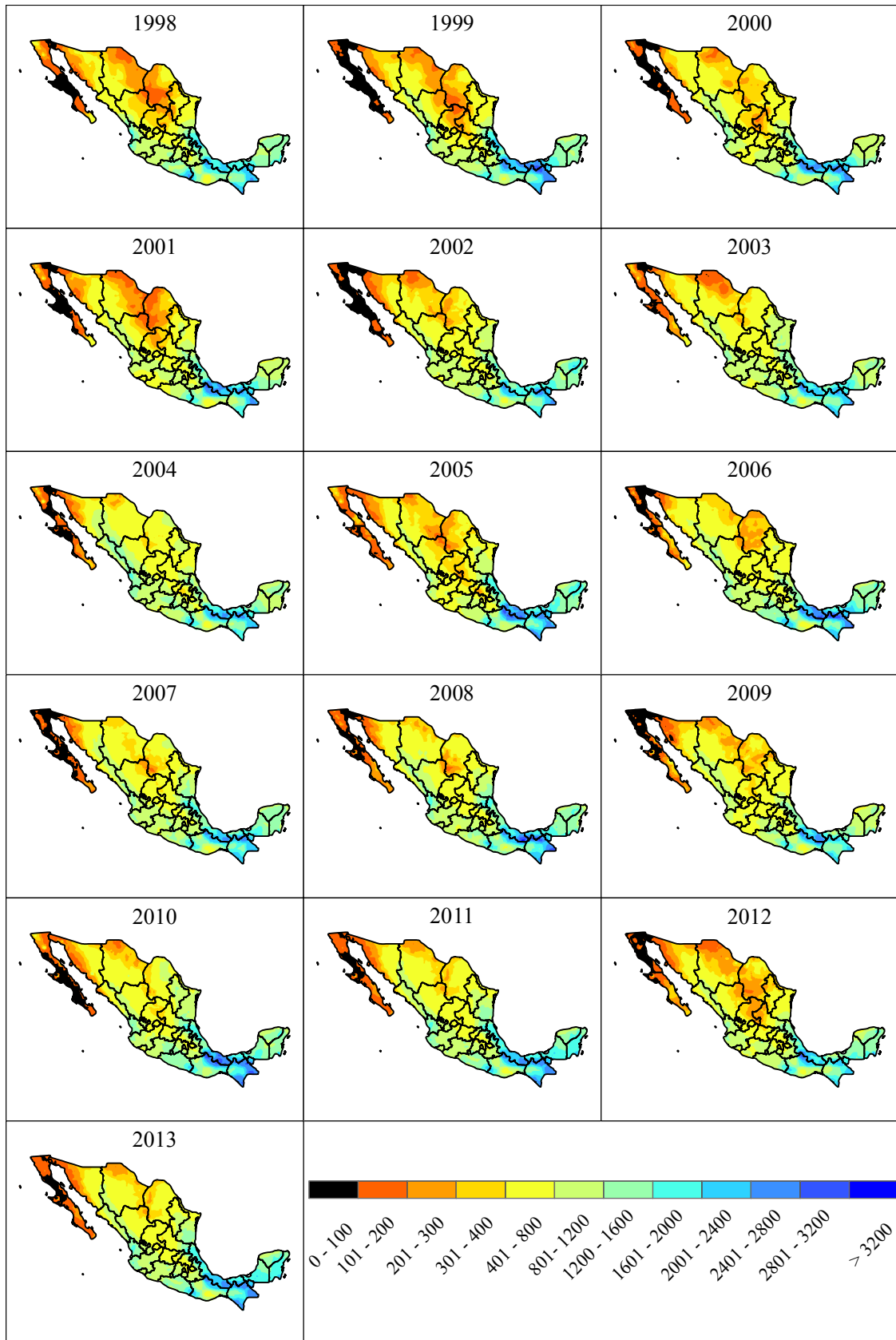


Figura 3.4. Mapas de precipitación anual en mm para México (1998-2013).

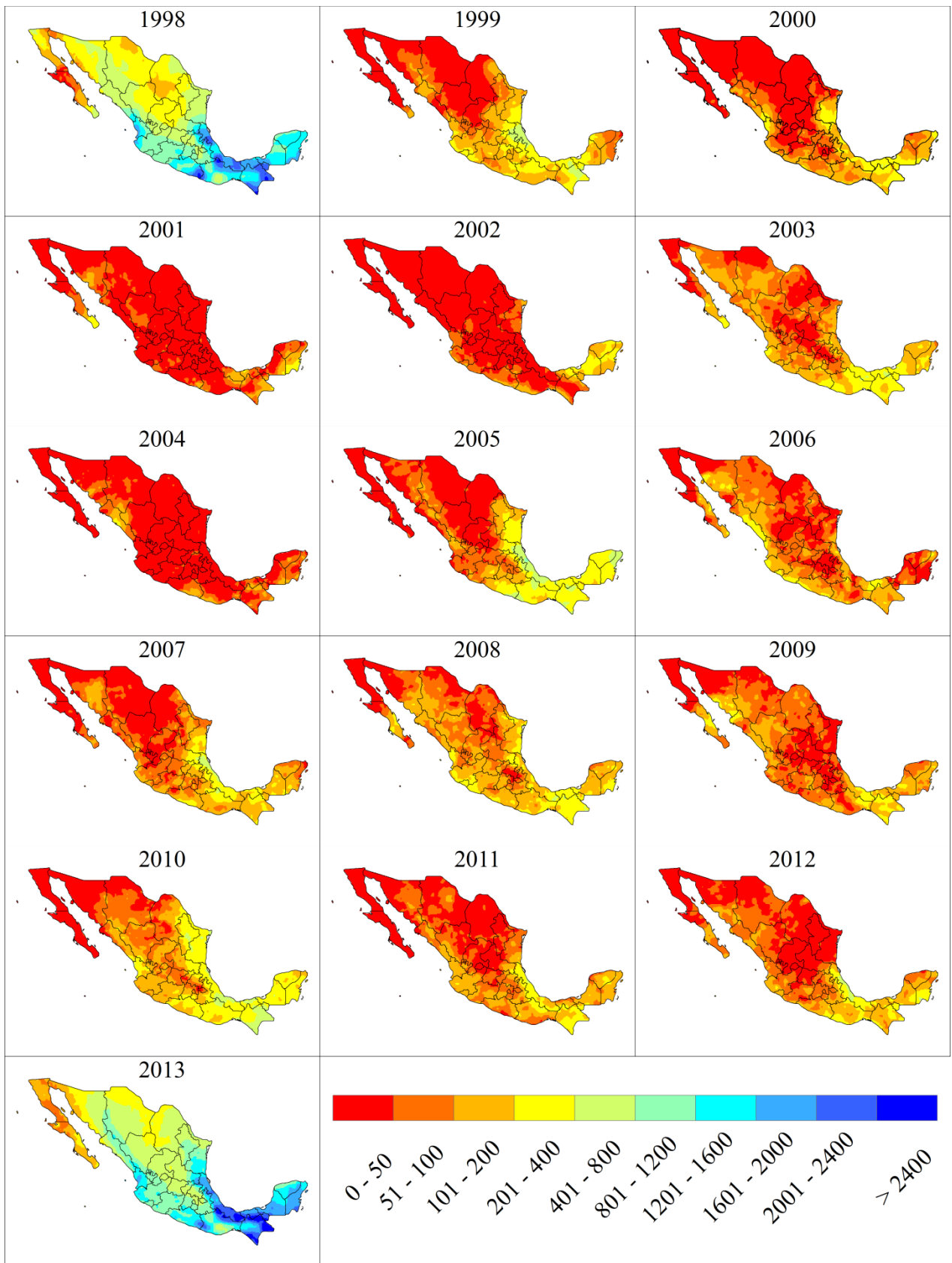


Figura 3.5. Mapas de lluvia anual por CT's en mm para México (1998-2013).

3.6. Contribución de las Lluvias por Ciclones Tropicales

Se presentan en la Figura 3.6 los mapas de la distribución de la contribución de la lluvia por CT's a la precipitación anual en el territorio Mexicano de 1998 a 2013.

2013 es el año en que la distribución de la aportación de la precipitación por CT's es sustancialmente mayor y bastante uniforme en todo el territorio de la República Mexicana, además de que es el que tiene el mayor número de eventos (ver Figura 1.16 de la [sección 1.7](#)). Esta amplia cobertura espacial se le atribuye principalmente a los eventos ciclónicos correspondientes a la tormenta tropical Manuel y al huracán Ingrid, los cuales actuaron simultáneamente durante 5 días, por la costa del Océano Pacífico y por la del Golfo de México respectivamente (Figura 3.7).

Los años que le siguen al 2013 con las distribuciones más altas de contribuciones son 1999, 2005 y 2010, mientras que las más bajas se observan en los años 2002, 2004 y 2011, que coinciden con los que menor actividad ciclónica muestran (ver Figura 1.16 de la [sección 1.7](#)), a excepción de 2011, lo que puede ser atribuido a los pocos días en los que sus CT's generaron precipitación directamente en el país, y las categorías relativamente bajas de sus eventos (ver Tabla 1.2 de la [sección 1.7](#)).

La parte inferior de la Península de Baja California es la región que presenta las aportaciones más grandes de lluvia anual por CT's, con valores generalmente mayores a 40 % de su precipitación anual. Esta porción del país tiene una gran variabilidad temporal, ya que en los años sin actividad ciclónica que llegue ahí, la contribución es de 0 % (2002 y 2011), llegando a mostrar de 80 a 100 % en otros con gran influencia de CT's. Los valores anteriores no están totalmente en desacuerdo con las estimaciones de Jiang y Zipser (2010) y Prat y Nelson (2013a) de aproximadamente 55 y 60 % de aportaciones promedio respectivamente para esta misma zona.

Otras regiones terrestres del país con recurrentes y significantes contribuciones de lluvia ciclónica, son la zona noroeste de México (sin contar la parte norte de la Península de Baja California, que limita con la frontera con Estados Unidos) y las porciones en la costa del Golfo de México.

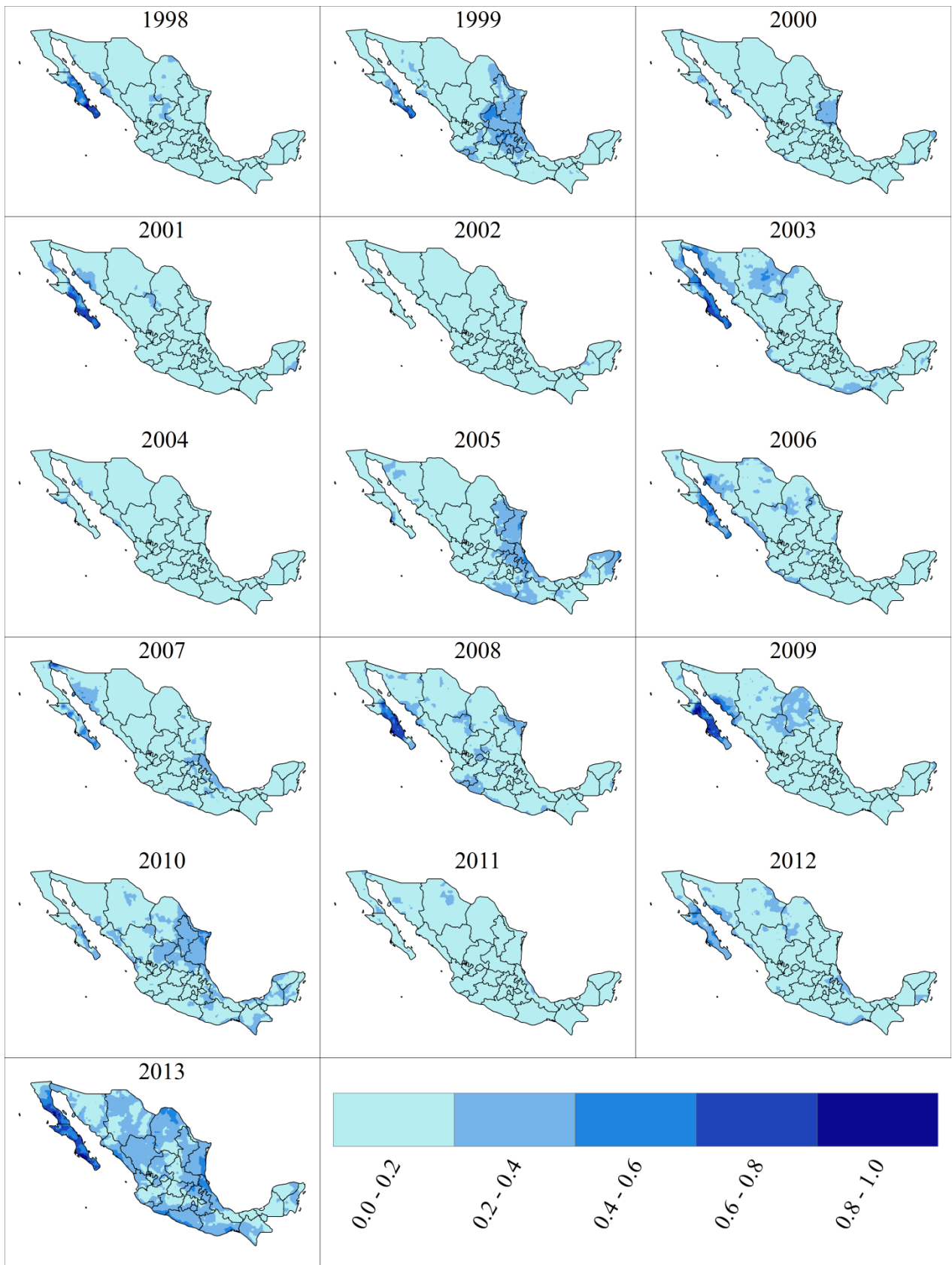


Figura 3.6. Mapas de la contribución de la lluvia anual por CT's para México (1998-2013).

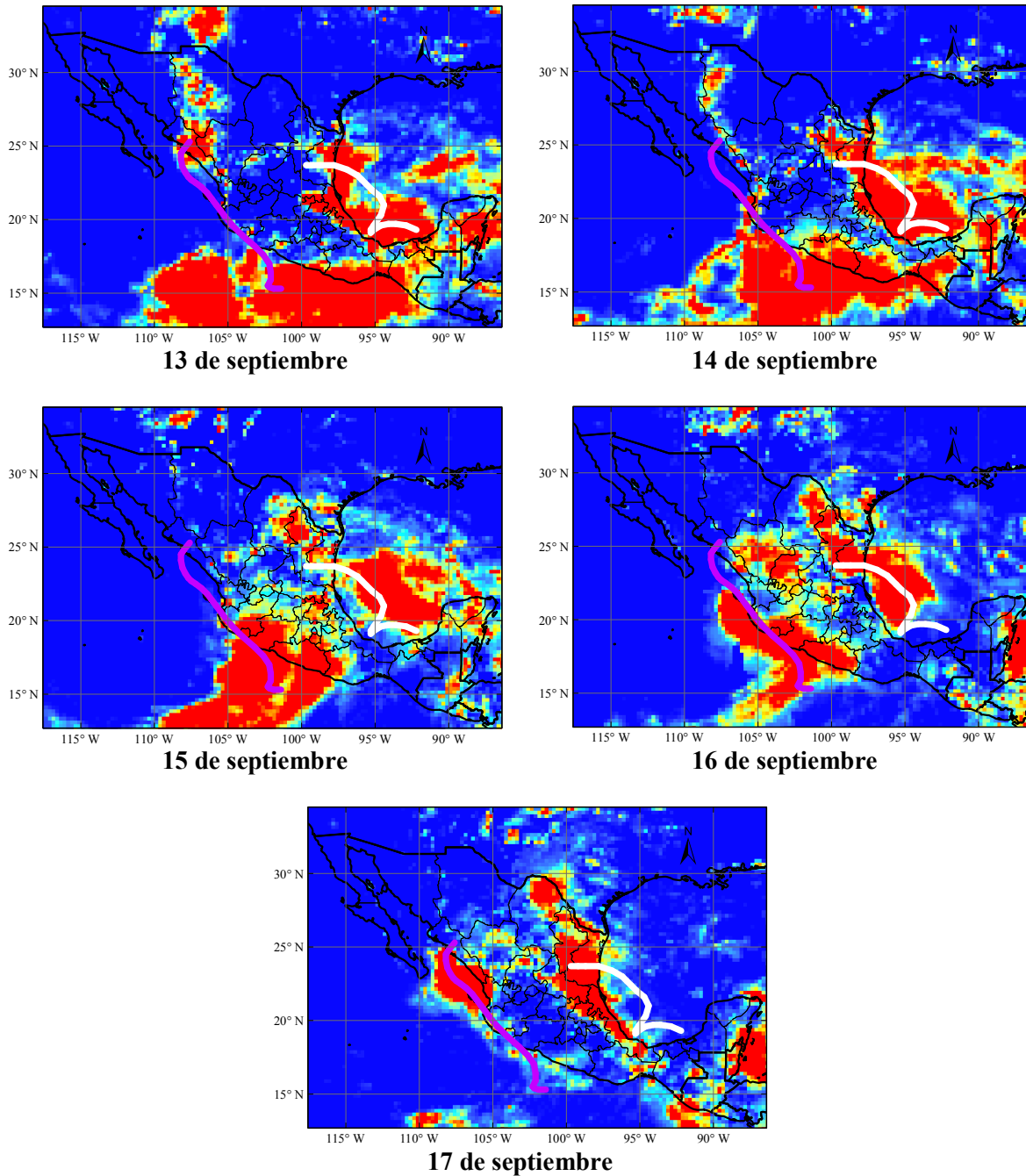


Figura 3.7. Archivos del TMPA 3B42 de la TRMM de los días en que la tormenta tropical Manuel (trayectoria en color morado) y el huracán Ingrid (trayectoria en color blanco) actuaron simultáneamente en ambas costas de México en 2013.

Las FDP (Funciones de Densidad de Probabilidad) de las aportaciones de la lluvia por CT's a la lámina de precipitación media anual en México, en términos de % y mm (Tabla 3.1), se muestran en la Figura 3.8. Aunque ambas distribuciones son claramente unimodales, no son perfectamente simétricas, en cambio siguen un patrón con sesgo

positivo, de cola derecha, con máximos de aproximadamente 2.5 % y 20 mm respectivamente. Estas estimaciones son promedios para la superficie total del país, pero son mucho más grandes cuando son ajustados a la escala reducida de la zona afectada.

Tabla 3.1. Contribuciones por categoría de la lluvia por CT's a la lámina de precipitación media anual en México de 1998 a 2013 en % (mm).

Año	DT	TT	H1	H2	H3	H4	H5
1998	1	4	2	0	0	0	0
	(7.5)	(26.7)	(15.0)	(0.0)	(0.0)	(0.0)	(0.0)
1999	14	0	3	0	0	0	0
	(104.8)	(0.0)	(25.5)	(0.0)	(0.0)	(0.0)	(0.0)
2000	3	7	3	0	0	0	0
	(21.6)	(49.8)	(26.0)	(0.0)	(0.0)	(0.0)	(0.0)
2001	1	2	3	0	0	0	0
	(4.8)	(14.3)	(20.4)	(0.0)	(0.0)	(0.0)	(0.0)
2002	0	1	0	0	4	1	0
	(0.0)	(7.2)	(0.0)	(0.0)	(26.6)	(9.9)	(0.0)
2003	2	7	1	5	0	0	0
	(13.3)	(53.3)	(4.9)	(39.2)	(0.0)	(0.0)	(0.0)
2004	2	1	0	0	0	0	0
	(17.7)	(11.7)	(0.0)	(0.0)	(0.0)	(0.0)	(0.0)
2005	1	7	6	0	0	4	0
	(10.3)	(50.7)	(43.6)	(0.0)	(0.0)	(33.5)	(0.0)
2006	3	0	0	5	2	0	0
	(23.2)	(0.0)	(0.0)	(44.0)	(16.3)	(0.0)	(0.0)
2007	0	0	8	0	0	0	4
	(0.0)	(0.4)	(62.0)	(0.0)	(0.0)	(0.0)	(31.2)
2008	4	10	0	1	0	0	0
	(35.6)	(83.1)	(0.0)	(9.9)	(0.0)	(0.0)	(0.0)
2009	3	3	2	4	0	0	0
	(21.7)	(22.0)	(12.8)	(27.0)	(0.0)	(0.0)	(0.0)
2010	4	6	0	5	3	0	0
	(34.7)	(52.1)	(0.0)	(40.8)	(24.0)	(0.0)	(0.0)
2011	2	6	2	0	0	0	0
	(11.2)	(39.8)	(11.9)	(1.5)	(0.0)	(0.0)	(0.0)
2012	1	8	2	0	0	0	0
	(8.6)	(60.1)	(16.3)	(0.0)	(0.0)	(0.0)	(0.0)
2013	5	14	12	1	0	0	0
	(46.6)	(119.1)	(108.9)	(12.5)	(0.0)	(0.0)	(0.0)

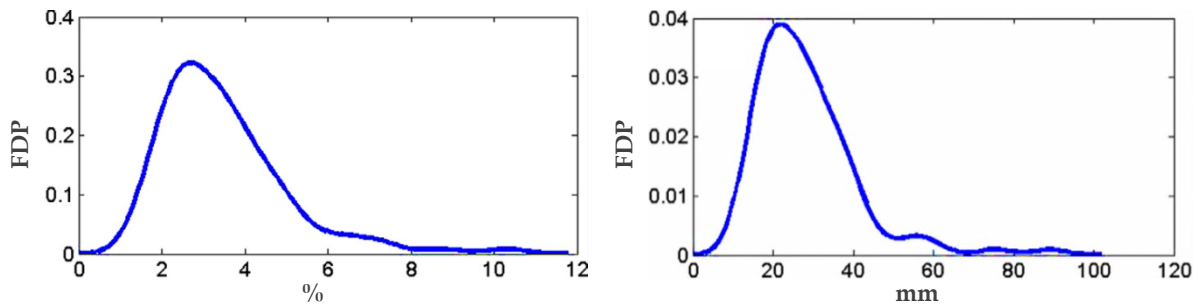


Figura 3.8. Funciones de densidad de probabilidad de las contribuciones de la lluvia por CT's a las láminas de precipitación media anual.

Las acumulaciones anuales de las contribuciones se reflejan en la Figura 3.9; 2013 aparece con la aportación más alta con aproximadamente 24 %, mientras que la más baja corresponde al año 2004 con apenas 3.5 %. La contribución promedio por CT's a la precipitación anual es de 11.63 %, con una desviación estándar de 5.3 %.

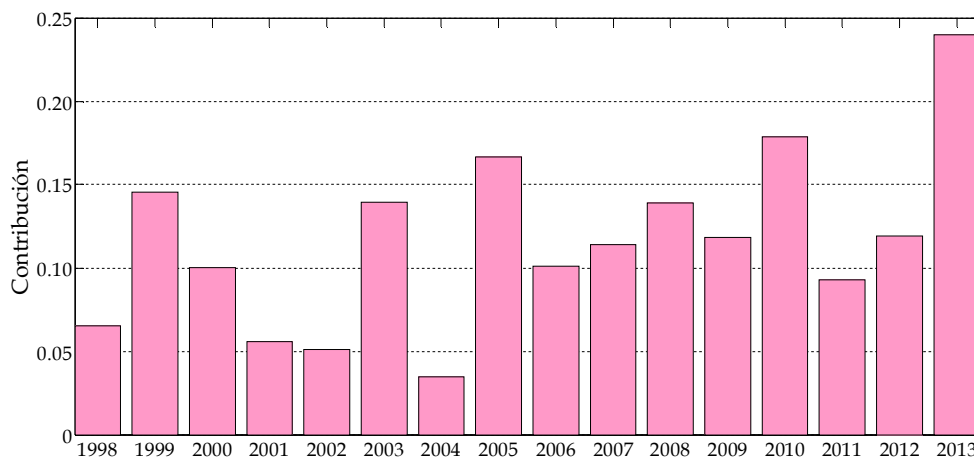


Figura 3.9. Acumulados de la contribución de la lluvia anual por CT's en México (1998-2013).

Las aportaciones de la lluvia por CT's separadas por categorías están caracterizadas por un comportamiento fuertemente fluctuante (Figura 3.10, arriba), sin tendencias temporales significativas. Resaltan las aportaciones por DT's en 1999, por TT's en 2013 y 2008, y por H1's también en 2013.

Se puede observar que las DT's y las TT' representan las mayores fuentes de lluvia por actividad ciclónica, con aproximadamente 8 % cada año, mientras que el resto de las categorías (H1's, H2's, H3's, H4's y H5's) tienen tasas menores de 5 % para cada temporada.

A medida que aumenta la categoría de los H's en la escala Saffir-Simpson, es probable que disminuya la contribución, no así cuando se grafican las intensidades de precipitación ciclónica máxima registrada en 24 horas por categorías (Figura 3.10, abajo), donde los valores en su mayoría resultan muy similares, pero saltan a la vista las barras por H1's en 1998 y H2's en 2006.

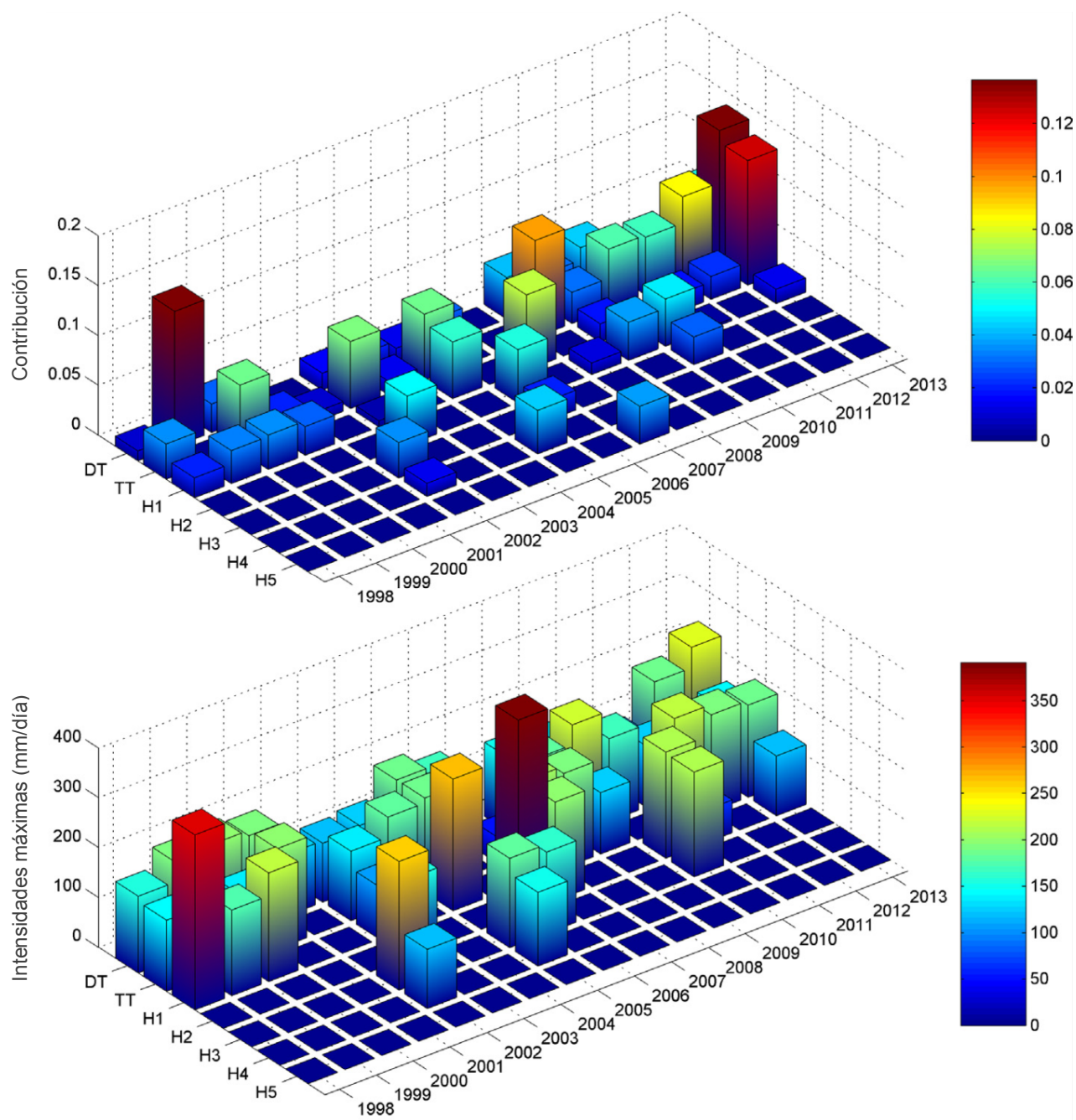


Figura 3.10. Contribuciones de la lluvia anual por CT's (arriba) e intensidades de precipitación ciclónica máxima registrada en 24 horas (abajo), separadas según categorías (1998-2013).

Se obtuvieron promedios \pm desviaciones estándar (mm) para las aportaciones de los siguientes grupos:

- Para los 102 CT's: 15.9 ± 12.6
- DT's: 12.5 ± 7.9
- TT's: 16.5 ± 15
- H1's: 18.6 ± 11.9
- H2's: 19.2 ± 13.7
- H3's: 21.5 ± 7.3
- H4's: 14.5 ± 11.3
- H5's: no hay valores par esta categoría ya que sólo se presentó uno durante el periodo de estudio (ver Figura 1.18 de la sección 1.7).

En la Figura 3.11 está el mapa de la distribución en territorio Mexicano de la contribución media de la lluvia por CT's a la precipitación total para los 16 años de estudio (1998-2013). A continuación se hace un listado de sus características:

- Se nota el claro aumento de las aportaciones hacia las costas.
- En promedio, las contribuciones anuales que caen en el intervalo de 10 a 20 % fueron dominantes en la mayor parte del país, con algunas excepciones detectadas a lo largo del Mar de Cortés (Golfo de California), la costa sur hacia el Océano Pacífico y la costa norte del Golfo de México, con aportes medios entre 20 y 30 %.
- La porción más al noroeste que limita con Estados Unidos, junto con algunas regiones centrales del país, reciben en promedio no más de 10 % de contribución a la lluvia total.
- Las aportaciones más grandes se encontraron dentro de la zona más árida del territorio Mexicano, la Península de Baja California (ver Figura 3.4), siendo la única parte que presenta aportaciones de entre 40 y 50 %, mientras que para la porción más húmeda, ubicada en el sureste dentro de los estados de Tabasco y Chiapas, sólo recibe tasas medias entre los 10 y 20 %.

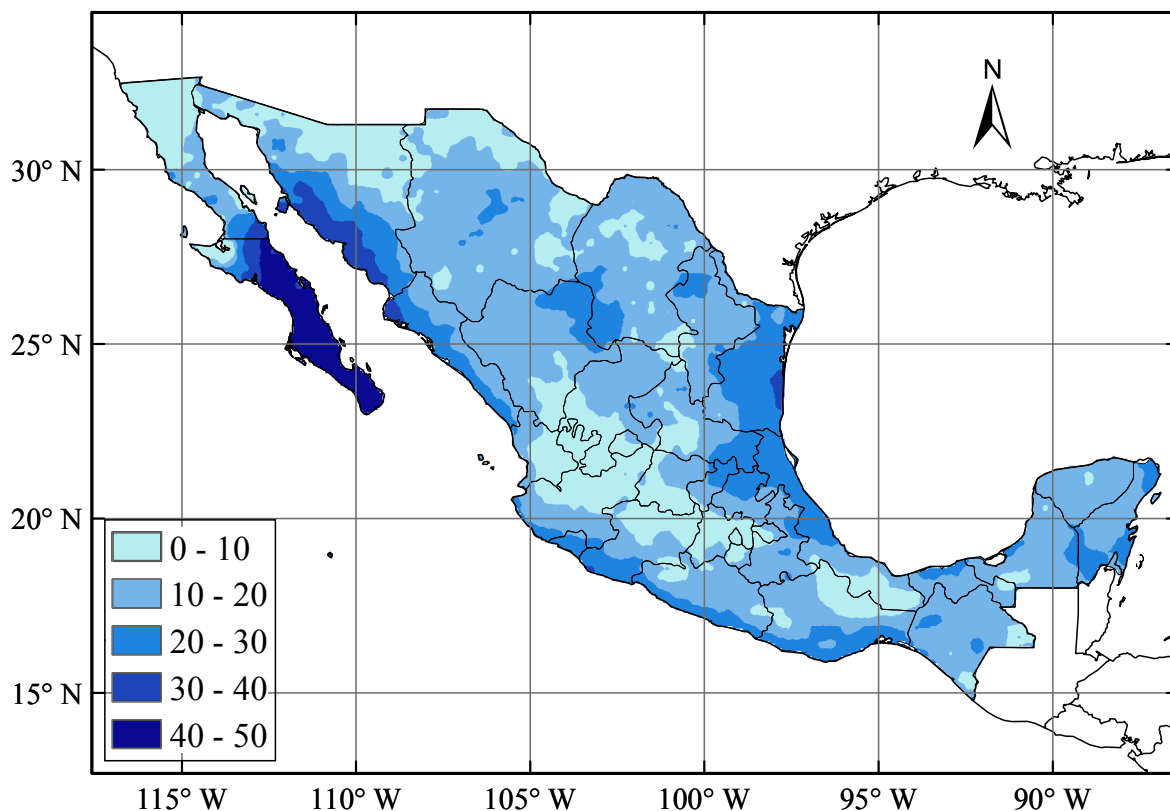


Figura 3.11. Mapa de la contribución media de la lluvia por CT's a la precipitación total en % para México, del periodo comprendido entre 1998 y 2013.

En México, de acuerdo a los trabajos realizados por la CONAGUA y el INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), se han identificado 1471 cuencas hidrográficas, las cuales se han agrupado en 37 cuencas mayores o regiones hidrológicas, que a su vez se organizan en 13 RHA's (Regiones Hidrológicas Administrativas, Tabla 3.2).

Tabla 3.2. Regiones hidrológicas administrativas de México.

#	Nombre
I	Península de Baja California
II	Noroeste
III	Pacífico Norte
IV	Balsas
V	Pacífico Sur
VI	Río Bravo
VII	Cuencas Centrales del Norte
VIII	Lerma Santiago Pacífico
IX	Golfo Norte
X	Golfo Centro
XI	Frontera Sur
XII	Península de Yucatán
XIII	Aguas del Valle de México

La CONAGUA, órgano administrativo, normativo, técnico y consultivo encargado de la gestión del agua en el país, desempeña sus funciones a través de 13 organismos de cuenca, cuyo ámbito de competencia son las RHA's (Atlas Digital del Agua México, 2012). En la Figura 3.12 se encuentran las localizaciones de éstas en la República Mexicana.

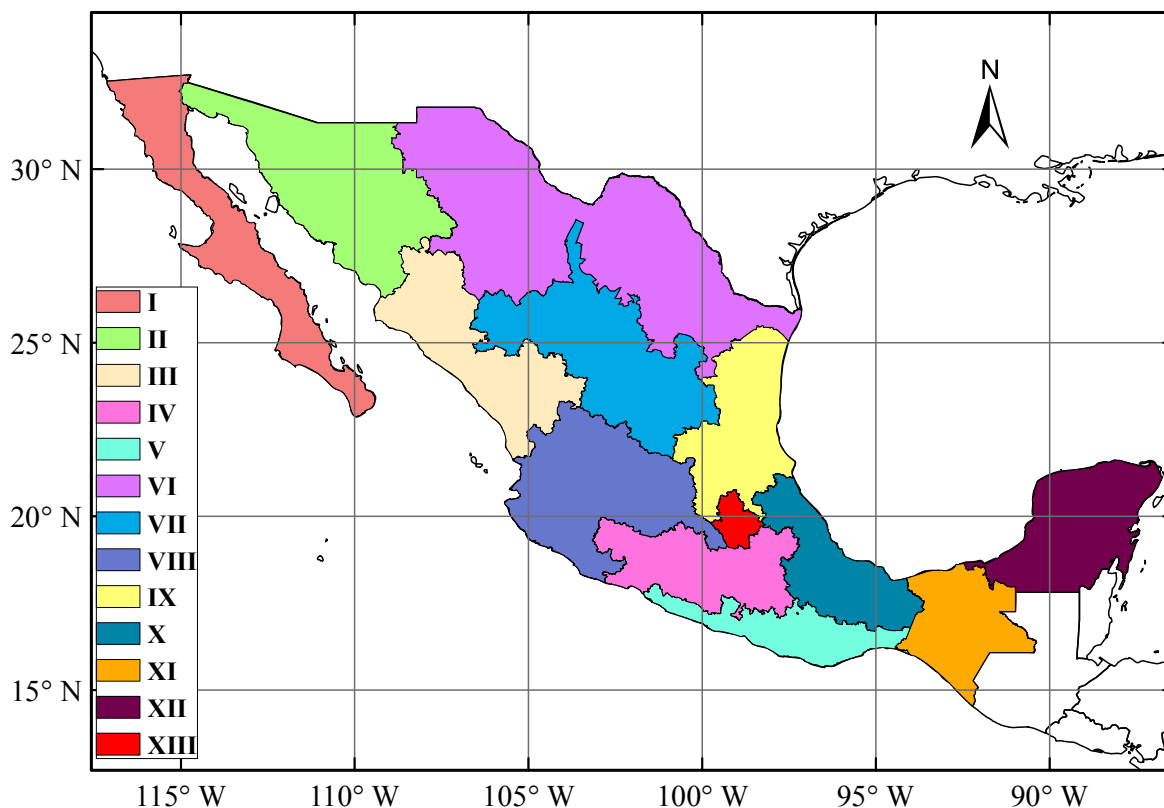


Figura 3.12. Localización de las 13 regiones hidrológicas administrativas en México.

En la Figura 3.13 se presentan las contribuciones de la lluvia anual por CT's a cada RHA en México de 1998 a 2013. En la parte superior, se puede observar que la RHA para la cual se han presentado las aportaciones más grandes, en 8 de los 16 años de estudio, es en la correspondiente a la Península de Baja California, lo que no es sorpresa dados los resultados antes presentados en este capítulo, registrando un máximo en 2013 de 53 %, seguida por la RHA del Golfo Norte, con máximos en 6 años. Los promedios que se calcularon para cada RHA son consistentes, ya que generalmente sus medias oscilan dentro del rango entre 9.8 y 13.8 %, con excepción de la Península de Baja California, la cual tiene a una de casi 19 %. En la parte inferior, el comportamiento en algunas RHA's incrementa y disminuye alternadamente cada lapso.

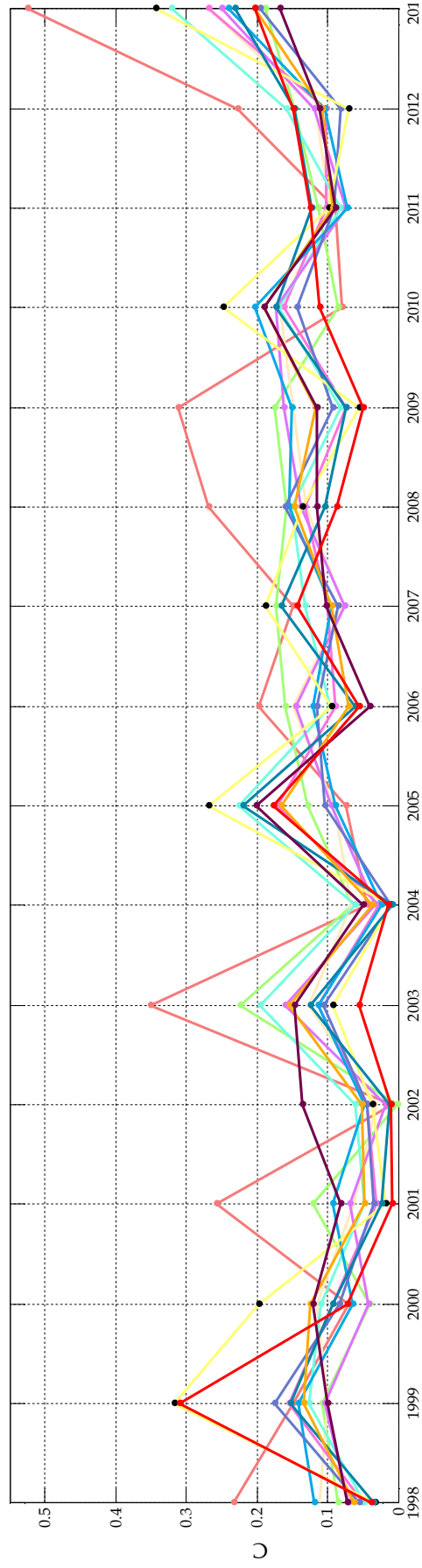
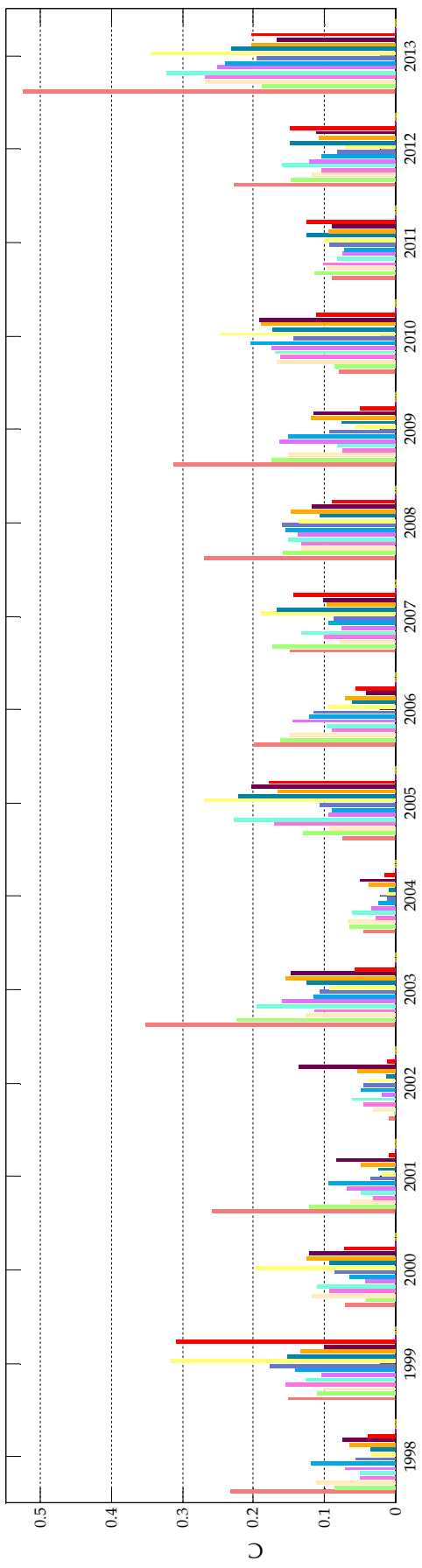


Figura 3.13. Contribuciones de la lluvia anual por CT's a cada región hidrológica administrativa en México (1998-2013). Escala de colores igual a la de la Figura 3.12.

3.7. Trayectorias de los 102 CT's

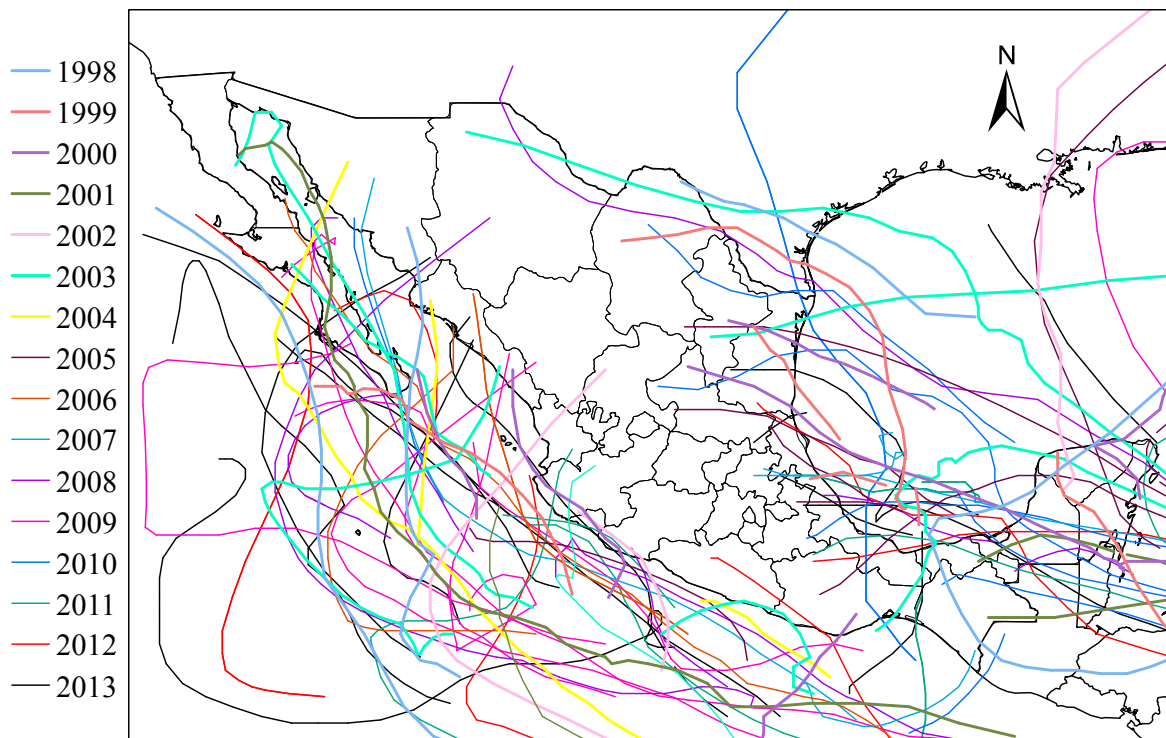


Figura 3.14. Trayectorias de los 102 CT's que generaron lluvia en territorio Mexicano en el periodo comprendido entre 1998 y 2013.

Como ya se había mencionado en la sección 1.7, de los 102 CT's que generaron precipitación en territorio nacional durante el periodo comprendido entre 1998 y 2013, 56 llegaron por el litoral hacia el Océano Pacífico, presentándose la mayoría de trayectorias del lado Oeste del país (Figura 3.14), mientras que el resto (46 trayectorias) arribaron por la orilla hacia el Océano Atlántico. Todos los estados costeros y algunos que no lo son, muestran líneas del paso de los CT's sobre sus áreas terrestres. Las entidades federativas que aparecen con el mayor número de pasos de trayectorias son:

- Baja California Sur
- Yucatán
- Quintana Roo
- Campeche
- Veracruz
- Tamaulipas

Jáuregui (2003) analizó en uno de sus estudios a las temporadas ciclónicas comprendidas durante el periodo de 1951 a 2000 en México, donde concluye que las llegadas de los CT's son más frecuentes por el Océano Pacífico en las zonas costeras del noroeste del país (Baja California Sur y Sinaloa), seguidas por el estado de Michoacán, mientras que en el lado del Océano Atlántico, la Península de Yucatán y Tamaulipas fueron los más expuestos a los eventos ciclónicos. Lo anterior no está en desacuerdo con las trayectorias de los 102 CT's examinados (Figura 3.14).

CAPÍTULO 4

ASIMILACIÓN DE LLUVIA ESTIMADA DE SATÉLITE CON INFORMACIÓN PLUVIOMÉTRICA PARA EVENTOS CICLÓNICOS

4.1. Antecedentes

Algunos autores y grupos de investigación han usado metodologías para combinar diferentes conjuntos de datos de lluvia provenientes de diversos tipos de mediciones (pluviómetros, radares y sensores satelitales), con el fin de aprovechar al máximo todas sus ventajas y disminuir sus limitaciones:

- Nanding et al. (2015) hacen una comparación completa y evalúan el desempeño de diferentes procedimientos para fusionar precipitación de pluviómetros con información de radares, que tienen el potencial de ser usados para bases de lluvia satelital, e indican que éstos pueden mejorar considerablemente a las estimaciones de dicha variable.
- Gebregiorgis y Hossain (2011) evaluaron un enfoque de localización para unir tres productos satelitales y son el TMPA 3B42 RT de la TRMM, CMORPH (Climate Prediction Center-Morphing Technique, o Técnica de Conversión del Centro de Predicción Climático) y PERSIANN-CCS (Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks - Cloud Classification System, o Estimación de Precipitación a partir de Información de Sensores Remotos usando Redes Neuronales Artificiales con un Sistema de Clasificación de Nubes) en la cuenca del río Mississippi con el modelo VIC (Variable Infiltration Capacity, o Capacidad de Infiltración Variable) y reportan que los resultados tienen el potencial para producir un ajuste superior a que si usaran los datos de satélite individualmente.

Los estudios siguientes han ajustado mediciones pluviométricas con información de estimaciones de precipitación satelital, y obtener entonces asimilaciones corregidas. En la Tabla 2.8 de la sección 2.4 se encuentra un primer listado de este tipo de trabajos, y a continuación se mencionan a otros que se encontraron en la revisión bibliográfica:

- Chiang et al. (2007) combinaron lluvia pluviométrica con datos del PERSIANN-CCS, usando 2 métodos, con los que obtuvieron una mejora en la exactitud del caudal simulado de la cuenca del río Wu Tu (204 km²) en Taiwan durante la temporada de tifones (CT's), demostrando que la fusión puede ser aplicada eficientemente.
- Dinku et al. (2014) generaron series de tiempo homogéneas de precipitación para una zona en Etiopía, fusionando mediciones pluviométricas e información proveniente del METEOSAT. Para obtener sus productos asimilados aplicaron un ajuste de sesgo y una regresión Kriging, sin embargo el primero es el más sencillo y genera resultados tan válidos como el segundo. A continuación se presenta una imagen comparativa:

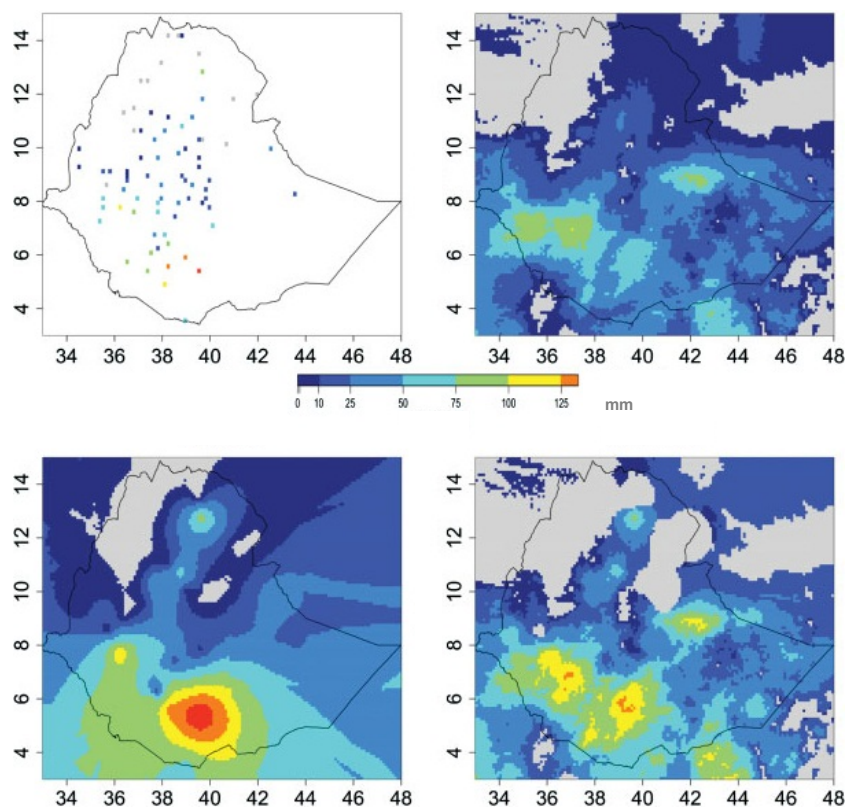


Figura 4.1. Imagen comparativa de datos y resultados de Dinku et al. (2014).

En la Figura 4.1 se puede observar lo siguiente:

- Panel superior izquierdo: mediciones pluviométricas.
- Panel superior derecho: estimación de lluvia satelital.
- Panel inferior izquierdo: interpolación simple de los valores pluviométricos.
- Panel inferior derecho: producto asimilado.

Concluyen que el producto combinado exhibe mayor calidad, sobretodo en las partes donde la repartición espacial de las estaciones pluviométricas es escasa.

- Li y Shao (2010) usaron un método no paramétrico llamado Kernel suavizado para ajustar precipitación de pluviómetros con estimaciones satelitales del producto TMPA 3B42 de la TRMM en Australia, observando una mejora de la precisión de las lluvias regionales.
- Rozante et al. (2010) establecieron una metodología para corregir estimaciones de precipitación satelital con mediciones pluviométricas, denominada MERGE (unir), que consiste en llenar los vacíos espaciales combinando dicha información, seguida por una interpolación de distancias ponderadas y un procedimiento de suavizado iterativo (Barnes, 1973). Sus resultados muestran que en zonas con una alta densidad de observaciones pluviométricas, el rendimiento de su técnica es equivalente a simplemente promediar los valores en las estaciones que están dentro de las celdas del mallado correspondiente a la base de datos satelital. Sin embargo, en zonas con escasas observaciones, MERGE muestra resultados superiores.

México representa un reto ya que carece de información de lluvia proporcionada por radares en todo el país, la distribución espacial de estaciones climáticas es de baja densidad y no uniforme, lo que genera productos de calidad pobre y alta incertidumbre al momento de interpolar, además de que ambas fuentes sufren grandes vacíos temporales. Por lo anterior, es de gran utilidad asimilar precipitación estimada de satélite, para así obtener una base de datos más completa, incluso para eventos ciclónicos, y poder disponer de cifras y analizar el comportamiento de la precipitación generada por CT's, hasta en zonas no instrumentadas del país.

4.2. Datos

Se utilizó la metodología que propusieron Rozante et al. (2010), con la que se fusionó información de 2 conjuntos de datos de lluvia.

El primero de ellos corresponde al producto TMPA 3B42 RT V.7 de la TRMM (ver [sección 2.5.2](#) para más detalles), en adelante 3B42 RT, que está disponible en la referencia TRMM_3B42RT, 2015.

Al segundo lo integran los registros completos de mediciones diarias de precipitación de todas las estaciones climáticas del país, obtenidos del CLICOM (Climate Computing Project, o Proyecto Computarizado del Clima), el cual es un sistema de software que maneja la base de datos climatológica de México y es administrado por el SMN. Cada una de las estaciones tiene diferentes periodos de mediciones, pero se pueden encontrar valores desde 1920. Dicha información está disponible en la referencia CLICOM, 2015.

Además se usaron los datos descritos en el capítulo anterior, o sea el 3B42 y las trayectorias del IBTrACS (ver [sección 3.2](#) para más detalles).

Es importante aclarar que la principal diferencia entre el 3B42 y el 3B42 RT, radica en que éste último no pasó por ningún tipo de calibración con sensores de otros satélites, ni correcciones hechas con los registros globales de estaciones pluviométricas del GPCC (Global Precipitation Climatology Centre, o Centro de Climatología para la Precipitación Global) como el primero, pero que se justifica su uso ya que se asimiló con información de la red pluviométrica nacional.

Para el análisis en este capítulo se consideró a un par de eventos ciclónicos, que son Alex y Karl, ocurridos en 2010 (ver Tabla 1.2 de la [sección 1.7](#) para más detalles). Ambos CT's causaron daños devastadores: reportaron grandes pérdidas materiales y económicas, generaron severas inundaciones, ocasionaron largos cortes de energía eléctrica, lamentablemente fueron responsables de la muerte de al menos 16 y 14 víctimas respectivamente, bastantes personas desaparecidas y muchísimas más damnificadas (ATH, 2012).

4.3. Metodología

De acuerdo a la identificación de los días en que los CT's generaron lluvia directamente en el territorio nacional (ver [sección 3.3](#) para más detalles), los periodos correspondientes a los eventos Alex y Karl son del 26 de junio al 1 de julio y del 14 al 18 de septiembre respectivamente. Con ayuda de un programa hecho en MATLAB, se seleccionaron de los registros completos obtenidos del CLICOM a las estaciones climatológicas con datos para dichos periodos (Figura 4.2) y se obtuvieron los acumulados de precipitación para cada una de ellas y para cada CT.

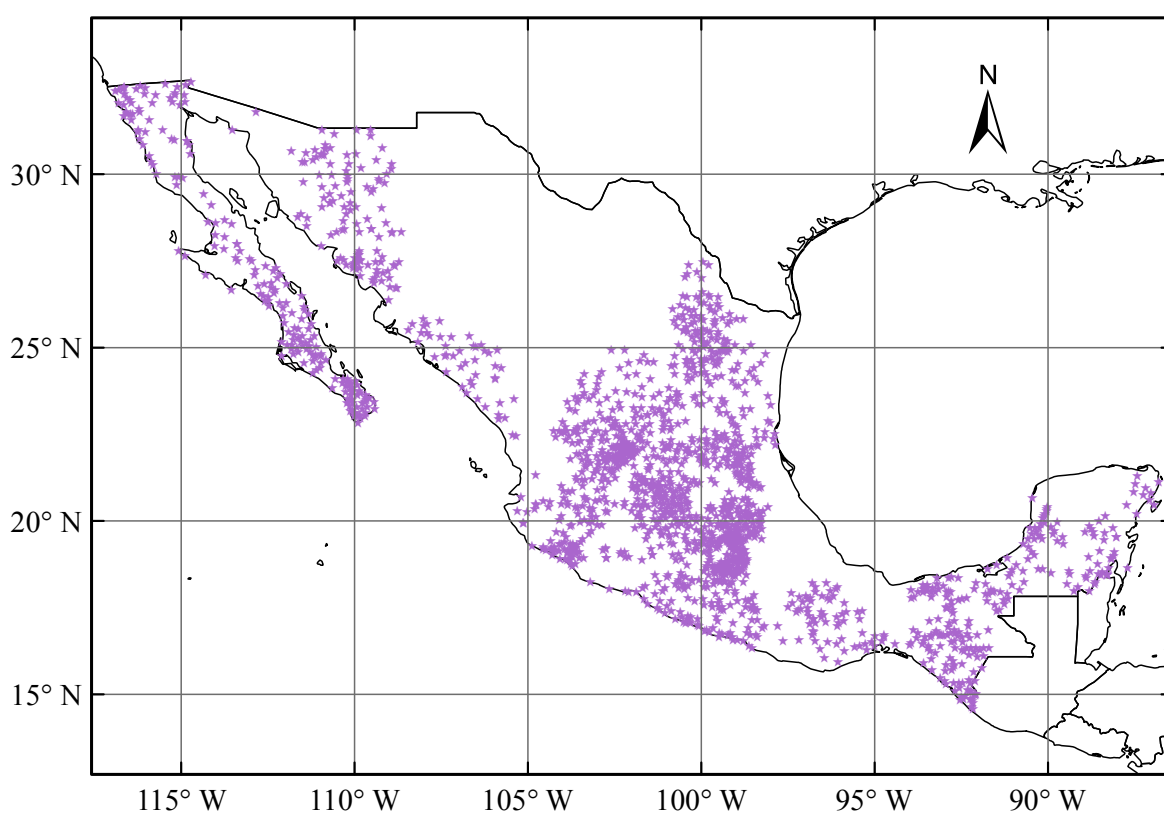


Figura 4.2. Estaciones climatológicas con registros para los CT's Alex y Karl ocurridos en 2010.

En cuanto a los productos 3B42 RT y 3B42, se seleccionaron los archivos correspondientes a cada periodo y la extracción de su información se hizo conforme a lo explicado en la metodología del capítulo anterior (ver [sección 3.3](#) para más detalles). Posteriormente, se calcularon con MATLAB los acumulados de lluvia por celdas para cada CT y producto. Para lo anterior fue necesario tomar en cuenta que debido a la resolución temporal trihoraria del 3B42 RT, se tenían ocho archivos por día.

4.3.1. Técnica MERGE

Este método requiere una malla de iguales características a las celdas del 3B42 RT, y ya que todos los productos TMPA de la TRMM tienen la misma resolución espacial, se usó la misma que en el capítulo anterior para el 3B42 (ver Figura 3.3 y su descripción en la [sección 3.3](#)), pues también es útil para este producto.

Para el empleo de esta técnica se aplicó la siguiente secuencia de pasos a cada evento ciclónico considerado:

1. Identificar las celdas de la malla en las que se presenten una o más estaciones climatológicas (Figura 4.3).

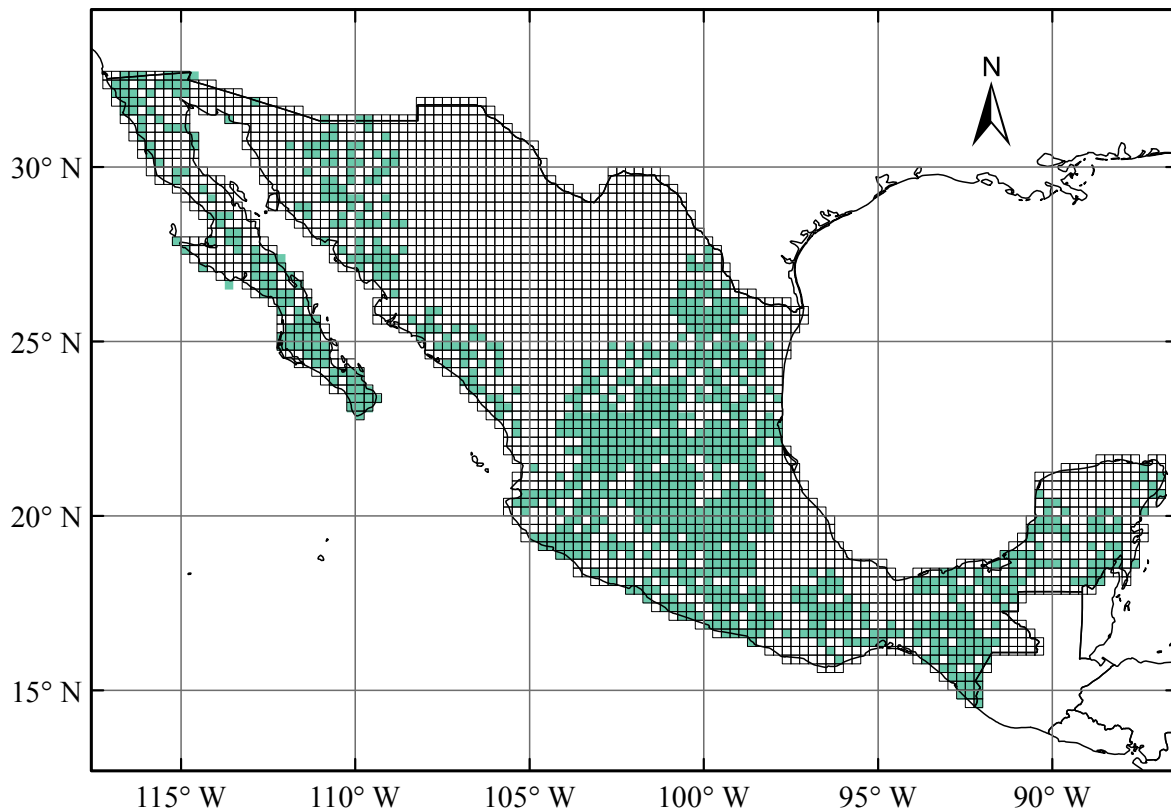


Figura 4.3. Identificación de celdas en donde hay estaciones climatológicas.

En las celdas verdes de la Figura 4.3 no se toman en cuenta los datos del 3B42 RT, si no que se usan las observaciones puntuales, de manera que se les asigne el máximo peso a las mediciones pluviométricas.

- Hacer una lista con la información de las celdas restantes de la malla y las estaciones climatológicas según la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Información necesaria para la técnica MERGE.

Fuente	Longitud (x)	Latitud (y)	Precipitación (p)
3B42 RT	Coordenadas de los centroides de las celdas en grados y decimales		Acumulados por celdas en mm
	⋮	⋮	⋮
CLICOM	Coordenadas de las estaciones climatológicas en grados y decimales		Acumulados por estación en mm
	⋮	⋮	⋮

- Procesar la información de la Tabla 4.1 usando el análisis objetivo de Barnes. Éste fue implementado mediante una función en MATLAB, a la que se le indicó que los resultados del producto combinado tuvieran la misma resolución espacial que los centroides de las celdas del mallado del 3B42 RT (centroides de salida).

4.3.2. Análisis objetivo de Barnes

Ésta técnica interpoló a la precipitación acumulada usando las correcciones sucesivas del esquema de Barnes (1973) y Koch et al. (1983), el cual está representado en la Figura 4.4.

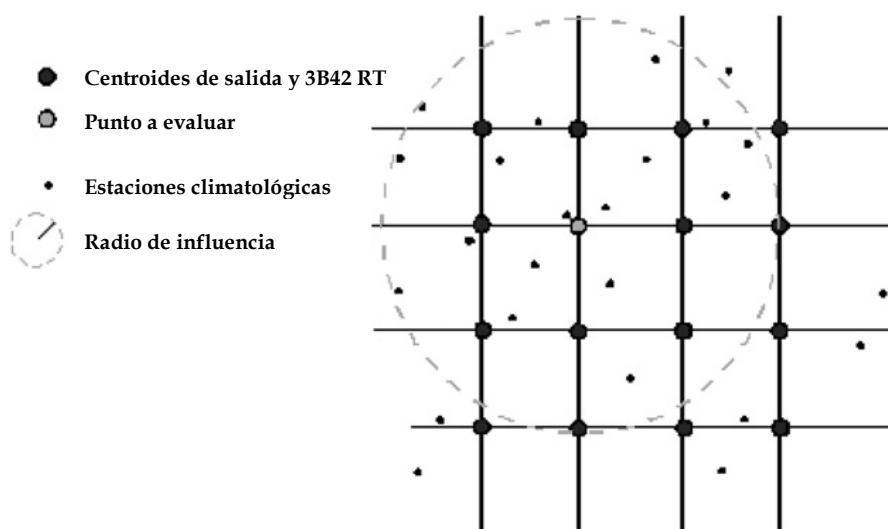


Figura 4.4. Sección que ilustra el dominio donde se aplica el método y los diferentes elementos utilizados en el análisis objetivo de Barnes (Rozante et al., 2010).

Los pesos (W_n) son asignados a cada estación climatológica, dentro de un radio de influencia (R), en función a la distancia (x_n, y_n) a un centroide de salida de la malla (i, j):

$$W_n = \exp\left(-\frac{d_n^2}{R^2}\right) \quad (3)$$

Donde d es la distancia entre la estación y el centroide o punto a evaluar.

La primera iteración se calcula entonces como:

$$g_1(i, j) = \frac{\sum_{n=1}^N W_n S(x_n, y_n)}{\sum_{n=1}^N W_n} \quad (4)$$

Donde $S(x_n, y_n)$ son los valores de las observaciones del 3B42 RT que están dentro del radio de influencia.

Después se añade un término de corrección a la primera etapa, con la introducción de un parámetro de convergencia (γ), el cual controla el suavizado, determinado por:

$$g_2(i, j) = g_1(i, j) + \frac{\sum_{n=1}^N W'_n [S(x_n, y_n) - S^1(x_n, y_n)]}{\sum_{n=1}^N W'_n} \quad (5)$$

Donde $S^1(x_n, y_n)$ es el valor calculado en el punto de evaluación n , a través de una interpolación bilineal de las cuatro observaciones adyacentes, encontradas en la misma iteración. Aquí, W'_n es el peso original corregido por γ y está dado por:

$$W'_n = \exp\left(-\frac{d_n^2}{\gamma R^2}\right) \quad (6)$$

Los valores para γ pueden estar entre 0 y 1, sin embargo, generalmente son asumidos entre 0.2 y 0.5 en diversos estudios (Koch et al., 1983; Accadia et al., 2003; Sinha et al., 2006). Para determinar el valor óptimo de γ , en el análisis de cada evento ciclónico, se realizaron pruebas variando su valor entre 0.1 y 0.9, calculando el RMSE (Root Mean Square Error, o Error Medio Cuadrático). Los valores de γ para los cuales se presentaron los menores errores fueron para Alex y Karl de 0.3 y 0.9 respectivamente, obteniendo entonces los MERGE definitivos.

Los acumulados de precipitación para las estaciones climatológicas, acumulados de lluvia por celdas para los productos 3B42 RT y 3B42, así como el ajuste MERGE, obtenidos tanto para Alex como para Karl, se cargaron en ArcMap, se obtuvieron sus raster y se generaron sus mapas para la presentación de los resultados aplicando IDW (ver [sección 3.3.1](#) para más detalles), donde se optó por utilizar $N = 12$ y un tamaño de celda de 0.05 grados.

4.4. Resultados

Los mapas comparativos de la distribución en territorio Mexicano de la precipitación acumulada para los 4 diferentes conjuntos de datos utilizados, 3 provenientes de diversas fuentes de información de lluvia y un producto generado mediante una asimilación, para los CT's Alex y Karl, se muestran en las Figuras 4.5 y 4.6 respectivamente.

Para el periodo en el que Alex generó precipitación directamente en el país, el mapa que exhibe la interpolación de los acumulados puntuales de las mediciones pluviométricas (Figura 4.5 a), indica que las regiones con los mayores valores (entre 221 y 700 mm) se localizan en las partes noreste y sureste de México.

Debido a la trayectoria de Alex, dibujada en los mapas de la Figura 4.5 con línea morada, después de su primera entrada a la República Mexicana, se presentan patrones de lluvia heterogéneos en la Península de Yucatán, Chiapas, Tabasco y en las bandas este de Veracruz y Oaxaca. También se puede ver una amplia área con cifras altas de precipitación en el sector norte de la costa hacia el Golfo de México, atribuida al paso del CT después de su segundo impacto, la cual está adecuadamente representada para los estados de Tamaulipas y Nuevo León, pero no para las zonas en Coahuila o Chihuahua, debido a la escasa o nula presencia de estaciones climatológicas del CLICOM con registros en estas entidades (ver Figura 4.2 de la [sección 4.3](#)).

Por otro lado, los mapas b y c de la Figura 4.5, donde se visualizan los acumulados de lluvia para el 3B42 RT y el 3B42 respectivamente, enseñan una mejor distribución, con afectaciones en demarcaciones similares, a pesar de que ambos subestiman la lluvia, sobretodo el de la Figura 4.5 c, con descensos cuantitativos de aproximadamente 50 %, en comparación con la Figura 4.5 a.

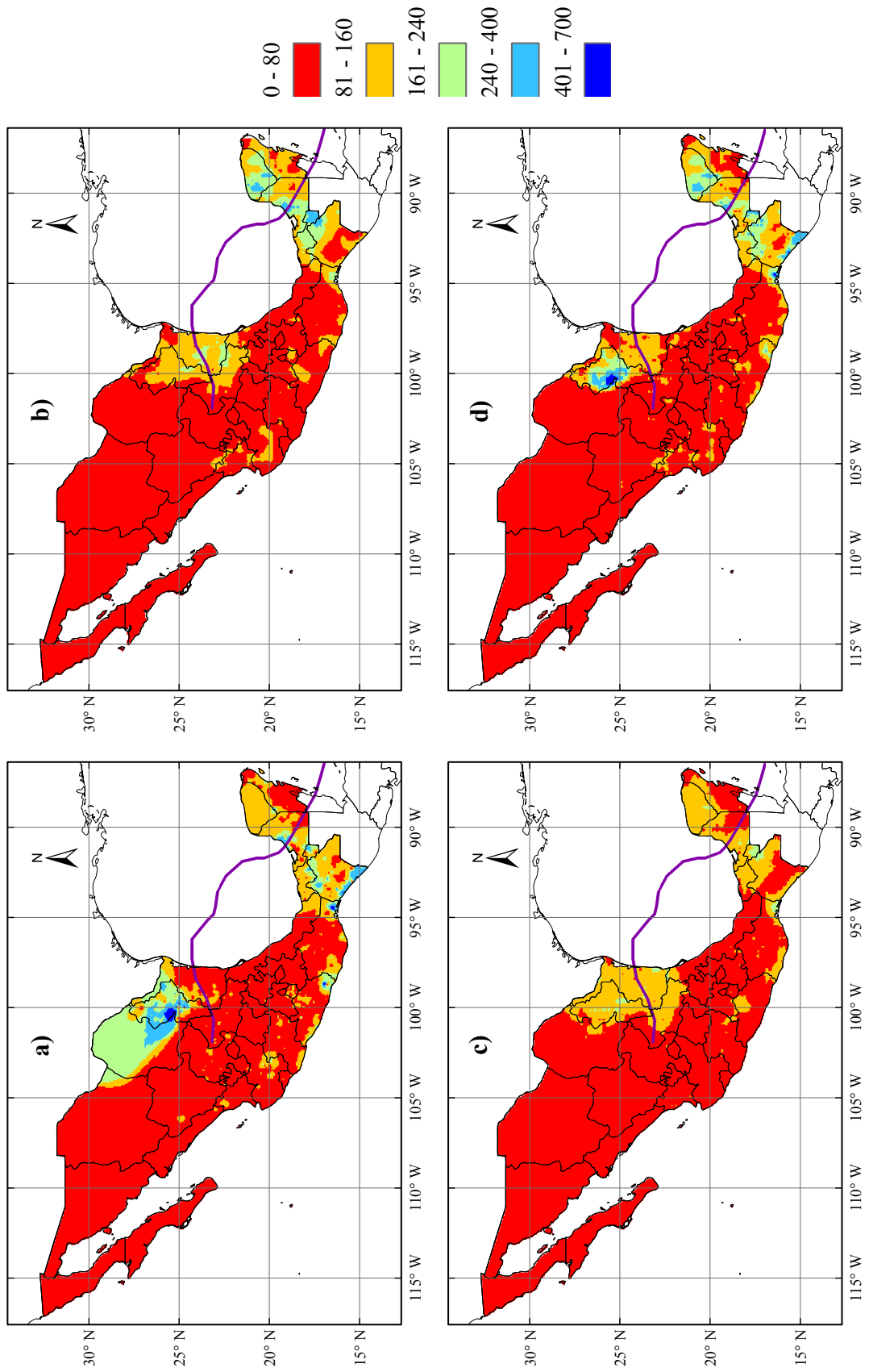


Figura 4.5. Sensibilidad de los acumulados de precipitación en mm para el CT Alex a 4 conjuntos de datos: a) estaciones climatológicas del CLICOM, b) TMPA 3B42 RT de la TRMM, c) TMPA 3B42 de la TRMM y d) MERGE generado con la técnica de Rozante et al. (2010).

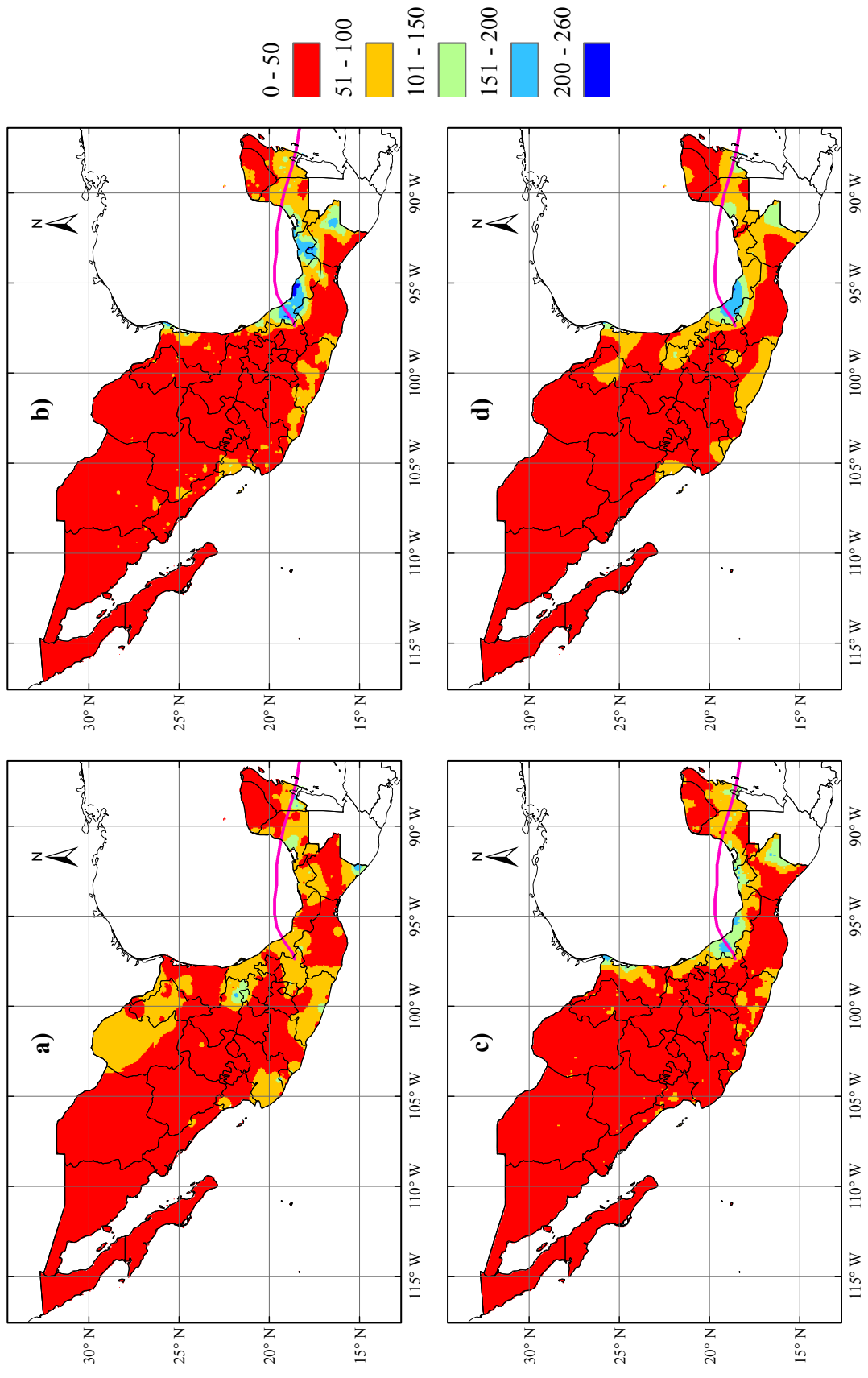


Figura 4.6. Sensibilidad de los acumulados de precipitación en mm para el CT Karl a 4 conjuntos de datos: a) estaciones climatológicas del CLICOM, b) TMPA 3B42 RT de la TRMM, c) TMPA 3B42 de la TRMM y d) MERGE generado con la técnica de Rozante et al. (2010).

La unión con la técnica MERGE, entre la información de mediciones de precipitación de la red climatológica nacional y los datos de estimaciones de lluvia satelital no calibrados de la TRMM, hecha para Alex e ilustrada en la Figura 4.5 d, arroja una distribución de acumulados suavizada, y más apegada a los valores pluviométricos, aunque claramente la combinación hace correcciones significativas.

En oposición a lo encontrado para Alex, los acumulados de las estaciones climatológicas (Figura 4.6 a) para los días en que dejó caer precipitación el CT Karl en la parte continental de México, muestran una escala menor en cuanto a la cantidad general de lluvia, al cotejarlos contra los obtenidos para el 3B42 RT y el 3B42 (mapas b y c de la Figura 4.6, respectivamente).

Claramente el recorrido que hizo Karl (línea rosa en los mapas de la Figura 4.6), que también tocó tierra en un par de ocasiones, produjo manchas de precipitación en toda la sección inferior de la costa hacia el Golfo de México.

Finalmente, el ajuste MERGE realizado para Karl y exhibido en la Figura 4.6 d, tiene una mayor aproximación a los valores de los acumulados correspondientes al 3B42 RT, sugiriendo que el método establecido por Rozante et al. (2010), corrige la distribución espacial de la lluvia siguiendo principalmente a las cifras más grandes de los conjuntos de datos implicados.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

El principal objetivo de esta tesis fue caracterizar a la lluvia ciclónica en territorio Mexicano, mediante la cuantificación de su contribución a la precipitación total, que se hizo para un periodo de 16 años comprendido entre 1998 y 2013, utilizando el conjunto de datos de estimación satelital del producto pre-calibrado TMPA 3B42 de la TRMM. Como se muestra en la Figura 5.1, la diferencia entre las series de lluvia anual promediada espacialmente en el país, tanto del 3B42 (línea azul), como de las mediciones obtenidas por la red nacional de estaciones climatológicas del CLICOM (línea verde), es bastante baja en nueve de diez años (2000 - 2009), por lo tanto, se puede decir que los resultados calculados con información de la TRMM son confiables.

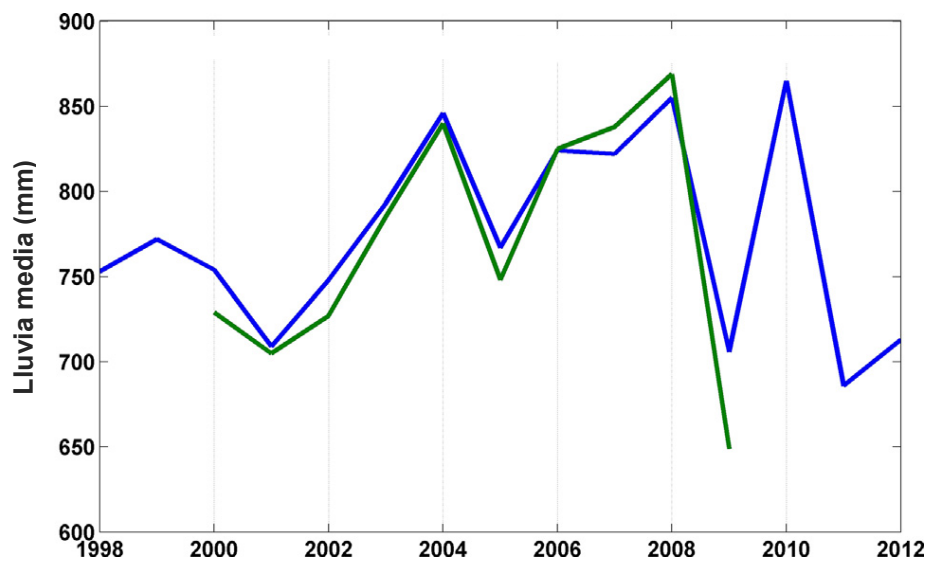


Figura 5.1. Series temporales de lluvia media anual en México para el TMPA 3B42 de la TRMM (línea azul) y los registros de las estaciones climatológicas del CLICOM (línea verde).

En general, la información derivada de sensores remotos tiende a sobre o subestimar a las cifras puntuales de pluviómetros, aunque ninguno de estos comportamientos se observó durante el periodo de validación de la Figura 5.1.

Los mapas de precipitación anual expuestos en la Figura 3.4 (ver [sección 3.4](#)), incluyen la acumulación de los diferentes tipos de lluvia según su origen o mecanismo de generación: ciclónica o frontal, orográfica y convectiva, para lo que también es válido el uso del 3B42, de acuerdo con Nesbitt y Zipser (2003) y Berg et al. (2006), que indican que las evaluaciones a grandes escalas temporales, ya sean estacionales o anuales, de las diversas fuentes de precipitación son buenas.

En la [sección 3.5](#) se encontró que la lluvia debida a los CT's (Figura 3.5) puede variar considerablemente año tras año. Se ha sugerido en algunos estudios (Larson et al., 2005; Jiang y Zipser, 2010) que las oscilaciones de las condiciones meteorológicas y la frecuencia de eventos ciclónicos, pueden ser en gran medida explicadas con los patrones climáticos tales como el ENSO (El Niño Southern Oscillation, u Oscilación del Sur por El Niño) y el AO (Arctic Oscillation, u Oscilación del Ártico), que ocurren en los hemisferios sur y norte respectivamente. Los años del periodo estudiado en este trabajo, que están dominados por el fenómeno de El Niño (fase cálida del ENSO), son 2002, 2004 y 2006, que de hecho corresponden a los que presentan el menor número de CT's, con 3, 3 y 4 eventos respectivamente (ver Figura 1.16 de la [sección 1.7](#)), mientras que aquellos regidos por La Niña (fase fría del ENSO) fueron 1999 y 2011, quienes tuvieron actividad ciclónica moderada.

Tanto la distribución anual de CT's, como la cantidad de precipitación acumulada para cada uno de los eventos analizados, tuvieron también grandes fluctuaciones. Por ejemplo, 14 CT's produjeron lluvia en la República Mexicana en 2013, pero la llegada simultánea de 2 de ellos en septiembre (ver Figura 3.7 de la [sección 3.6](#)), Manuel e Ingrid, originó intensas precipitaciones, contabilizadas como el 49 % de la lluvia total por CT's y el 16 % de la precipitación total, calculadas para ese año.

Las conexiones entre los rasgos tan variables de los CT's, como su frecuencia, intensidades máximas de lluvia (Figura 3.10 abajo, [sección 3.6](#)) y precipitación atribuida a ellos, implican que la predicción de sus peligros y sus subsecuentes daños, generados por la velocidad de sus vientos, marea de tormenta, oleaje e inundaciones, pueden ser una tarea muy compleja, debido a la respuesta altamente no lineal entre tales propiedades.

En la Figura 3.9 de la [sección 3.6](#), se exhiben los valores de la contribución anual por CT's en México, cuyos valores mínimo, medio y máximo fueron 4 % (en 2004), 12 %, y 24 % (en 2013) respectivamente, y no se observó tendencia alguna, aplicando la prueba no paramétrica de Mann Kendall, durante el periodo de análisis. Sin embargo, para ese lapso de tiempo, si se detectó tendencia creciente en el número anual de ciclones que impactaron territorio nacional (Figura 1.16, [sección 1.7](#)), lo que coincide con investigaciones previas que señalan que la actividad ciclónica se ha vuelto más prominente en las últimas décadas (Lau et al., 2008; Peduzzi et al., 2012). Es importante apuntar que es en la suma de todos los tipos de eventos al año donde se presenta el aumento creciente, y no en la frecuencia de los grupos por separado (DT's, TT's, H1's, etc.; ver Figura 1.18, [sección 1.7](#)), o en las series de contribución anual por categorías (Figura 3.10 arriba, [sección 3.6](#)).

En los recuadros que muestran la distribución de la contribución anual por CT's, y en el mapa de la aportación promedio de lluvia ciclónica para los 16 años considerados, en territorio Mexicano, de la Figura 3.6 y la Figura 3.11 ([sección 3.6](#)) respectivamente, se visualiza una baja a media dependencia, con cifras que están entre 0 y 20 % en la mayor parte del país, mientras que en la zona más árida, la Península de Baja California (ver Figura 3.4, [sección 3.4](#)), se ubican las máximas estimaciones, recibiendo de 80 a 100 % en algunos años y tasas promedio de entre 40 y 50 %.

Lo mencionado en el párrafo anterior no está totalmente en desacuerdo con los resultados y valores obtenidos por Jiang y Zipser (2010) y Prat y Nelson (2013a) de aproximadamente 55 % y 60 % de aportaciones promedio respectivamente para la Península de Baja California, aunque si difieren un poco, lo que se puede deber a diversos factores tales como:

1. Periodo de análisis diferente: Jiang y Zipser (2010) y Prat y Nelson (2013a) cuantificaron la contribución por CT's de 1998 - 2006 y 1998 - 2009 respectivamente, mientras que en este trabajo fue de 1998 a 2013, considerando 4 y 7 años más respectivamente.
2. Uso de otros productos de estimación satelital: Se utilizó el TMPA 3B42 V.7 de la TRMM al igual que Prat y Nelson (2013a), pero Jiang y Zipser (2010) se basaron en los TCPF y 2A25, también de la TRMM.

3. Cambio en la contribución media: Específicamente para la Península de Baja California, la aportación promedio entre 1998 y 2009, decreció de 4.2 % a 2.9 % para 2010 - 2013.

Estos 3 puntos podrían explicar el por qué las estimaciones calculadas en esta investigación se encuentran por debajo de las cifras de los estudios previos mencionados, no obstante se está de acuerdo con la conclusión de que las regiones con condiciones climatológicas secas, son las principales beneficiadas por la precipitación que dejan los CT's (Prat y Nelson, 2013a).

Otros sectores que resaltan en la Figura 3.11 (sección 3.6) con aportaciones medias en el intervalo de 20 a 30 %, son aquellos cercanos a la costa norte del Golfo de México y las bandas encontradas en las partes norte y sur con el Océano Pacífico. Aunque el TMPA 3B42 V.7 de la TRMM haya sido mejorado para que estimara con mayor precisión en áreas montañosas en comparación con versiones anteriores (Barros et al., 2000; Dinku et al, 2010), aún se podría tener sesgo en México, debido a las condiciones orográficas que prevalecen en territorio nacional (Figura 1.1, sección 1). Lo anterior pudiera explicar el tamaño de la delgada franja localizada al sur del país, ya que la Sierra Madre del Sur está a sólo unas decenas de km de distancia de la costa. Por el contrario, la extensa porción superior que da hacia el Golfo de México, se caracteriza por amplias tierras bajas y planicies de inundación, sumando que la Sierra Madre Oriental está a mucha mayor separación del mar. Sin embargo, al comparar las demarcaciones de mayores contribuciones promedio (intervalos arriba del 20 %) con las elevaciones de la República Mexicana, vemos que dichas zonas coinciden con las más susceptibles a los efectos de los CT's (Rosengaus et al., 2002).

En este trabajo también se consideró la importancia que tiene el comparar la lluvia extraída de datos satelitales con registros pluviométricos, así como con resultados de la combinación de ambas fuentes. Por esa razón, se cotejaron los acumulados de los 3 conjuntos utilizados en esta tesis y las asimilaciones obtenidas para un par de eventos ciclónicos (ver Figura 4.5 y Figura 4.6). Para estos últimos ajustes se utilizó la técnica MERGE que propusieron Rozante et al. (2010), con la que se unió información del producto no calibrado TMPA 3B42 RT de la TRMM con mediciones de estaciones

climatológicas del sistema CLICOM, en la parte continental de México. Las diferencias que surgieron durante este análisis son atribuidas a las siguientes razones:

- a) Vacíos espaciales y temporales en la red climatológica nacional.
- b) Baja probabilidad de detección de valores extremos del 3B42 RT.
- c) Ligera subestimación y sobrestimación de los TMPA de la TRMM para Alex y Karl respectivamente.
- d) Factores de reducción de escala.

Ambos MERGE cerraron las brechas que existían en la distribución puntual de precipitaciones, arrojando una repartición suavizada, haciendo mejoras significativas, aunque haciendo correcciones siguiendo principalmente a las cifras más grandes de los conjuntos de datos implicados.

El uso de estimaciones satelitales de precipitación puede ser una herramienta fiable para evaluar la contribución de la lluvia por CT's en escalas temporales anuales, mientras que para periodos de tiempo más cortos, por ejemplo para eventos ciclónicos específicos, se pueden encontrar de moderados a grandes sesgos, por lo tanto, se deben tener expectativas reservadas y aplicar cautelosamente estos instrumentos en investigaciones con fines y propósitos parecidos. Además:

- No se encontró una clara relación entre las IMP (Intensidades Máximas de Precipitación) diarias observadas por el 3B42 RT y las de estaciones climatológicas (CLICOM) durante los 102 CT's (Figura 5.2 a).
- En general TMPA's de la TRMM subestiman las tasas de lluvia en la mayoría de los casos comparándolas con las mediciones puntuales.
- Las diferencias entre las IMP diarias derivadas del 3B42 menos las del CLICOM (Figura 5.2 b) no se correlacionaron con la elevación de las estaciones, de lo que se infiere que puede no haber magnitudes grandes en los errores al cotejarlos sobre regiones costeras o montañosas.
- Una débil correspondencia se produce entre las VVM (Velocidades de Vientos Máximos) de los CT's y las IMP diarias del 3B42 (Figura 5.2 c).

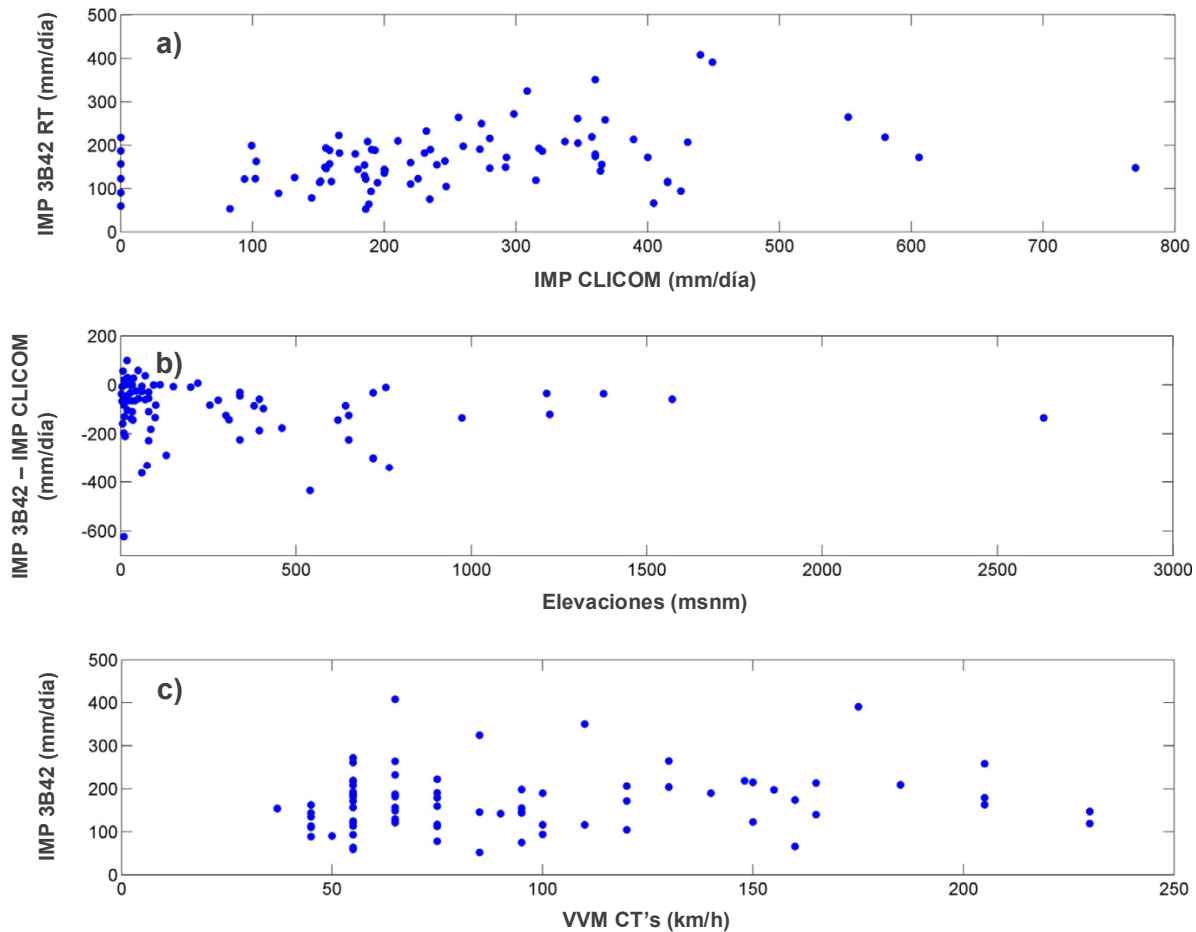


Figura 5.2. Diagramas de dispersión para: a) intensidades máximas de precipitación (IMP) del CLICOM vs las del 3B42RT, b) Elevaciones de las estaciones vs IMP del 3B42 menos IMP del CLICOM, y c) velocidades de vientos máximos (VVM) de los CT's vs IMP del 3B42.

Se encontró evidencia que sugiere que los volúmenes más grandes de lluvia podrían ser generados por cualquier categoría de CT (Figura 3.10 arriba, [sección 3.6](#)), y no sólo por los más intensos (huracanes mayores: H3, H4 y H5), en términos de VVM, lo que contradice la percepción común de algunos autores (Shepherd et al., 2007; Chang et al., 2014), y que contrasta con la relación VVM vs IMP, encontrada por Cervený y Newman (2000).

Líneas futuras de investigación deberían pasar de una caracterización meramente hidrometeorológica de la actividad ciclónica a una descripción más detallada del impacto de la lluvia por CT's en la hidrología superficial y en los procesos de aguas subterráneas, por ejemplo, cuantificar:

- Escurrimiento directo.

- Gasto base.
- Recarga de acuíferos.

Además, se podrían incorporar conjuntos de datos satelitales que estimen humedad del suelo y variaciones del almacenamiento total de agua, que puedan ayudar a esclarecer los controles físicos sobre los cambios de caudales durante las afectaciones de los eventos ciclónicos.

Por otra parte, del reciente lanzamiento a órbita del satélite GPM, sucesor del TRMM, y que le da continuidad a la misión que lleva el mismo nombre que éste último, se espera el monitoreo de la precipitación a una escala más fina, y por lo tanto puede que proporcione estimaciones más precisas también para ciclones. Por ejemplo, hallazgos recientes de que la intensidad de lluvia puede ganar fuerza durante el impacto de los CT's (Dong et al., 2010), serían otra posible orientación de trabajos, empleando los conjuntos de datos de los productos TMPA pero que sean ya del GPM.

Finalmente, otras herramientas de la percepción con sensores remotos montados en satélites, destinadas a la vigilancia de los vientos superficiales en los océanos y de la altimetría de éstos, tales como METOP y Jason-2 (de la OSTM, Ocean Surface Topography Mission, o Misión para la Topografía de la Superficie Oceánica), entre otras, mejorarían sustancialmente el entendimiento de las conexiones que hay entre la magnitud de los CT's, sus riesgos tanto costeros como terrestres, así como las pérdidas que causan.

REFERENCIAS

- Accadia, C., Mariani, S., Casaioli, M., Lavagnini, A., Speranza, A., 2003. Sensitivity of Precipitation Forecast Skill Scores to Bilinear Interpolation and a Simple Nearest-Neighbor Average Method on High-Resolution Verification Grids. *Weather and Forecasting*, 18, 918–932. doi:[http://dx.doi.org/10.1175/1520-0434\(2003\)018<0918:SOPFSS>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0434(2003)018<0918:SOPFSS>2.0.CO;2).
- Adler, R. F., Huffman, G. J., Bolvin, D. T., Curtis, S., Nelkin, E. J., 2000. Tropical Rainfall Distributions Determined Using TRMM Combined with Other Satellite and Rain Gauge Information. *Journal of Applied Meteorology*, 39, 2007–2023. doi:[http://dx.doi.org/10.1175/1520-0450\(2001\)040%3C2007:TRDDUT%3E2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0450(2001)040%3C2007:TRDDUT%3E2.0.CO;2).
- Atallah, E., Bosart, L. F., Aiyyer, A. R., 2007. Precipitation Distribution Associated with Landfalling Tropical Cyclones over the Eastern United States. *Monthly Weather Review*, 135, 2185–2206. doi:<http://dx.doi.org/10.1175/MWR3382.1>.
- ATH, 2012. Análisis de las Temporadas de Huracanes de los años 2009, 2010 y 2011 en México. Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales – Comisión Nacional del Agua. Disponible en:http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/CGS_MN-2-12.pdf.
- Atlas Digital del Agua México, 2012. Sistema Nacional de Información del Agua, Comisión Nacional del Agua. Disponible en: <http://www.conagua.gob.mx/atlas/contexto07.html>.
- Atlas Nacional de Riesgos, 2015. Centro Nacional de Prevención de Desastres. Disponible en: <http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/index.php/riesgos-hidrometeorologicos/ciclones-tropicales-huracanes>.
- Barnes, S. L., 1973. Mesoscale Objective Map Analysis Using Weighted Time-Series Observations. NOAA Technical Memorandum ERL NSSL-62, U.S. Department of Commerce, 60 pp. Disponible en: http://docs.lib.noaa.gov/noaa_documents/OAR/NSSL/NOAA_TM_ERL_NSSL/ERL_NSSL_62.pdf.
- Barros, A. P., Joshi, M., Putkonen, J., Burbank, D. W., 2000. A Study of the 1999 Monsoon Rainfall in a Mountainous Region in Central Nepal Using TRMM Products and Rain Gauge Observations. *Geophysical Research Letters*, 27, 3683–3686. doi:<http://dx.doi.org/10.1029/2000GL011827>.

- Berg, W., L'Ecuyer, T., Kummerow, C., 2006. Rainfall Climate Regimes: The Relationship of Regional TRMM Rainfall Biases to the Environment. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 45, 434-454. doi:<http://dx.doi.org/10.1175/JAM2331.1>.
- Breña-Naranjo, J. A., Pedrozo-Acuña, A., Pozos-Estrada, O., Jiménez-López, S. A., López-López, M. R., 2015. The Contribution of Tropical Cyclones to Rainfall in México. *Physics and Chemistry of the Earth*. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.pce.2015.05.011>.
- Breña-Naranjo, J. A., Pedrozo-Acuña, A., Rico-Ramírez, M. A., 2014. World's Greatest Rainfall Intensities Observed by Satellites. *Atmospheric Science Letters*, 16, 420-424. doi:<http://dx.doi.org/10.1002/asl2.546>.
- Brun, J., Barros, A. P., 2014. Mapping the Role of Tropical Cyclones on the Hydroclimate of the Southeast United States: 2002-2011. *International Journal of Climatology*, 34: 494-517. doi:<http://dx.doi.org/10.1002/joc.3703>.
- CazaHur, 2012. Huracanes - Caza Huracanes o Caza Tormentas. Fenómenos Naturales, Alerta Tierra. Disponible en: <http://www.alertatierra.com/HurCaza.htm>.
- Cervený, R. S., Newman, L. E., 2000. Climatological Relationships between Tropical Cyclones and Rainfall. *Monthly Weather Review*, 128, 3329-3336. doi:[http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493\(2000\)128%3C3329:CRBTCA%3E2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493(2000)128%3C3329:CRBTCA%3E2.0.CO;2).
- Chang, I., Bentley, M. L., Shepherd, J. M., 2014. A Global Climatology of Extreme Rainfall Rates in the Inner Core of Intense Tropical Cyclones. *Physical Geography*, 35, 478-496. doi:<http://dx.doi.org/10.1080/02723646.2014.964353>.
- Chen, X., Kumar, M., McGlynn, B. L., 2015. Variations in Streamflow Response to Large Hurricane-Season Storms in a Southeastern U.S. Watershed. *Journal of Hydrometeorology*, 16, 55-69. doi:<http://dx.doi.org/10.1175/JHM-D-14-0044.1>.
- Chen, Y., Ebert, E. E., Walsh, K. J. E., Davidson, N. E., 2013. Evaluation of TMPA 3B42 Daily Precipitation Estimates of Tropical Cyclone Rainfall over Australia, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118, 11, 966-11, 978. doi:<http://dx.doi.org/10.1002/2013JD020319>.
- Cheng, Z., Chen, L., Liu, Y., Peng, T., 2008. On Characteristics of Spatial and Temporal Distribution of Precipitation Associated with Tropical Cyclones in China from 1960 to 2003 (in Chinese). *Journal of Applied Meteorology*, 18, 427-434.
- Chiang, Y. M., Hsu, K. L., Chang, F. J., Hong, Y., Sorooshian, S., 2007. Merging Multiple Precipitation Sources for Flash Flood Forecasting. *Journal of Hydrology*, 340, 183-196. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.04.007>.

- CLICOM, 2015. Datos Climáticos Diarios con Gráficas del CICESE. Base de Datos Climatológica Nacional (Sistema CLICOM), Servicio Meteorológico Nacional. Disponible en: <http://clicom-mex.cicese.mx/>.
- Collier, C. G., 2002. Developments in Radar and Remote-Sensing Methods for Measuring and Forecasting Rainfall. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 360, 1345-1361. doi:<http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2002.1004>.
- Dare, R. A., Davidson, N. E., McBride, J. L., 2012. Tropical Cyclone Contribution to Rainfall over Australia. *Monthly Weather Review*, 140, 3606-3619. doi:<http://dx.doi.org/10.1175/MWR-D-11-00340.1>.
- Descroix, L., Viramontes, D., Estrada, J., González B., J. L., Asseline J., 2007. Investigating the Spatial and Temporal Boundaries of Hortonian and Hewlettian Runoff in Northern Mexico. *Journal of Hydrology*, 346, 144-158. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.09.009>.
- Dinku, T., Connor, S. J., Ceccato, P., 2010. Comparison of CMORPH and TRMM-3B42 over Mountainous Regions of Africa and South America. *Satellite Rainfall Applications for Surface Hydrology*, 2, 193-204. doi:http://dx.doi.org/10.1007/978-90-481-2915-7_11.
- Dinku, T., Funk, C., Grimes, D., 2009. The Potential of Satellite Rainfall Estimates for Index Insurance. The Earth Institute at Columbia University, 5 pp. Disponible en: http://iri.columbia.edu/~deo/insurance_class_reading/The%20Potential%20of%20Satellite%20Rainfall%20Estimates%20for%20Index%20Insurance.pdf.
- Dinku, T., Hailemariam, K., Maidment, R., Tarnavsky, E., Connor, S., 2014. Combined Use of Satellite Estimates and Rain Gauge Observations to Generate High-Quality Historical Rainfall Time Series over Ethiopia. *International Journal of Climatology*, 34, 2489-2504. doi:<http://dx.doi.org/10.1002/joc.3855>.
- Dong, M., Chen, L., Li, Y., Lu, C., 2010. Rainfall Reinforcement Associated with Landfalling Tropical Cyclones. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 67, 3541-3558. doi:<http://dx.doi.org/10.1175/2010JAS3268.1>.
- Ebert, E. E., Janowiak, J. E., Kidd, C., 2007. Comparison of Near-Real-Time Precipitation Estimates from Satellite Observations and Numerical Models. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88, 47-64. doi:<http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-88-1-47>.
- EOPORTAL, 2015. Earth Observational Portal. Sharing Earth Observation Resources, European Space Agency. Disponible en: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions>.

- ES, 2012. Electromagnetic Spectrum. Publicado bajo licencia CCBY-SA3.0 vía Wikimedia Commons. Disponible en: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electromagnetic_spectrum-es.svg#/media/File:Electromagnetic_spectrum-es.svg.
- Gao, S., Meng, Z., Zhang, F., Bosart, L. F., 2009. Observational Analysis of Heavy Rainfall Mechanisms Associated with Severe Tropical Storm Bilis (2006) after Its Landfall. *Monthly Weather Review*, 137, 1881-1897. doi:<http://dx.doi.org/10.1175/2008MWR2669.1>.
- Gebregiorgis, A., Hossain, F., 2011. How Much Can A Priori Hydrologic Model Predictability Help in Optimal Merging of Satellite Precipitation Products? *Journal of Hydrometeorology*, 12, 1287-1298. doi:<http://dx.doi.org/10.1175/JHM-D-10-05023.1>.
- GFDL/NOAA, 1999. Operational Hurricane Model Forecast of Mitch. Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, National Oceanic and Atmospheric Administration. Disponible en: <http://www.gfdl.noaa.gov/visualizations-hurricanes>.
- Gorenburg, I. P., McLaughlin, D., Entekhabi, D., 2001. Scale-Recursive Assimilation of Precipitation Data. *Advances in Water Resources* 24, 941-953. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0309-1708\(01\)00033-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0309-1708(01)00033-1).
- HISTAMAR, 2005. Ferri Bahía del Espíritu Santo. Historia y Arqueología Marítima. Disponible en: <http://www.histarmar.com.ar/MarinaMercanteExtr/MarinaMercanteMexico/Mercantes/BahiaDelEspirituSanto.htm>.
- Huffman, G. J., Adler, R. F., Bolvin, D. T., Nelkin, E. J., 2009. The TRMM Multi-Satellite Precipitation Analysis (TMPA). *Satellite Rainfall Applications for Surface Hydrology*, 3-22. doi:http://dx.doi.org/10.1007/978-90-481-2915-7_1.
- Huffman, G. J., Bolvin, D. T., Nelkin, E. J., Wolff, D. B., Adler, R. F., Gu, G., Hong, Y., Bowman, K. P., Stocker, E. F., 2007. The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-Global, Multiyear, Combined-Sensor Precipitation Estimates at Fine Scales. *Journal of Hydrometeorology*, 8, 38-55. doi:<http://dx.doi.org/10.1175/JHM560.1>.
- IBTrACS, 2015. International Best Track Archive for Climate Stewardship v03r07. National Centers for Environmental Information, National Oceanic and Atmospheric Administration. Disponible en: <http://www.ncdc.noaa.gov/ibtracs/>.
- INAPESCA, 2014. Temporada de Huracanes 2013. Instituto Nacional de Pesca, Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Disponible en: [http://www.inapesca.gob.mx/portal/documentos/publicaciones/BOLETINES/hidroclimatico/huracanes-2013-boletin-\(julio-octubre%202013\)-2.pdf](http://www.inapesca.gob.mx/portal/documentos/publicaciones/BOLETINES/hidroclimatico/huracanes-2013-boletin-(julio-octubre%202013)-2.pdf).

- IPWG, 2015. International Precipitation Working Group. Coordination Group for Meteorological Satellites, World Meteorological Organization. Disponible en: <http://www.isac.cnr.it/~ipwg/>.
- Jáuregui, E., 1987. Vulnerabilidad de las Costas del NW de México a los Ciclones Tropicales del Pacífico Nororiental. Memorias de la Meteorología, Un Modelo de Cooperación Internacional. Secretaría de Agricultura y de Recursos Hidráulicos, 9-18.
- Jáuregui, E., 2003. Climatology of Landfalling Hurricanes and Tropical Storms in México. *Atmósfera*, Universidad Nacional Autónoma de México, 16, 193-204. Disponible en: <http://www.journals.unam.mx/index.php/atm/article/view/8516/7986>.
- JAXA, 2015. Basic Information About the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Satellite. Japan Aerospace Exploration Agency. Disponible en: http://www.eorc.jaxa.jp/TRMM/about/mechanism/pr/pr_e.htm.
- Jiang, H., Liu, C., Zipser E. J., 2011. A TRMM-Based Tropical Cyclone Cloud and Precipitation Feature Database. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 50, 1255–1274. doi:<http://dx.doi.org/10.1175/2011JAMC2662.1>.
- Jiang, H., Zipser, E. J., 2010. Contribution of Tropical Cyclones to the Global Precipitation from Eight Seasons of TRMM Data: Regional, Seasonal, and Interannual Variations. *Journal of Climate*, 23, 1526–1543. doi:<http://dx.doi.org/10.1175/2009JCLI3303.1>.
- Jiménez E., M., Matías R., L. G., Fuentes M., O. A., Prieto G., R., 2013. Ciclones Tropicales. Centro Nacional de Prevención de Desastres, Fascículo 5, 55 pp. Disponible en: http://www.files.cenapred.gob.mx/es/publicacionesRelevantes/FASCICULO_CICLONES_TROPICALES_2013.pdf.
- Kam, J., Sheffield, J., Yuan, X., Wood, E. F., 2013. The Influence of Atlantic Tropical Cyclones on Drought over the Eastern United States (1980–2007). *Journal of Climate*, 26, 3067–3086. doi:<http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00244.1>.
- Kidd, C., Levizzani, V., 2011. Status of Satellite Precipitation Retrievals. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15, 1109–1116. doi:<http://dx.doi.org/10.5194/hess-15-1109-2011>.
- Knapp, K. R., Kruk, M. C., Levinson, D. H., Diamond, H. J., Neumann, C. J., 2010. The International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS). *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91, 363–376. doi:<http://dx.doi.org/10.1175/2009BAMS2755.1>.
- Knight, D. B., Davis, R. E., 2009. Contribution of Tropical Cyclones to Extreme Rainfall Events in the Southeastern United States. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114, D23102. doi:<http://dx.doi.org/10.1029/2009JD012511>.

- Koch, S. E., desJardins, M., Kocin, P. J., 1983. An Interactive Barnes Objective Map Analysis Scheme for Use with Satellite and Conventional Data. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 22, 1487–1503. doi:[http://dx.doi.org/10.1175/1520-0450\(1983\)022<1487:AIBOMA>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0450(1983)022<1487:AIBOMA>2.0.CO;2).
- Konrad, C. E., Meaux, M. F., Meaux, D. A., 2002. Relationships between Tropical Cyclone Attributes and Precipitation Totals: Considerations of Scale. *International Journal of Climatology*, 22, 237–247. doi:<http://dx.doi.org/10.1002/joc.721>.
- Kummerow, C., Barnes, W., Kozu, T., Shiue, J., Simpson, J., 1998. The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Sensor Package. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 15, 809–817. doi:[http://dx.doi.org/10.1175/1520-0426\(1998\)015<0809:TTRMMT>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0426(1998)015<0809:TTRMMT>2.0.CO;2).
- Kummerow, C., Simpson, J., Thiele, O., Barnes, W., Chang, A. T. C., Stocker, E., Adler, R. F., Hou, A., Kakar, R., Wentz, F., Ashcroft, P., Kozu, T., Hong, Y., Okamoto, K., Iguchi, T., Kuroiwa, H., Im, E., Haddad, Z., Huffman, G., Ferrier, B., Olson, W. S., Zipser, E., Smith, E. A., Wilheit, T. T., North, G., Krishnamurti, T., Nakamura, K., 2000. The Status of the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) after Two Years in Orbit. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 39, 1965–1982. doi:[http://dx.doi.org/10.1175/1520-0450\(2001\)040<1965:TSOTTR>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0450(2001)040<1965:TSOTTR>2.0.CO;2).
- Larson, J., Zhou, Y., Higgins, R. W., 2005. Characteristics of Landfalling Tropical Cyclones in the United States and Mexico: Climatology and Interannual Variability. *Journal of Climate*, 18, 1247–1262. doi:<http://dx.doi.org/10.1175/JCLI3317.1>.
- Lau, K. M., Zhou, Y. P., Wu, H. T., 2008. Have Tropical Cyclones Been Feeding More Extreme Rainfall? *Journal of Geophysical Research, Atmospheres*, 113, D23. doi:<http://dx.doi.org/10.1029/2008JD009963>.
- Lee, M. H., Ho, C. H., Kim, J. H., 2010. Influence of Tropical Cyclone Landfalls on Spatiotemporal Variations in Typhoon Season Rainfall over South China. *Advances in Atmospheric Sciences*, 27, 443–454. doi:<http://dx.doi.org/10.1007/s00376-009-9106-3>.
- Levizzani, V., 2008. Satellite Clouds and Precipitation Observations for Meteorology and Climate. *Water Science and Technology Library*, 63, 49–68. doi:http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-77843-1_3.
- Li, M., Shao, Q., 2010. An Improved Statistical Approach to Merge Satellite Rainfall Estimates and Rain gauge Data. *Journal of Hydrology*, 385, 51–64. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.01.023>.
- Lonfat, M., Marks Jr., F. D., Chen, S. S., 2004. Precipitation Distribution in Tropical Cyclones Using the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Microwave Imager: A Global Perspective. *Monthly Weather Review*, 132, 1645–1660. doi:[http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493\(2004\)132<1645:PDITCU>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493(2004)132<1645:PDITCU>2.0.CO;2).

- Matyas, C. J., 2014. Conditions Associated with Large Rain-Field Areas for Tropical Cyclones Landfalling over Florida. *Physical Geography*, 35, 93-106. doi:<http://dx.doi.org/10.1080/02723646.2014.893476>.
- Maxwell, J. T., Soulé, P. T., Ortégren, J. T., Knapp, P. A., 2012. Drought-Busting Tropical Cyclones in the Southeastern Atlantic United States: 1950–2008. *Annals of the Association of American Geographers*, 102, 259-275. doi:<http://dx.doi.org/10.1080/00045608.2011.596377>.
- Mazzetti, C., Todini, E., 2004. Combining Raingages and Radar Precipitation Measurements Using a Bayesian Approach. *GeoENV IV – Geostatistics for Environmental Applications*, 13, 401-412. doi:http://dx.doi.org/10.1007/1-4020-2115-1_34.
- Michel-Kerjan, E., 2012. How Resilient is Your Country? *Nature*, 491, 497. doi:<http://dx.doi.org/10.1038/491497a>.
- Murillo, D., Ortega, I., Carrillo, J. D., Pardo, A., Rendón, J., 2012. Comparación de Métodos de Interpolación para la Generación de Mapas de Ruido en Entornos Urbanos. *Facultad de Ingenierías, Universidad de San Buenaventura Medellín*, 3, 62-68. Disponible en: <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo;sessionid=3CD4C60C30EE82EE9F2CB879A165CA79.dialnet01?codigo=4694125>.
- Nanding, N., Rico-Ramírez, M. A., Han, D., 2015. Comparison of Different Radar-Raingauge Rainfall Merging Techniques. *Journal of Hydroinformatics*, 17, 422-445. doi:<http://dx.doi.org/10.2166/hydro.2015.001>.
- NASA, 1997. TRMM Coverage Path. National Aeronautics and Space Administration. Disponible en: http://thunder.msfc.nasa.gov/bookshelf/images/trmm_orbit.jpg.
- NASA, 2011. Diagram of the TRMM Instrument's Measurement Path. National Aeronautics and Space Administration. Disponible en: <http://pmm.nasa.gov/image-gallery/diagram-trmm-instruments-measurement-path>.
- NASA, 2015a. TRMM Spacecraft Debris to Re-Enter. National Aeronautics and Space Administration. Disponible en: <http://pmm.nasa.gov/articles/trmm-spacecraft-re-enters-over-tropics>.
- NASA, 2015b. TRMM Basic Information and Instruments. National Aeronautics and Space Administration. Disponible en: <http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/TRMM>.
- Nesbitt, S. W., Zipser, E. J., 2003. The Diurnal Cycle of Rainfall and Convective Intensity according to Three Years of TRMM Measurements. *Journal of Climate*, 16, 1456–1475. doi:<http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442-16.10.1456>.

- Ng, B., Walsh, K., Lavender, S., 2014. The Contribution of Tropical Cyclones to Rainfall in Northwest Australia. *International Journal of Climatology*, 35, 2689-2697. doi:<http://dx.doi.org/10.1002/joc.4148>.
- Nikolopoulos, E. I., Anagnostou, E. N., Hossain, F., 2010. Error Propagation of Satellite-Rainfall in Flood Prediction Applications over Complex Terrain: A Case Study in Northeastern Italy. *Satellite Rainfall Applications for Surface Hydrology*, 215-227. doi:http://dx.doi.org/10.1007/978-90-481-2915-7_13.
- NOAA, 1998. Hurricane Mitch at Peak Intensity on October 26 at 2028 UTC. National Oceanic and Atmospheric Administration. Disponible en: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/93/Hurricane_Mitch_1998_oct_26_2028Z.jpg.
- NOAA, 2010. Marea de Tormenta. Hurricane Research Division, National Oceanic and Atmospheric Administration. Disponible en: http://www.aoml.noaa.gov/hrd/tcfaq/A8_esp.html.
- Nogueira, R. C., Keim, B. D., 2010. Annual Volume and Area Variations in Tropical Cyclone Rainfall over the Eastern United States. *Journal of Climate*, 23, 4363-4374. doi:<http://dx.doi.org/10.1175/2010JCLI3443.1>.
- Nogueira, R. C., Keim, B. D., 2011. Contributions of Atlantic Tropical Cyclones to Monthly and Seasonal Rainfall in the Eastern United States 1960-2007. *Theoretical and Applied Climatology*, 103, 213-227. doi:<http://dx.doi.org/10.1007/s00704-010-0292-9>.
- NPV, 2012. A Diez Años del Huracán Kenna en Puerto Vallarta. *Noticias Puerto Vallarta*. Disponible en: <http://noticiaspv.com/dia-519/>.
- OG, 2015. Órbita Geoestacionaria. Órbitas Alrededor de la Tierra, por Salvador Hernández. Disponible en: <http://f.tqn.com/y/universo/1/L/r/2/-/-/Orbita-geoestacionaria.png>.
- OMM, 2011. Guía de Prácticas Hidrológicas, Volumen I: Hidrología – De la Medición a la Información Hidrológica. Organización Meteorológica Mundial, 168, 324 pp. Disponible en: http://www.whycos.org/chy/guide/168_Vol_I_es.pdf.
- OMM, 2013. Examen de la Temporada de Huracanes Anterior 2012. Informe de México ante el Comité de Huracanes de la Asociación Regional IV de la Organización Meteorológica Mundial. Disponible en: <https://www.wmo.int/pages/prog/www/tcp/documents/Mexico2012.pdf>.
- OP, 2015. Órbita Polar. Órbitas Alrededor de la Tierra, por Salvador Hernández. Disponible en: <http://f.tqn.com/y/universo/1/L/u/2/-/-/Orbita-polar.png>.

- Pedrozo-Acuña, A., Breña-Naranjo, J. A., Domínguez-Mora, R., 2014. The Hydrological Setting of the 2013 Floods in Mexico. *Weather*, 69, 295-302. doi:<http://dx.doi.org/10.1002/wea.2355>.
- Peduzzi, P., Chatenoux, B., Dao, H., De Bono, A., Herold, C., Kossin, J., Mouton, F., Nordbeck, O., 2012. Global Trends in Tropical Cyclone Risk. *Nature Climate Change*, 2, 289-294. doi:<http://dx.doi.org/10.1038/nclimate1410>.
- Prat, O. P., Nelson, B. R., 2013a. Mapping the World's Tropical Cyclone Rainfall Contribution over Land Using the TRMM Multi-Satellite Precipitation Analysis. *Water Resources Research*, 49, 7236-7254. doi:<http://dx.doi.org/10.1002/wrcr.20527>.
- Prat, O. P., Nelson, B. R., 2013b. Precipitation Contribution of Tropical Cyclones in the Southeastern United States from 1998 to 2009 Using TRMM Satellite Data. *Journal of Climate*, 26, 1047-1062. doi:<http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00736.1>.
- Ren, F., Wu, G., Dong, W., Wang, X., Wang, Y., Ai, W., Li, W., 2006. Changes in Tropical Cyclone Precipitation over China, *Geophysical Research Letters*, 33. doi:<http://dx.doi.org/10.1029/2006GL027951>.
- Rodgers, E. B., Adler, R. F., Pierce, H. F., 2001. Contribution of Tropical Cyclones to the North Atlantic Climatological Rainfall as Observed from Satellites. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 40, 1785-1800. doi:[http://dx.doi.org/10.1175/1520-0450\(2001\)040<1785:COTCTT>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0450(2001)040<1785:COTCTT>2.0.CO;2).
- Rosendal, H. E., 1962. Eastern North Pacific Tropical Cyclones 1947-1961. *Mariners Weather Log*, 6, 195-201.
- Rosengaus M., M., 1998. Efectos Destructivos de Ciclones Tropicales. Fundación MAPFRE.
- Rosengaus M., M., Jiménez E., M., Vázquez C., M. T., 2002. Atlas Climatológico de Ciclones Tropicales en México. Centro Nacional de Prevención de Desastres. Disponible en: <http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/37.pdf>.
- Rozante, J. R., Soares-Moreira, D., G. Goncalves, L. G., Vila, D. A., 2010. Combining TRMM and Surface Observations of Precipitation: Technique and Validation over South America. *Weather and Forecasting*, 25, 885-894. doi:<http://dx.doi.org/10.1175/2010WAF2222325.1>
- RyATCT, 2015. Resúmenes y Análisis de las Temporadas de Ciclones Tropicales Anuales. Grupo de Información Meteorológica para la Protección Civil, Centro Nacional de Previsión del Tiempo - Gerencia del Servicio Meteorológico Nacional - Comisión Nacional del Agua. México. Disponibles en: http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=38&Itemid=46.

- Semire, F. A., Mohd-Mokhtar, R., Ismail, W., Mohamad, N., Mandeep, J. S., 2012. Ground Validation of Space-Borne Satellite Rainfall Products in Malaysia. *Advances in Space Research*, 50, 1241-1249. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2012.06.031>.
- Shepherd, J. M., Grundstein, A., Mote, T. L., 2007. Quantifying the Contribution of Tropical Cyclones to Extreme Rainfall along the Coastal Southeastern United States. *Geophysical Research Letters*, 34, L23810. doi:<http://dx.doi.org/10.1029/2007GL031694>.
- Siete24, 2014. Odile Llena Presas de Sinaloa por Mara Rivera. Noticias Siete24 de México. Disponible en: <http://www.siete24.mx/odile-llena-presas-de-sinaloa/>.
- Sinha, S. K., Narkhedkar, S. G., Mitra, A. K., 2006. Barnes Objective Analysis Scheme of Daily Rainfall over Maharashtra (India) on a Mesoscale Grid. *Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México*, 19, 109-126. Disponible en: <http://www.journals.unam.mx/index.php/atm/article/view/8555>.
- Sorooshian, S., AghaKouchak, A., Arkin, P., Eylander, J., Foufoula-Georgiou, E., Harmon, R., Hendrickx, J. M. H., Imam, B., Kuligowski, R., Skahill, B., Skofronick-Jackson, G., 2011. Advanced Concepts on Remote Sensing of Precipitation at Multiple Scales. *American Meteorological Society*, 92, 1353-1357. doi:<http://dx.doi.org/10.1175/2011BAMS3158.1>.
- Sorooshian, S., Gao, X., Hsu, K., Maddox, R. A., Hong, Y., Gupta, H. V., Imam, B., 2002. Diurnal Variability of Tropical Rainfall Retrieved from Combined GOES and TRMM Satellite Information. *Journal of Climate*, 15, 983-1001. doi:[http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015%3C0983:DVOTRR%3E2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015%3C0983:DVOTRR%3E2.0.CO;2).
- Tapiador, F. J., Turk, F. J., Petersen, W., Hou, A. Y., García-Ortega, E., Machado, L. A. T., Angelis, C. F., Salio, P., Kidd, C., Huffman, G. J., De Castro, M., 2012. Global Precipitation Measurement: Methods, Datasets and Applications. *Atmospheric Research*, 104-105, 70-97. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2011.10.021>.
- Thompson, I., 2005. Premio Pulitzer por la Cobertura de la Tragedia del Huracán Katrina, *The Dallas Morning News*. Disponible en: <http://www.20minutos.es/fotos/actualidad/ganadores-del-pulitzer-1013/>.
- TRMM, 2015. Índice de Datos de la TRMM. National Aeronautics and Space Administration. Disponible en: <ftp://disc3.nascom.nasa.gov/data/s4pa/>.
- TRMM_3B42_daily, 2015. Índice de Datos Diarios del Producto TMPA 3B42 V.7. Disponible en: ftp://disc3.nascom.nasa.gov/data/s4pa/TRMM_L3/TRMM_3B42_daily/.
- TRMM_3B42RT, 2015. Índice de Datos del Producto TMPA 3B42 RT V.7. Disponible en: ftp://disc3.nascom.nasa.gov/data/s4pa/TRMM_RT/TRMM_3B42RT.007/.

- UEPC - Sinaloa, 2006. Archivo Fotográfico de los Daños Generados por el Huracán Lane en el Estado de Sinaloa. Archivo Interno de la Unidad Estatal de Protección Civil de Sinaloa.
- Vila, D. A., G. Goncalves, L. G., Toll, D. L., Rozante, J. R., 2009. Statistical Evaluation of Combined Daily Gauge Observations and Rainfall Satellite Estimates over Continental South America. *Journal of Hydrometeorology*, 10, 533-543. doi:<http://dx.doi.org/10.1175/2008JHM1048.1>.
- Villarini, G., Smith, J. A., Baeck, M. L., Marchok, T., Vecchi, G. A., 2011. Characterization of Rainfall Distribution and Flooding Associated with U.S. Landfalling Tropical Cyclones: Analyses of Hurricanes Frances, Ivan, and Jeanne (2004). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116, D23116. doi:<http://dx.doi.org/10.1029/2011JD016175>.
- Wang, S. Y., Chen, T. C., 2008. Measuring East Asian Summer Monsoon Rainfall Contributions by Different Weather Systems over Taiwan. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47, 2068-2080. doi:<http://dx.doi.org/10.1175/2007JAMC1821.1>.
- Yokoyama, C., Takayabu, Y. N., 2008. A Statistical Study on Rain Characteristics of Tropical Cyclones Using TRMM Satellite Data. *Monthly Weather Review*, 136, 3848-3862. doi:<http://dx.doi.org/10.1175/2008MWR2408.1>.
- Yu, Z., Yu, H., Chen, P., Qian, C., Yue, C., 2009. Verification of Tropical Cyclone-Related Satellite Precipitation Estimates in Mainland China. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48, 2227-2241. doi:<http://dx.doi.org/10.1175/2009JAMC2143.1>.