



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

EVALUACIÓN DE DAÑOS EN LA INFRAESTRUCTURA DE QUINTANA ROO Y YUCATÁN CAUSADOS POR EL HURACÁN WILMA

T E S I S

PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

PRESENTA:

ORLANDO DE JESÚS ALVA GONZÁLEZ

DIRECTOR DE TESIS:

EDUARDO REINOSO ANGULO

Ciudad Universitaria, D.F., 2015





UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA
COMITÉ DE TITULACIÓN
FING/DICyG/SEAC/UTIT/044/15

Señor
ORLANDO DE JESÚS ALVA GONZÁLEZ
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor DR. EDUARDO REINOSO ANGULO, que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

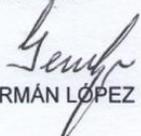
"EVALUACIÓN DE DAÑOS EN LA INFRAESTRUCTURA DE QUINTANA ROO Y YUCATÁN CAUSADOS POR EL HURACÁN WILMA"

- I. INTRODUCCIÓN
- II. ANTECEDENTES
- III. DESCRIPCIÓN DEL EVENTO
- IV. EVALUACIÓN DE DAÑOS
- V. NORMATIVIDAD
- VI. CONCLUSIONES
- VII. BIBLIOGRAFÍA
- VIII. ANEXOS

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria a 29 de mayo del 2015.
EL PRESIDENTE


M.I. GERMÁN LÓPEZ RINCÓN

GLR/MTH*gar.

DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS

A Dios, por ser mi guía en los momentos de prueba y mi fuerza en tiempos de adversidad. Por todas las bendiciones otorgadas para alcanzar mis objetivos y encaminarme en los senderos de la vida.

A mis padres, Francisco y Rosa María, cuyos consejos y enseñanzas son la base de mis principios y representan la razón principal de mis logros. Su amor, trabajo y sacrificio han hecho posible mi existencia y mi proyecto de vida.

A mis hermanos, Aida y Javier por las palabras de aliento, su cariño y el apoyo incondicional que me han dado.

A mis grandes amigos y compañeros, que me han acompañado a lo largo de mi carrera y con los que he compartido grandes experiencias y triunfos.

Agradezco profundamente a la Universidad Nacional Autónoma de México, en especial a la Facultad de Ingeniería, por brindarme la inigualable oportunidad de llevar a cabo mi formación profesional en sus aulas.

Agradezco ampliamente al Instituto de Ingeniería de la UNAM, así también a la asesoría pero sobre todo la confianza y el apoyo del Dr. Eduardo Reinoso Angulo y del Dr. Miguel A. Jaimes Téllez para la realización de esta tesis.

ÍNDICE GENERAL

Introducción.....	1
1. ANTECEDENTES.....	3
1.1 Ciclones tropicales	3
1.1.1 Formación	3
1.1.2 Clasificación.....	4
1.1.3 Estructura.....	4
1.2 Huracanes con impactos previos en la península de Yucatán	5
1.2.1 Huracanes significativos	7
2. DESCRIPCIÓN DEL EVENTO	10
2.1 Desarrollo del meteoro	10
2.2 Efectos del huracán.....	13
2.2.1 Velocidades de viento generadas	13
2.2.2 Estimación de las velocidades de viento en la región.....	15
2.2.3 Precipitación	17
2.2.4 Marea de tormenta	20
3. EVALUACIÓN DE DAÑOS	22
3.1 Introducción	22
3.2 Daños ocasionados en la península de Yucatán.....	22
3.3 Edificaciones.....	30
3.3.1 Instituciones educativas.....	30
3.3.2 Comercios y oficinas	32
3.3.3 Hospitales e infraestructura de salud.....	34
3.3.4 Hoteles y condominios.....	36
3.3.5 Plazas comerciales.....	40
3.4 Estructuras industriales	41
3.4.1 Agencias de autos.....	41
3.4.2 Estaciones de servicio (Gasolineras)	44
3.4.3 Naves comerciales	46
3.5 Sistemas extendidos	49
3.5.1 Aeropuertos.....	49
3.5.2 Carreteras y puentes.....	51
3.5.3 Infraestructura eléctrica	53

3.5.4 Infraestructura portuaria y playas.....	55
3.5.5 Infraestructura de telecomunicaciones	59
3.6 Vivienda.....	60
4. NORMATIVIDAD.....	64
4.1 Normatividad previa al impacto del huracán Wilma.....	64
4.1.1 Reglamentos de construcción municipales	64
4.1.2 Manual de obras civiles de la CFE: Diseño por viento (1993)	66
4.2 Normatividad posterior al impacto del huracán Wilma.....	70
4.2.1 Actualizaciones y modificaciones en reglamentos municipales	70
4.2.2 Actualización al Manual de obras civiles de CFE: Diseño por viento (2008)	72
5. CONCLUSIONES	74
BIBLIOGRAFÍA.....	77
ANEXOS	82

INTRODUCCIÓN

En el mundo existen diversos fenómenos naturales que pueden causar enormes pérdidas humanas y materiales, entre los cuales se encuentran los fenómenos hidrometeorológicos, caracterizados por su amplia área de impacto y los cuantiosos daños que generan durante su recorrido cada año en diferentes partes del orbe.

México es altamente vulnerable a este tipo de eventos, específicamente en sus litorales, debido a su localización entre dos de las grandes regiones de formación de ciclones tropicales (Pacífico y Atlántico Norte). Esta situación se agrava si se toma en cuenta la presencia de grandes asentamientos humanos en las costas del país, lo que incrementa el riesgo de pérdida de vidas y daños a la infraestructura que repercuten en las actividades económicas a nivel local e incluso nacional.

La península de Yucatán es reconocida por ser una región de alto desarrollo económico estadísticamente, con importantes atractivos turísticos tanto naturales como artificiales. Es también una de las regiones del país que se ve comúnmente afectada por el impacto de fenómenos hidrometeorológicos de baja a gran intensidad, a raíz de su ubicación geográfica y relieve. En los últimos 50 años diversos huracanes han impactado a la península, dejando a su paso importantes pérdidas económicas y humanas, así como; afectaciones al medio ambiente y a la sociedad, principalmente en su propiedad y fuentes de ingresos.

Entre los huracanes más importantes que han tocado tierra se encuentran Janett en 1955, Gilbert en 1988 y Wilma en 2005. De los anteriores, Wilma destaca por su gran intensidad y tiempo de afectación. Es considerado el huracán más costoso en los estados de Quintana Roo y Yucatán.

Ante la situación actual en la que se encuentra la península de Yucatán y considerando los antecedentes de impactos previos, es necesario llevar a cabo un análisis sobre los efectos que tienen los huracanes en la infraestructura de la región, con el fin de obtener información que ayude a realizar acciones para mitigar dichos efectos en el futuro, en pro de la seguridad e integridad de la población y su entorno.

El objetivo de este trabajo es conocer el comportamiento de los diferentes tipos de infraestructura ante los efectos provocados por el huracán Wilma de 2005, esto mediante la evaluación de los daños registrados en los estados de Quintana Roo y Yucatán. También se tiene como finalidad determinar y analizar los principales factores en la generación de los daños a las estructuras afectadas.

Otro propósito de esta tesis es revisar los reglamentos y manuales de construcción previos y posteriores al impacto de Wilma, poniendo énfasis en los parámetros de diseño por viento para elementos estructurales y no estructurales.

En la primera parte de este trabajo, se da una breve descripción de las características y el desarrollo de un ciclón tropical, así como los diferentes métodos de observación, determinación de intensidad y predicción de su trayectoria. Además, se mencionan los huracanes de mayor

intensidad que han impactado a la península de Yucatán y se analizan las estadísticas de pérdidas humanas, daños materiales y velocidad de los vientos durante el paso de los meteoros.

El segundo capítulo detalla las características particulares del huracán Wilma, dentro de la cuales están su historia meteorológica, recorrido e impacto en tierra, entre otros. De igual manera se describen los efectos del huracán con base en información proveniente de instituciones nacionales y extranjeras en los que se incluyen al Servicio Meteorológico Nacional y el Centro Nacional de Huracanes de los Estados Unidos. Por medio de mapas, gráficos y tablas se muestran características y datos de dichos efectos.

En el tercer capítulo se lleva cabo la evaluación de los daños. En primer lugar se tiene el listado de los daños de los que se recabó información así como la clasificación de las estructuras dañadas por sectores; también se muestran diferentes mapas con la ubicación de cada uno de los registros en los estados de Quintana Roo y Yucatán. Posteriormente se hace la identificación de los daños a la estructuras, describiendo a detalle las fallas o colapsos de diversos elementos, junto con las posibles causas y factores en la aparición de dichos daños. Lo anterior se realizó con base en imágenes y fotografías tomadas pocos días después del paso del Wilma por la península, de igual manera se tomó información de reportes gubernamentales y de prensa. Además de la descripción de las fallas, se hace una revisión del estado actual de las estructuras que resultaron afectadas en 2005, verificando si se tuvieron cambios en sus configuraciones estructurales y no estructurales.

Posteriormente en el capítulo cuarto se revisarán las diversas normativas vigentes durante 2005 en los municipios que resultaron más afectados por Wilma. El análisis se enfoca principalmente en los parámetros de diseño para los efectos ocasionados por un ciclón. Se hace una comparativa entre las normativas antes y después del evento, identificando si se tuvo la creación de nuevos reglamentos y normas, así como cambios y actualizaciones significativas en los criterios de diseño y seguridad de las estructuras en las normativas ya existentes.

Finalmente, el capítulo 5 contiene las conclusiones de esta tesis en donde se mencionan los factores meteorológicos y de diseño que fueron determinantes en las afectaciones evaluadas; el tipo y características de los daños más comunes en la infraestructura y las ubicaciones en donde se concentraron dichos daños. Además, se hacen observaciones respecto a la normatividad de las construcciones que eran aplicadas en los municipios afectados en 2005, así como también se dan recomendaciones al diseño y a los materiales usados en los distintos tipos de infraestructura.

1. ANTECEDENTES

1.1 Ciclones tropicales

Un ciclón es una circulación atmosférica cerrada que se centra en una zona de baja presión, se forma principalmente sobre aguas tropicales y sub-tropicales. Se caracteriza por su gran área de impacto, los cuales provocan lluvias abundantes, oleaje elevado y vientos intensos. En el mundo existen diversas regiones ciclónicas en donde se desarrollan los ciclones, dependiendo de cada región el fenómeno adquiere diferentes denominaciones. En el océano Pacífico y el océano Atlántico se les conoce como Huracán.

1.1.1 Formación

Actualmente, la formación de los ciclones tropicales sigue siendo objeto de investigación y aun no se conoce al fenómeno en su totalidad. La *Atlantic Oceanographic and Meteorological Laboratory* menciona que para la generación de un ciclón tropical debe existir la combinación de diversos factores meteorológicos. El primero de ellos es la temperatura del agua presente en los océanos tropicales y subtropicales, la cual debe ser mayor a los 26.5°C. A dicha temperatura el agua se evapora rápidamente y eventualmente se condensa, lo que genera una liberación de energía que da fuerza al sistema. Otro factor es la humedad la cual debe ser alta a una altura media de la troposfera para propiciar perturbaciones. El perfil de temperaturas en la columna atmosférica debe ser potencialmente inestable, es decir, la temperatura en la columna debe disminuir rápidamente con la altura, tal que pueda sustentar la convección del aire húmedo. Los ciclones se forman al menos a 5° de latitud del ecuador para que el efecto de Coriolis concentre los vientos hacia el centro de baja presión y con ello generar una circulación cerrada en sentido antihorario en el caso del hemisferio norte. La cortante vertical del viento (cambio en la magnitud del viento horizontal con la altura) debe ser baja para que la convección del ciclón no se rompa y se disipe el sistema. Por último, debe pre-existir una perturbación atmosférica de baja presión como puede ser una onda tropical.

La temporada de huracanes en la región del Atlántico comienza el 1 de junio y finaliza el 30 de noviembre, en el caso del Pacífico comienza el 15 de mayo y termina también el 30 de noviembre. Estos periodos están definidos basados en la estadísticas de huracanes pasados aunque la formación se puede dar en cualquier época del año.

Los ciclones tropicales comienzan su desarrollo como depresiones tropicales en donde se incrementa la velocidad del viento en la superficie asociada a la existencia de una zona de baja presión. Posteriormente la depresión se desarrolla al aumentar la velocidad del viento entre los 63 y los 117 km/h convirtiéndose en tormenta tropical. Después el sistema adquiere más fuerza y los vientos superan los 120 km/h, por lo tanto ya se cataloga como huracán cuya área nubosa puede tener una extensión entre los 500 y 900 km de diámetro, produciendo lluvias intensas. El ojo del huracán alcanza normalmente un diámetro que varía entre 24 y 40 km y la velocidad del viento puede llegar incluso hasta los 370 km/h.

1.1.2 Clasificación

Los huracanes son clasificados según la intensidad del viento con la escala de Saffir- Simpson desarrollada en 1969 en el Centro Nacional de Huracanes de los Estados Unidos. La escala cuenta con 5 niveles en orden ascendente (Tabla 1.1)

Tabla 1.1 Escala de Saffir – Simpson (The Saffir-Simpson Hurricane Wind Scale NHC-NOAA)

Nivel	Velocidad del viento (km/h)	Marea de Tormenta (m)	Presión central (mbar)
Depresión Tropical	0 - 62	<0.86	>980
Tormenta Tropical	63 - 117	0.86 - 1	>980
Huracán Categoría 1	119 - 153	1.2 - 1.5	980 - 994
Huracán Categoría 2	154 - 177	1.8 - 2.4	965 - 979
Huracán Categoría 3	178 - 208	2.7 - 3.7	945 - 964
Huracán Categoría 4	209 - 251	4.0 - 5.5	920 - 944
Huracán Categoría 5	>252	≥5.5	≤920

1.1.3 Estructura

Un ciclón tropical tiene tres componentes principales (National Weather Service, Fig. 1.1):

1. Ojo: Es el centro del sistema con un diámetro entre los 20 y 60 km. Se caracteriza por ser una zona despejada con cierta calma relativa y vientos descendentes con velocidades no mayores a los 24 km/h. Es también la zona donde se presenta la menor presión atmosférica del sistema.
2. Pared del ojo: Es un anillo de tormentas eléctricas que produce fuertes lluvias y es también donde se tienen los vientos más fuertes.
3. Bandas de lluvias: Consisten en bandas curvadas de nubes y tormentas que se desvanecen lejos de la pared del ojo en forma de espiral. Las bandas pueden producir fuertes ráfagas de viento y lluvia. Esta área puede tener un diámetro entre los 300 y los 900 km.

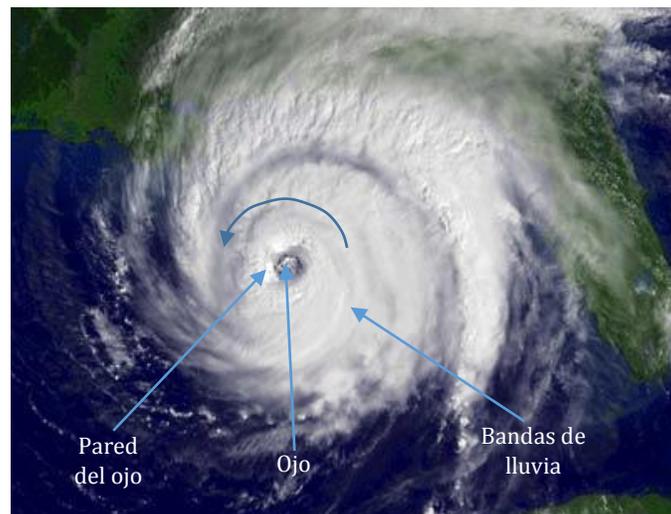


Fig. 1.1. Componentes de un huracán

1.2 Huracanes con impactos previos en la península de Yucatán

La península de Yucatán es la porción que divide el golfo de México del mar Caribe en el extremo sureste de América del Norte y la parte norte de América Central y que cubre un territorio de 139,897 kilómetros cuadrados.

Según la información que se tiene en la base de datos de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), desde 1950 hasta 2014 se formaron 731 sistemas en la región del Atlántico Norte, el Caribe y el Golfo de México. Dentro de estos sistemas, solo 41 han impactado a la península de Yucatán y 15 han llegado al nivel de Huracán (Tabla 1.2).

Tabla 1.2. Huracanes y Tormentas que han impactado en la península de Yucatán.

Nombre	Categoría	Lugar de entrada a tierra	Año	Vientos Máximos en Impacto [km/h]	Pérdidas Humanas
Charlie	3	Cozumel - Playa del Carmen, Q. Roo	1951	110	1
Hilda	3	Chetumal - Cozumel, q. Roo	1955	180	-
Janet	5	Chetumal, Q. Roo	1955	280	500
Inez	4	N de Telchac Puerto	1966	130	-
Beulah	2	Cozumel, Q. Roo	1967	160	11
Ella	DT - 3	Akumal, Q. Roo	1970	55	-
Greta	DT	Telchac Pto, Yuc.	1970	55	-
Agnes	DT	(Formación en tierra)	1972	45	-
Brenda	DT - 1	Cancún, Q. Roo	1973	93	10
Carmen	4	Punta Herradura, Q. Roo	1974	222	4
Eloise	TT	Pto. Morelos, Q. Roo	1975	85	-
Henri	DT	Pto. Morelos, Q. Roo	1979	45	-
Hermine	TT	Sacxan, Q. Roo	1980	83	30
Gilberto	5	Pto. Morelos, Q. Roo	1988	287	-
Keith	TT	Cancún, Q. Roo	1988	110	-
Diana	TT - 2	Chetumal, Q. Roo	1990	110	139
Gert	TT - 1	Chetumal, Q. Roo	1993	165	42
Opal	DT	Espíritu Santo, Q. Roo	1995	55	19
Roxanne	3 - DT	Tulum, Q. Roo	1995	185	14
Dolly	1	F.C. Puerto, Q. Roo	1996	110	14
Mitch	DT - TT	Cd. Hidalgo, Chis.	1998	65	9
Katrina	DT	45 km NNW de Chetumal, Q. Roo	1999	45	-
Gordon	DT	Tulum, Q. Roo	2000	55	-
Keith	TT	Chetumal, Q. Roo	2000	75	-
Chantal	TT	Chetumal, Q. Roo	2001	100	-
Isidore	3	Telchac Pto, Yuc.	2002	201	2
Claudette	TT	25km SSW de Cancún, Q. Roo	2003	93	-
Cindy	DT	10 km W de F.C. Puerto, Q. Roo	2005	55	-
Emily	4	20 km N de Tulum, Q. Roo	2005	212	-
Stan	TT	F.C. Puerto, Q. Roo	2005	75	-
Wilma	4	Cozumel - Playa del Carmen, Q. Roo	2005	240	8

Dean	5	Puerto Bravo, Q. Roo	2007	260	14
Arthur	TT	Chetumal, Q. Roo	2008	65	-
Dolly	TT	Laguna Nichupté, Q. Roo	2008	85	1
Ida	1	80 km E Cancún, Q. Roo	2009	150	-
Alex	TT	90 km SW de Chetumal, Q. Roo	2010	65	-
Karl	TT	15 km NE de Chetumal, Q. Roo	2010	100	-
Richard	DT	155 km ESE de Cd. Del Carmen, Camp.	2010	50	-
Rina	TT	30 km W de Cozumel, Q. Roo	2011	95	-
Ernesto	2	Mahahual, Q. Roo	2012	160	12
Karen	TT	Formación cerca de la península	2013	100	-

La península de Yucatán es muy susceptible al embate de un huracán debido al clima tropical que presenta y a su ubicación entre los mares del Caribe, el Atlántico y el Golfo de México. Uno de los rasgos más peculiares de la península es la ausencia de prominencias morfológicas de importancia, de tal forma que el 90% de su superficie está a menos de 200 metros de altitud, por ello, generalmente los sistemas que ingresan a esta zona pierden poca energía. Es por ello que las afectaciones más importantes se dan por vientos, precipitaciones e inundaciones. Es necesario analizar si existe alguna tendencia en la intensidad de los eventos que impactan en la península (Fig. 1.2).

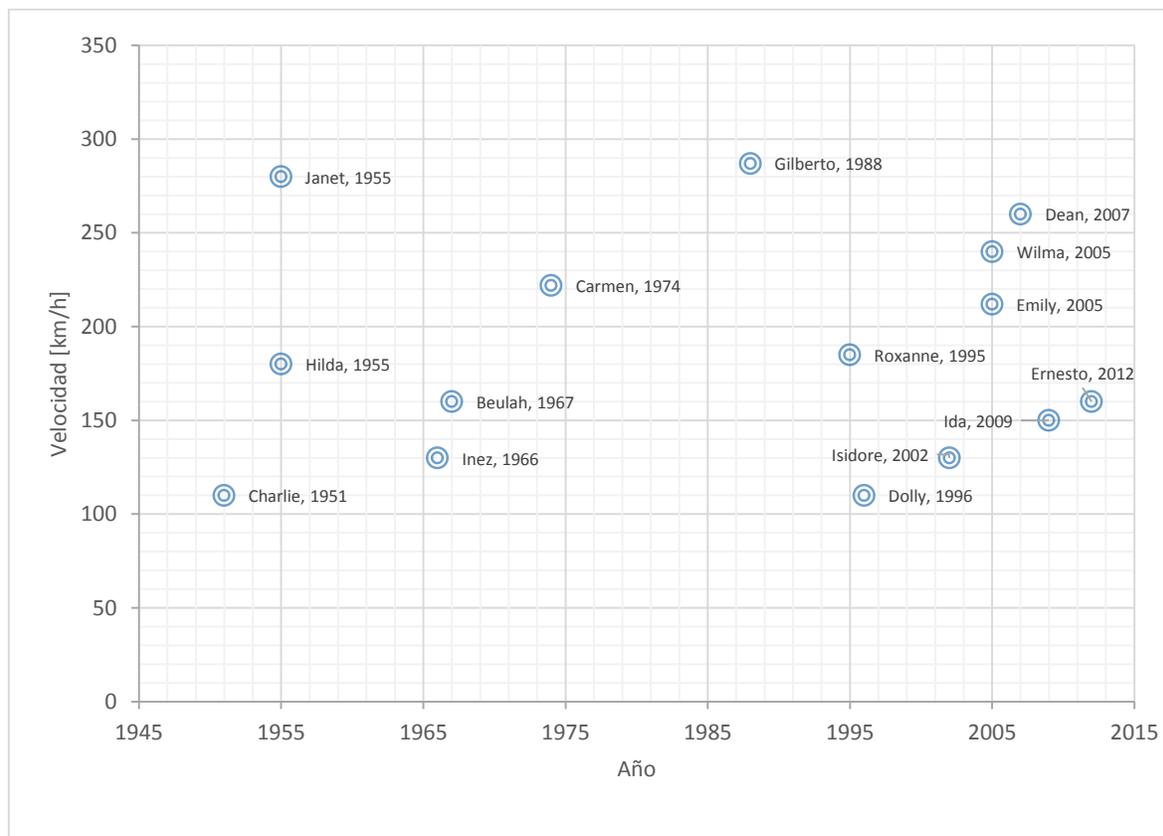


Fig. 1.2. Velocidad en la pared de cada huracán en impacto en la península de Yucatán

Como se observa en la Fig. 1.2, no se encontraron tendencias que indiquen que la intensidad y la velocidad de los vientos de los huracanes aumenten en los últimos años.

De igual manera se analizaron el número de víctimas provocadas por cada huracán que tocó tierra en la península.

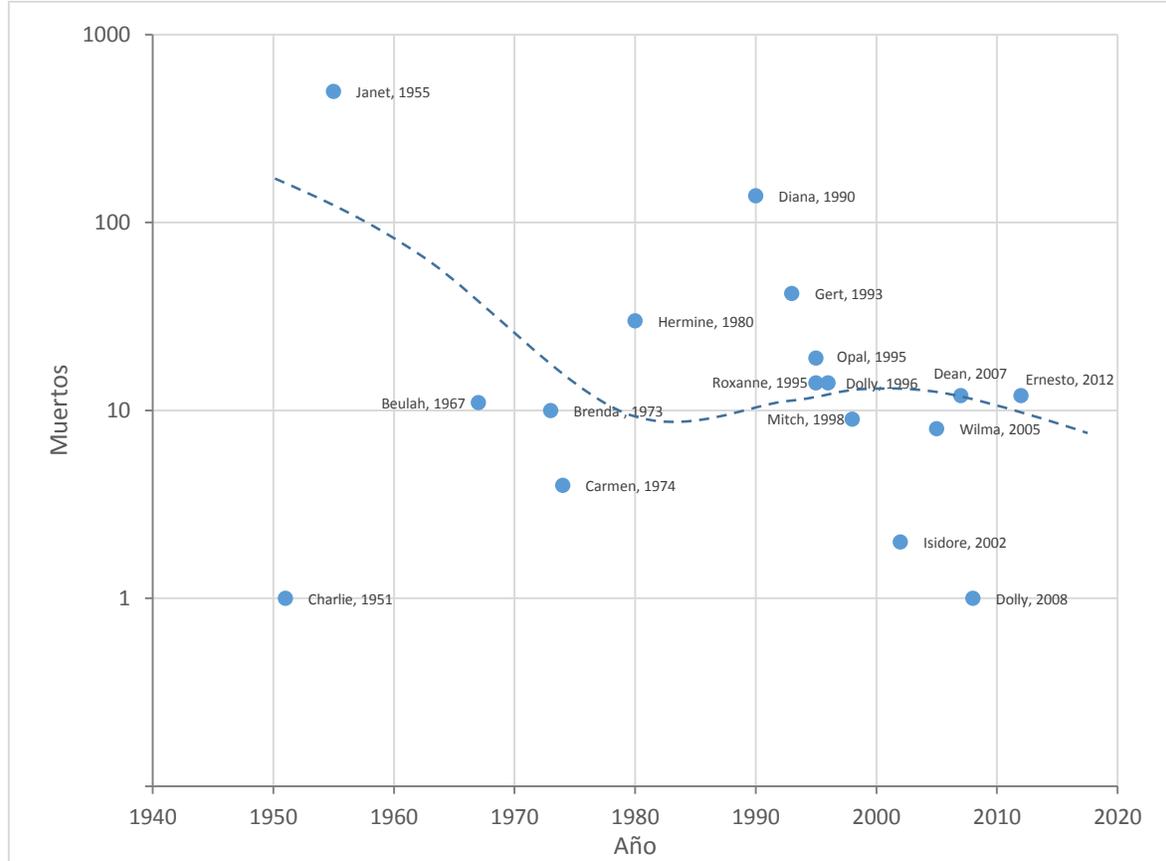


Fig. 1.3. Número de muertos provocados por los huracanes a su paso por la península

En la Fig. 1.3 se observa que Janet en 1955 fue el huracán más mortífero registrado, aunque el dato no está del todo verificado ya que hay pocas referencias y es un número aproximado. En los años restantes, se identifica una tendencia a la baja en los decesos, tomando en cuenta que la población ha ido aumentando durante el último medio siglo en los estados que se encuentran en la península. La mayoría de los decesos son debido a inundaciones al interior, naufragios o accidentes. Después del huracán Dolly no se tienen reportadas muertes causadas de forma directa o indirectamente a un ciclón tropical, esto debido a mejor infraestructura, medidas de prevención, alerta oportuna ante fenómenos meteorológicos y a la ejecución de los planes de emergencia por parte de las autoridades y la población en general.

1.2.1 Huracanes significativos

A continuación se describen algunos de los huracanes más significativos, así como sus efectos en la península de Yucatán.

1.2.1.1 Huracán Janet (1955)

El huracán Janet se formó a partir de una onda tropical el 21 de septiembre de 1955 al este de las Antillas Menores, el sistema se desplazó hacia el oeste a través del mar Caribe aumentando su intensidad, el 27 de septiembre alcanzó su intensidad máxima ubicándolo en la Categoría 5 (Saffir- Simpson), el huracán siguió desplazándose sobre las Islas del Cisne hasta tocar tierra en Chetumal Quintana Roo, el 28 de septiembre de 1955 a las 01:00hr tiempo local, donde se registró una presión barométrica de 914mb en el ojo. La última lectura del anemómetro del aeropuerto de Chetumal fue de 280 km/h antes de colapsar. Janet siguió su trayectoria hacia el oeste sobre tierra lo que causó que disminuyera su intensidad a Categoría 2 hasta ingresar al Golfo de Campeche el día 28 a las 09:00 hora local. Nuevamente Janet tocó tierra el 29 de septiembre a las 22.00 UTC a 80 km al norte de Veracruz como huracán Categoría 2. En tierra el huracán se debilitó a tormenta tropical debido al relieve montañoso hasta disolverse en ese mismo día.

Janet dejó daños graves en la zona de la costera de Quintana Roo, causando 500 muertes y dejando a la ciudad de Chetumal completamente destruida con solo 4 edificaciones intactas en toda la localidad.

1.2.1.2 Huracán Beulah (1967)

Beulah comenzó su actividad como depresión tropical el 5 de septiembre de 1967 al este de las Antillas Menores, el día 6 se convirtió en tormenta tropical y rápidamente para el día siguiente ya había alcanzado la categoría de huracán, días después alcanzó la Categoría 4 de Saffir-Simpson con vientos de 240 km/h. El huracán se debilitó a tormenta tropical en su paso por las islas del caribe, pero nuevamente tomó fuerza al ingresar al mar. Beulah tocó tierra en Cozumel la noche del 16 de septiembre como huracán Categoría 2 con vientos de 160 km/h. El huracán se movió al Golfo de México donde incrementó su fuerza convirtiéndose en huracán Categoría 5 para tocar tierra nuevamente en Brownsville, Texas cerca de la desembocadura del Rio Bravo.

El 40% de las viviendas en Cozumel fueron destruidas, así como varios hoteles resultaron gravemente dañados. Se reportaron 11 personas fallecidas, así como más de 30,000 damnificados.

1.2.1.3 Huracán Gilberto (1988)

Fue el huracán más intenso registrado en el Atlántico Norte hasta esa fecha, siendo superado por Wilma en 2005. Se originó de una onda tropical a este de Barbados el 8 de septiembre, al siguiente día se convirtió en tormenta tropical, siguió su curso hacia el oeste-noroeste en el mar caribe donde aumentó su intensidad a Categoría 3 (Saffir-Simpson) el 10 de septiembre. Después de tocar tierra en Jamaica, Gilberto tuvo una rápida intensificación hasta llegar a la Categoría 5 el 13 de septiembre. El segundo impacto fue en la península de Yucatán, específicamente en Puerto Morelos, Quintana Roo; con vientos de 287 km/h y una presión barométrica en el ojo de 900mb. Tras tocar tierra, Gilberto entro al Golfo de México como huracán Categoría 2, nuevamente se volvió a intensificar e impactó territorio nacional en La Pesca, Tamaulipas. Cambió su curso al norte después de pasar por Monterrey, Nuevo León para finalmente volverse un sistema extra-tropical en Estados Unidos.

Los daños ocasionados por Gilberto en la península fueron alrededor de 60,000 viviendas destruidas y 35,000 personas quedaron sin hogar, las pérdidas totales se calcularon en dos mil millones de dólares, además, en Cancún se presentó erosión de playas del 60%.

1.2.1.4 Huracán Wilma (2005)

Es el huracán más poderoso jamás registrado en el Atlántico Norte. Tuvo su origen en el mar Caribe cerca de Jamaica el 15 de octubre, dos días después se convirtió en tormenta tropical con trayectoria hacia el oeste, cambió su trayectoria hacia al sur y continuo intensificándose de manera rápida hasta convertirse en huracán el 18 de octubre. Luego de ello siguió con un rápido desarrollo y en 24 horas aumentó su intensidad hasta la Categoría 5 (Saffir-Simpson). En su máximo nivel, los vientos sostenidos alcanzaron 295 km/h y una presión barométrica de 882mb, la presión más baja jamás registrada hasta la fecha en el Atlántico. Comenzó a girar al noroeste y bajó su intensidad a Categoría 4 antes de impactar a la península de Yucatán. Wilma tocó tierra en Cozumel el 21 de octubre aproximadamente a las 15:00 hora local con vientos máximos sostenidos de 230 km/h, el huracán siguió su trayectoria en tierra al norte de la península para emerger en el Golfo de México el 23 de octubre como huracán Categoría 2; en el golfo, Wilma se reintensificó a Categoría 3 y tocó tierra nuevamente en Florida el 24 de octubre para finalmente convertirse en ciclón extra-tropical.

Es el huracán que ha provocado más pérdidas económicas en la historia de México con un costo total de 7500 millones de dólares, se reportaron 4 muertos, además de graves daños en la zona turística de Cancún, Playa del Carmen y Cozumel. La marea de tormenta alcanzó 8 m de altura causando erosión en las playas y daños en los hoteles ubicados en la costa. También se registraron cuantiosos daños en el sector agrícola.

1.2.1.5 Huracán Dean (2007)

Comenzó como depresión tropical el 13 de agosto a 648 km al oeste-suroeste de Praia en las Islas Cabo Verde, el 14 de agosto se convirtió en tormenta tropical. Dean continuó su desarrollo y el 16 de agosto se convirtió en huracán Categoría 2 (Saffir-Simpson). El 17 de agosto Dean entró al mar Caribe y en 24 horas se intensificó a huracán Categoría 5. El 21 de agosto tocó tierra en Puerto Bravo, Quintana Roo con vientos máximos sostenidos de 260 km/h. Siguió su trayectoria hacia el Golfo de Campeche como huracán Categoría 1, después vuelve a tocar tierra en Tecolutla, Veracruz. Posteriormente, Dean se disipa en el interior del país. Los daños atribuidos a Dean se contabilizan en 184 millones de dólares, se reportaron 12 muertes en el territorio nacional. Las ciudades de Cozumel y Majagual reportaron daños en infraestructura, viviendas y puertos.

2. DESCRIPCIÓN DEL EVENTO

El huracán Wilma ha sido el huracán más intenso que se tenga registrado en el Atlántico norte y es considerado uno de los desastres naturales más costosos en la historia de México. Las afectaciones se concentraron en la zona turística del caribe mexicano. Formó parte de la temporada de huracanes con más tormentas en el Atlántico norte. También es la primera tormenta en llevar un nombre con la letra W. Para entender y analizar dichas afectaciones es necesario analizar las características a detalle del huracán, como son sus precipitaciones, velocidad de vientos y marea de tormenta; todo lo anterior con base en datos registrados por instituciones en México y Estados Unidos.

2.1 Desarrollo del meteoro

La depresión tropical no. 24 comenzó su desarrollo el 15 de octubre de 2005 en el centro del mar Caribe a 352 km al este-sureste de Gran Caimán. Por su parte, el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) lo ubicó a 930 km al este-sureste de Cancún, Quintana Roo. Los datos iniciales indicaban vientos máximos sostenidos en 1 min (VMS) de 45 km/h y ráfagas de viento por 1 min de 65 km/h. La madrugada del 17 de octubre el sistema se había convertido en tormenta tropical con el nombre de Wilma con VMS de 75 km/h y rachas de 95 km/h. Para el día 18, después de un desplazamiento lento y errático hacia el suroeste, Wilma se había convertido en huracán categoría 1 en la escala de Saffir-Simpson a 820 km al sureste de Cancún, Quintana Roo, ahora con desplazamiento hacia el noroeste; al final del día, el huracán asciende a categoría 2, con lo que el SMN eleva la peligrosidad a “Fuerte” con zona de alerta en Punta Allen, Quintana Roo (Fig. 2.2).

En las 24 horas siguientes Wilma se intensificó rápidamente llegando a la Categoría 5 de Saffir-Simpson. Un avión de reconocimiento del AFRC (cazahuracanes) por parte del *National Hurricane Center* (NHC) informó que el ojo del huracán tenía un diámetro de 3.7 km y una presión de 882mb, la más baja jamás registrada. En su punto de mayor intensidad, Wilma registró VMS de 280 km/h con ráfagas de 345 km/h. El día 19 se declara alerta roja para los municipios de Quintana Roo y Yucatán ante su posible impacto (Fig. 2.1). Al día siguiente, el huracán bajó su intensidad a Categoría 4 con VMS de 240 km/h a 305 km al este-sureste de Punta Allen, Quintana Roo.

Wilma tocó tierra el 21 de octubre, primero a las 15:00 horas tiempo local, pasa sobre la isla de Cozumel con VMS de 230 km/h, posteriormente a las 20:30 impacta en Puerto Morelos Quintana Roo como huracán categoría 4 con VMS de 220 km/h y ráfagas de 270 km/h según datos del SMN. El NHC por su parte reportó vientos máximos sostenidos por minuto de 240 km/h en Cozumel y de 222 km/h en Puerto Morelos. Siguió una trayectoria errática en tierra, lo que lo hizo disminuir su intensidad a categoría 2 al mediodía del 22 de octubre, a 20km al oeste de Cancún, Quintana Roo con VMS de 175 km/h y ráfagas de 210 km/h. En dicho punto, el NHC registró vientos VMS por minuto de 185km/h. Ese mismo día, Wilma salió al Golfo de México en Cabo Catoche de acuerdo a la información del SMN con VMS por minuto de 185 km/h (NHC).

Ya en el Golfo de México volvió a recuperar fuerza ubicándose en categoría 3 con trayectoria al noreste con VMS en un minuto de 203 km/h. Con esa misma intensidad, el día 24 de octubre volvió a tocar tierra en la costa suroeste de Florida cerca de Naples a las 07:00 hora local. Cuatro horas más tarde regresó al mar cerca de Palm Beach con VMS en un minuto de 167 km/h. Se reintensificó por última vez con vientos de 205 km/h hasta volverse extratropical el día 25 a 330 de km al sur-sureste de Halifax, Nueva Escocia según la información de la NOAA.

Wilma rompió varios records en diferentes ámbitos. Formó parte de la temporada de ciclones tropicales con el mayor número de tormentas y con el mayor número de huracanes en el Atlántico. Es catalogado como el huracán más intenso registrado hasta la fecha en el Atlántico además de tener la intensificación más rápida en 24 horas con una caída de la presión de 980mb a 882mb en el ojo; provocó las lluvias más intensas en la historia de México con una altura de precipitación de 1,576 mm en 24 horas en la estación de Isla Mujeres. Según datos de la Presidencia de México y de diferentes aseguradoras, también es considerado el huracán que provocó más pérdidas económicas en México con un total de 50,000 millones de pesos de forma preliminar (Resumen del Huracán Wilma del Océano Atlántico – CONAGUA).

Las mayores afectaciones del huracán se registraron en la zona turística de Cancún, Isla Mujeres, Cozumel y Playa del Carmen, así como afectaciones en diversas poblaciones de la península.

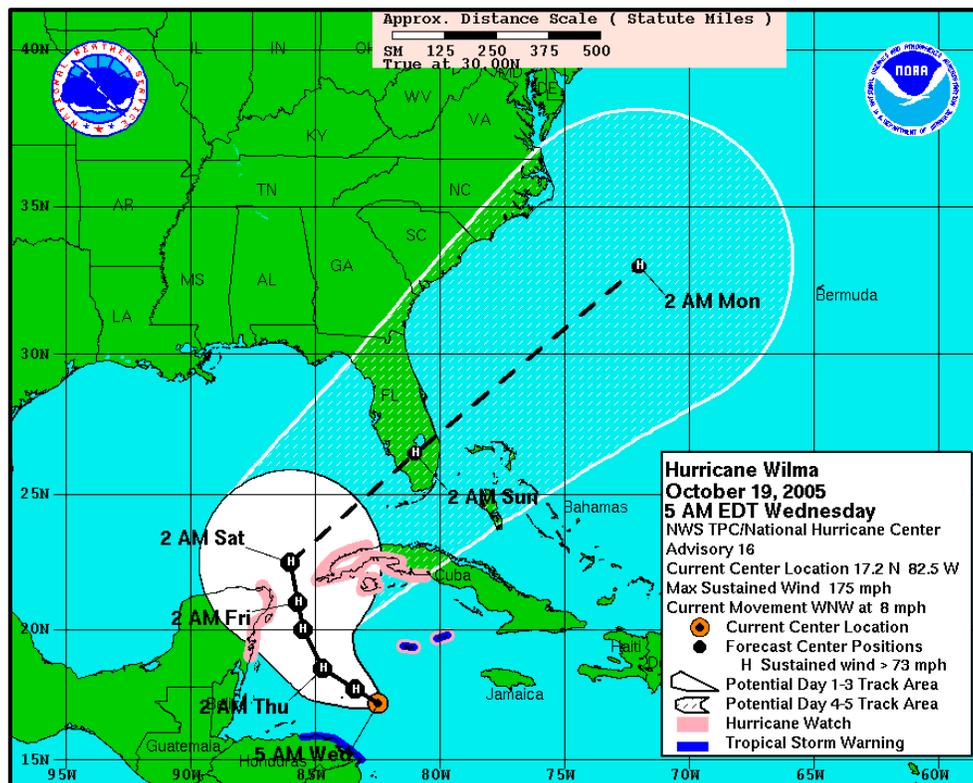


Figura 2.1. Pronóstico a cinco días de la posible trayectoria de Wilma (National Weather Service – National Hurricane Center)

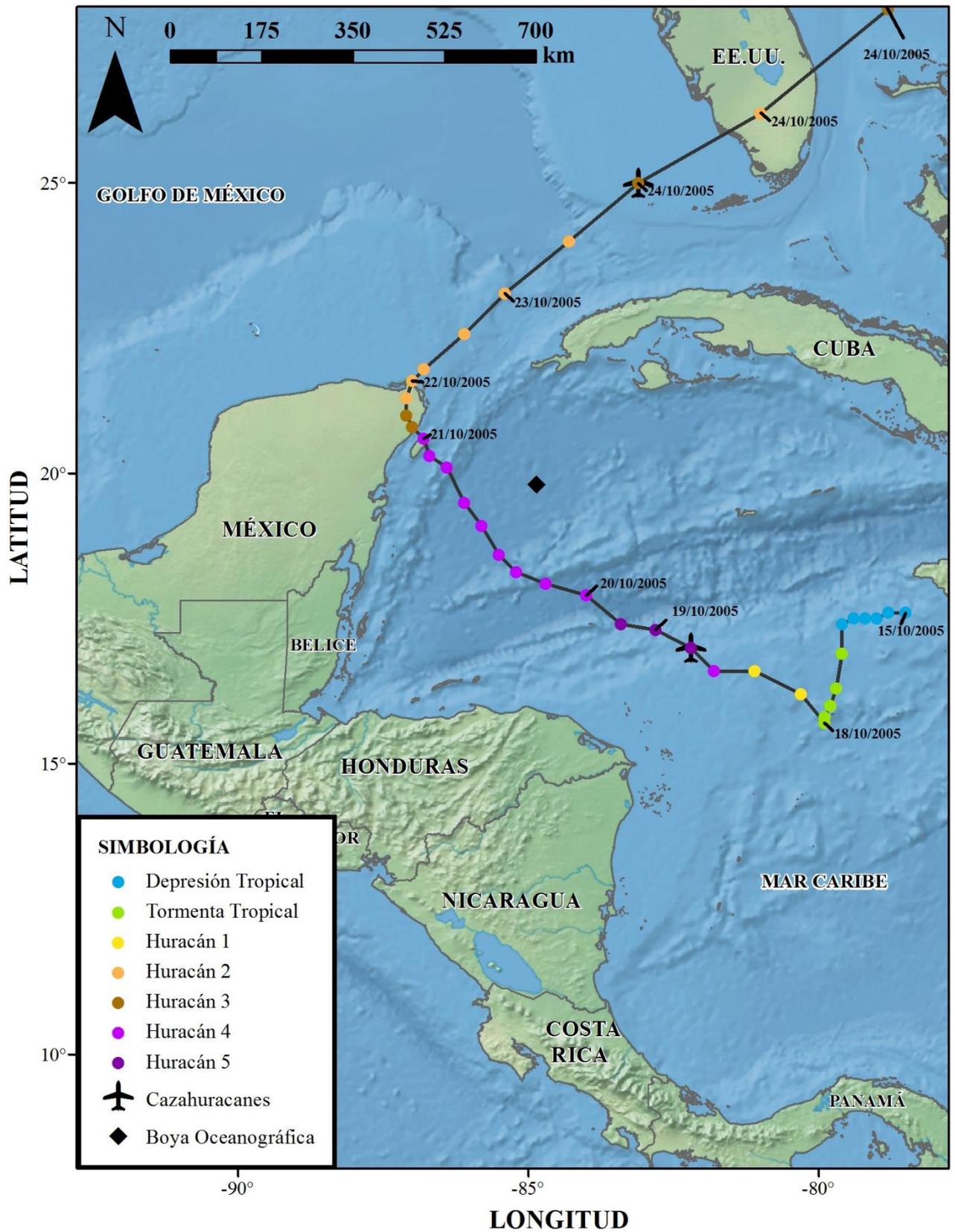


Figura 2.2. Trayectoria del huracán Wilma del 15 de octubre al 24 de octubre de 2005

2.2 Efectos del huracán

Para conocer la naturaleza y las características de un huracán determinado, su trayectoria, intensidad y velocidad de sus vientos, es necesario obtener diferentes tipos de datos para el análisis del fenómeno. Esos datos son recabados por diferentes medios como pueden ser imágenes satelitales, vuelos de reconocimiento, radares, estaciones automáticas, boyas y embarcaciones en altamar. Con la información y la implementación de modelos de predicción se crean reportes periódicos sobre su posición, intensidad y presión barométrica en el ojo.

2.2.1 Velocidades de viento generadas

Uno de los datos más importantes es la velocidad de vientos máximos sostenidos, ya que con esa información es posible clasificar al huracán en la escala de Saffir-Simpson, además de ser una de las variables con mayor impacto al momento de que un huracán toca tierra.

Los vientos máximos sostenidos se presentan en la pared del ojo, dentro del radio de vientos máximos en un huracán maduro (Blanchard, A. Hsu, 2006).

De acuerdo con la definición de la Organización Meteorológica Mundial (WMO por sus siglas en inglés), los vientos máximos sostenidos son un promedio de las velocidades medidas del viento a una altura de 10 metros sobre la superficie en un intervalo de tiempo de 10 min. En cambio, el Centro Nacional de Huracanes de los EE.UU. (NHC) maneja un intervalo de 1 min en la medición de los vientos. Por su parte, el Servicio Meteorológico Nacional sigue los lineamientos de la WMO con unos intervalos de medición de 10 minutos.

En la Figura 2.3 se muestran los valores de velocidad máxima en superficie en un intervalo de 10 min con base en reportes del SMN de Wilma. La trayectoria del huracán fue determinada por el NHC en sus reportes finales. Para obtener toda esta información, tanto el SMN como el NHC utilizan datos provenientes de estaciones meteorológicas en tierra (Tabla 2.1), vuelos de reconocimiento, radares e imágenes satelitales. Este último recurso es usado en la "Técnica Dvorak" la cual es una metodología para conocer la intensidad de un huracán a partir de imágenes satelitales e infrarrojas (Dvorak, 1970).

Tabla 2.1. Velocidades de viento en superficie registradas por el NHC en México

Estación	Fecha y hora (UTC)	Presión (mb)	Vientos máximos sostenidos - 1 min (km/h)	Velocidad máxima de ráfaga - 1 min (km/h)
Cancún	22/10/2005 - 00:00	-	161.12	209.28
Cozumel	-	928	-	-
Isla Mujeres	22/10/2005 - 19:30	968.6	131.49	174.09

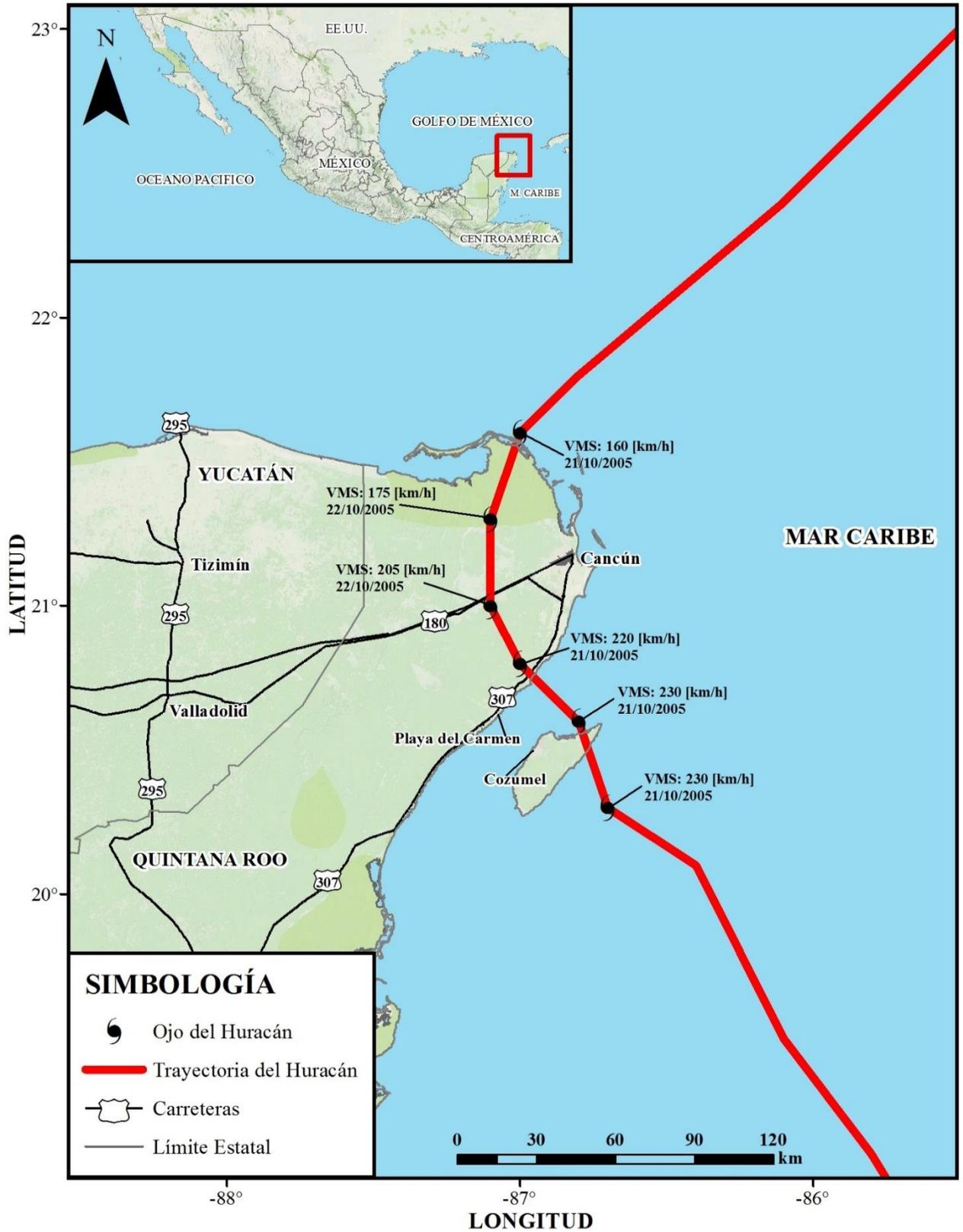


Figura 2.3. Velocidades de viento en superficie máximas sostenidas en 10 min

2.2.2 Estimación de las velocidades de viento en la región

A pesar de la existencia de estaciones automáticas, actualmente no existe información detallada sobre las velocidades de viento, esto es debido a que no están disponibles los registros históricos de dichas estaciones. Por esto último, se usó un modelo de simulación para la estimación de los vientos durante la trayectoria de Wilma en la zona de estudio. El modelo usa el método numérico de Silva *et al.* (2002), el cual, permite estimar en diversos sitios la velocidad del viento con base en diferentes parámetros, como la posición del ojo del huracán, presión barométrica, velocidad de traslación y la topografía del terreno (Reinoso *et al.* 2012).

En la Figura 2.4 se muestran la trayectoria del huracán junto con las velocidades de viento, producto del modelo anteriormente mencionado. Se observa que las velocidades varían entre 50 y 230 km/h.

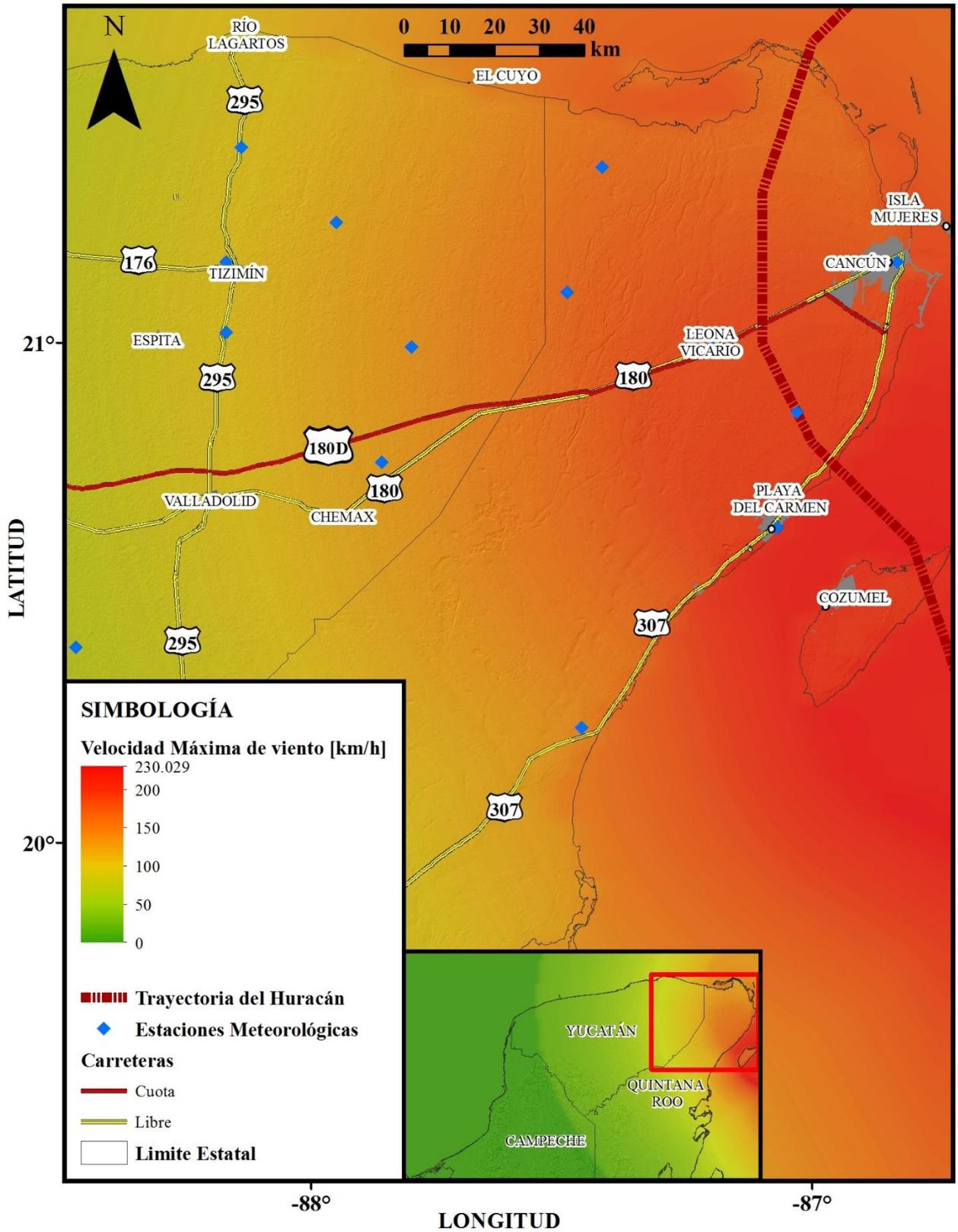


Figura 2.4. Estimación del mapa de velocidades máximas de ráfaga en 3(s) del huracán Wilma obtenido a partir de un modelo de simulación

2.2.3 Precipitación

Para el huracán Wilma, se tuvieron diversos registros de precipitaciones dentro de la península de Yucatán provenientes de estaciones meteorológicas ubicadas en diferentes poblaciones de los estados de Campeche, Quintana Roo y Yucatán. Los datos que a continuación se presentan son parte de la Base de Datos Climatológica Nacional (CICLON) desarrollada por el SMN y el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) (Véase Anexos, Tabla 1).

Las observaciones diarias del CICLON representan los datos recopilados durante las últimas 24 horas finalizando a las 08:00 de la mañana. Con el fin de obtener valores más confiables, se eligieron estaciones que cuentan con más de 20 años de datos continuos, o en su defecto, estaciones que al menos contarán con 10 años de observaciones. Algunos de los datos presentan inconsistencias, probablemente debidas a fallas en los sistemas de medición debido a los efectos del huracán.

En los registros del día 21 de octubre, mismo día en el que Wilma tocó tierra, se observó que la mayor altura de precipitación registrada en 24 horas corresponde a la estación "Cancún" con 770 mm, le siguen las estaciones de Kantunilkin, Solferino, Playa del Carmen y Tulum con 310, 300, 240 y 185.5 mm respectivamente. La Secretaría de Marina por su parte, registró en su estación meteorológica de Isla Mujeres una precipitación de 1,576 mm en 24 horas, de las 07:00 del día 21 a las 07:00 del día 22. Con base en esta última observación, la lluvia causada por Wilma es considerada como la más intensa que se ha registrado en territorio mexicano.

En la Figura 2.5 se presenta la precipitación acumulada de cada 24 h correspondientes a los días 21 y 22 de octubre de 2005. Con la cifras de 770mm en Cancún y de 1576mm en Isla Mujeres, se superaron los records históricos por los efectos directos de un huracán en México en ese entonces. La marca anterior correspondía al huracán Gilbert, el 16 de septiembre de 1988, con 485 mm en Santa Catarina, Nuevo León.

A pesar de la extraordinaria precipitación provocada por Wilma, esta no fue la principal causa de los estragos en la zona. Otros factores, como el viento y la marea de tormenta, fueron los que provocaron más daños en el recorrido del huracán, lo cual se presentará más adelante.

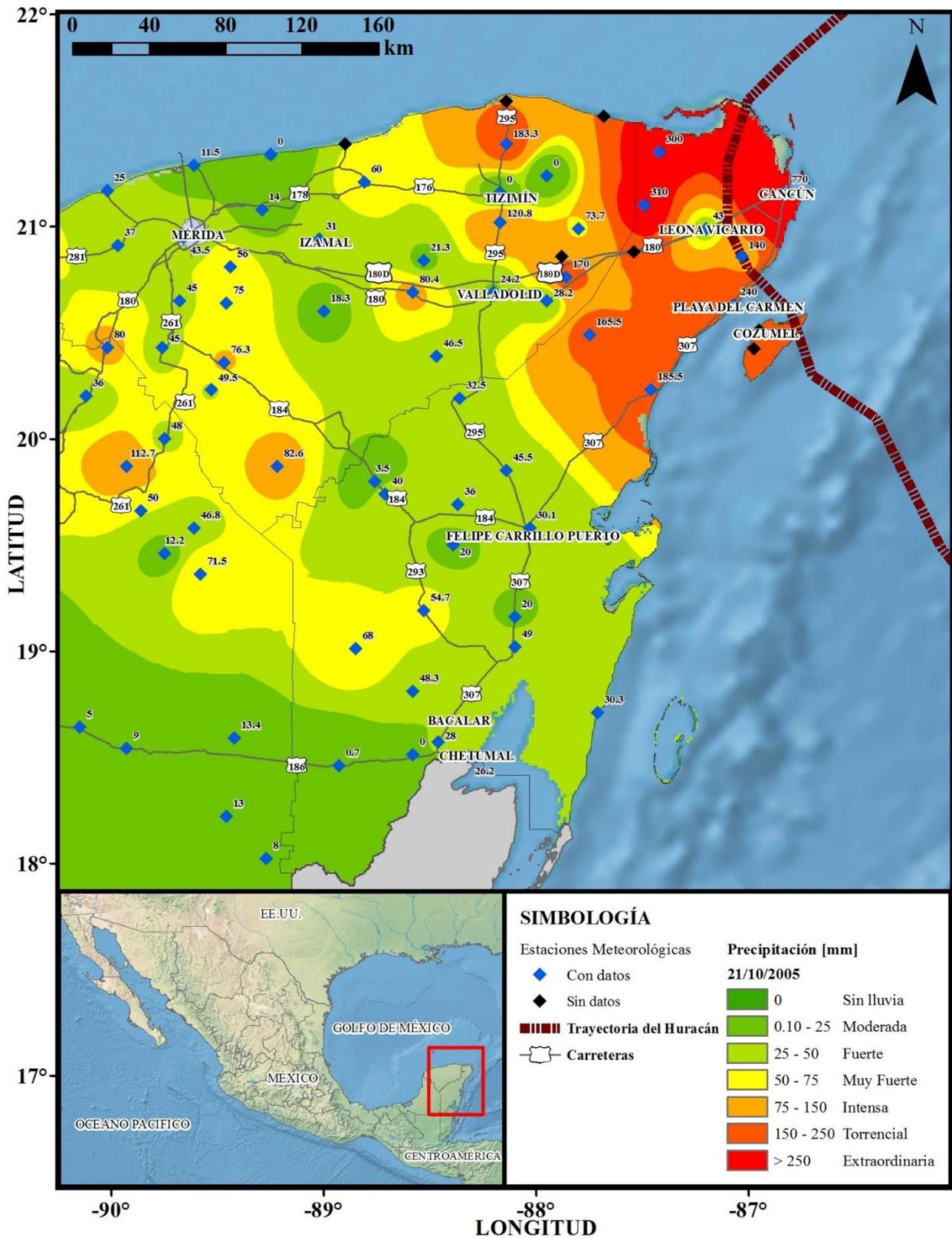
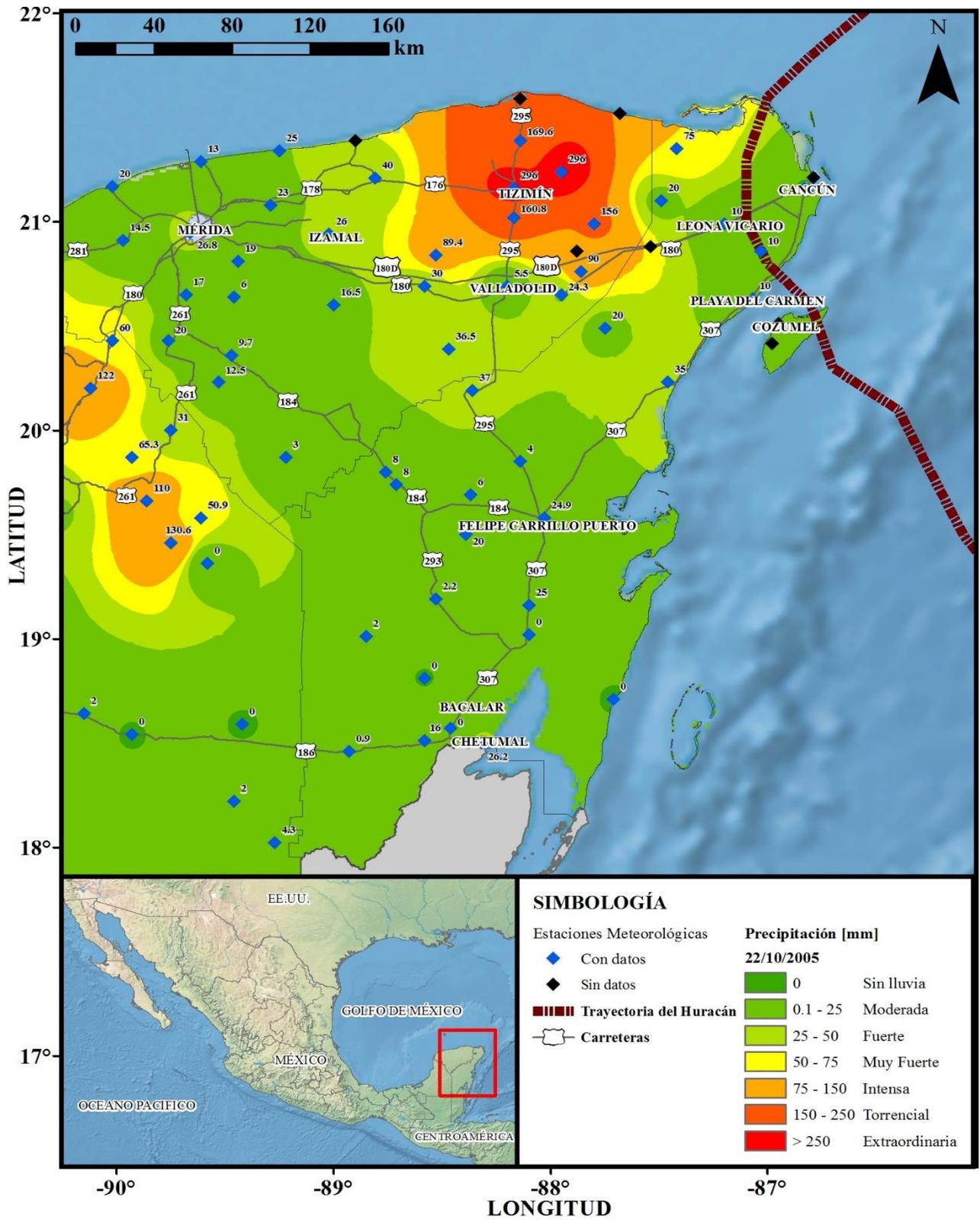


Figura 2.5. Precipitación causada por el huracán Wilma: a) del 21 de octubre de 2005, b) del 22 de octubre de 2005



b)

Figura 2.5. (Continuación)

2.2.4 Marea de tormenta

La marea de tormenta es el aumento anormal del nivel del medio del mar debido a la presencia del huracán. Es causada principalmente por los vientos a grandes velocidades y en menor medida por el descenso de la presión en el ojo del huracán. La marea de tormenta puede provocar erosión de las playas, inundaciones en tierra y causar daños a la infraestructura costera, generalmente en zona bajas cercanas al mar (Fig 2.6).



Figura 2.6. Marea de tormenta

Este fenómeno es medido por estaciones mareográficas en las costas o por boyas oceanográficas. El NOAA cuenta con el National Data Buoy Center (NDBC), que a su vez está al servicio del National Weather Service (NWS). El NDBC desarrolla y opera una red de boyas oceanográficas ubicadas en distintas zonas las cuales son determinadas por su importancia en la realización de pronósticos y alertas para el NWS. Las boyas oceanográficas hacen mediciones de la dirección y velocidad del viento, presión atmosférica, temperatura del aire, temperatura de la superficie del mar y altura de ola junto con su periodo.

El mar caribe es una de las zonas monitoreadas por el NDBC. Dentro de esta área se encuentran 7 boyas que actualmente están en servicio y que además cuentan con registros históricos.

Para conocer la altura de ola causada por Wilma, se consultaron los registros históricos de la boya no. 42056 (Fig. 8), ubicada a 120 millas náuticas al este - sureste de Cozumel, muy cerca de la trayectoria del huracán. Se consideraron las lecturas tomadas desde las 00:00 horas el 20 de octubre de 2005 a las 15:00 horas del día 23 de octubre del mismo año (Fig. 2.7).

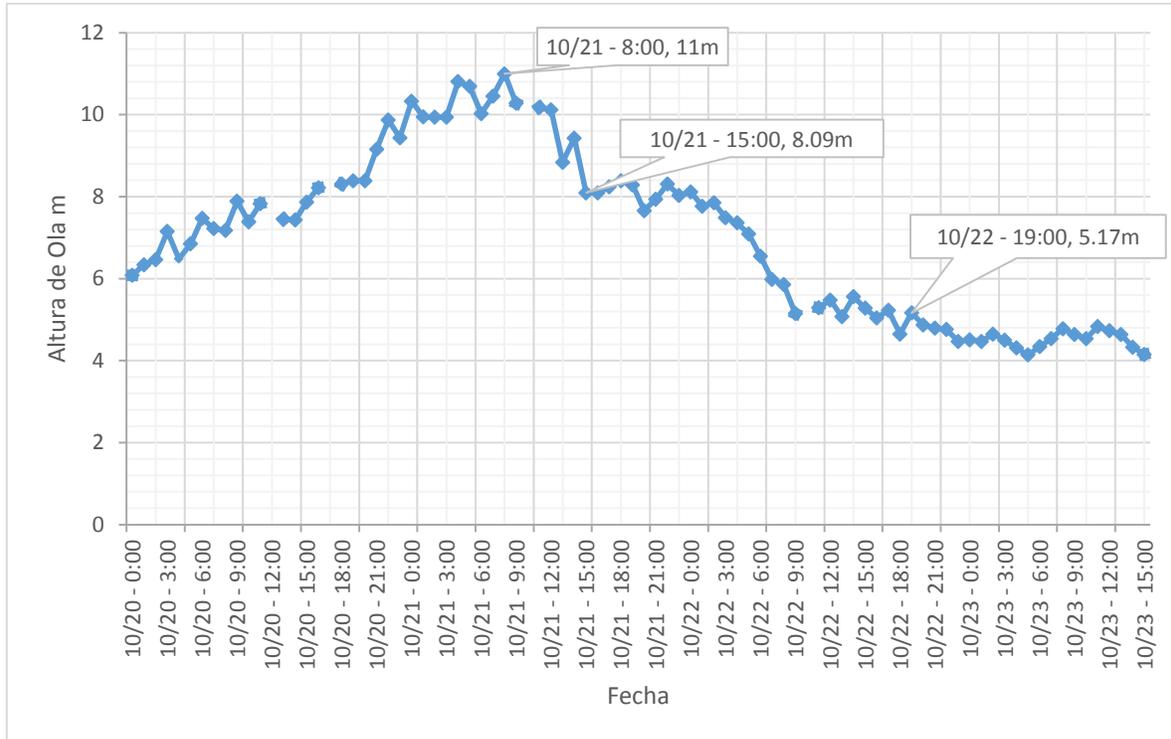


Figura 2.7. Altura de ola registrada por la boya No. 42056 del 20 de octubre al 23 de octubre de 2005

Se observa claramente que la altura máxima alcanzada por la ola fue de 11 m, la cual fue registrada a las 08:00 horas del día 21 de octubre de 2005, aproximadamente 7 horas antes de que el huracán tocara tierra en Cozumel.



Figura 2.8. Boya No. 42056 del National Data Buoy Center (Facebook: National Buoy Center)

3. EVALUACIÓN DE DAÑOS

3.1 Introducción

En este capítulo se presenta un resumen junto con análisis de los daños registrados de los que se tuvo información disponible en Quintana Roo y Yucatán, así como las zonas afectadas por el huracán Wilma. Los registros se presentan georreferenciados en mapas (Fig. 3.1-3.5) y tablas (3.1). La información proviene de diferentes sitios web con material gráfico, artículos presentados en congresos, reportes de prensa y artículos publicados por instituciones académicas y gubernamentales.

3.2 Daños ocasionados en la península de Yucatán

Los daños se evaluaron por sectores los cuales son: 1) Edificaciones, 2) Estructuras Industriales, 3) Sistemas Extendidos y 4) Vivienda. Mayores detalles de los daños en cada uno de los sectores se muestran más adelante. Los daños se muestran en una tabla con un indicador, el nombre de la edificación, numero de figura y la velocidad de viento y tirante de inundación si aplica.

Tabla 3.1. Daños recopilados ocasionados por el Huracán Wilma

ID	NOMBRE	Fig.	Velocidad de viento (km/h)	Tirante de inundación m
EDIFICACIONES				
ED-CD-1	Condominio (Punta Cancún)	12	187.62	N/A
ED-CM-10	Señor Frog's Cancún	7	198.85	N/A
ED-CM-11	Restaurant Lorenzillo's	7	198.85	N/A
ED-CM-12	Plaza Flamingo	17	198.85	N/A
ED-CM-13	La Isla Shopping Village Cancún	17	198.85	N/A
ED-CM-14	Plaza Caracol	17	187.62	N/A
ED-CM-15	Cancún Center	17	187.62	N/A
ED-CM-16	Plaza La Fiesta	17	187.62	N/A
ED-CM-3	Panchos Backyard Puerta Maya*	N/D	214.22	N/A
ED-CM-6	Interceramic	7	181.01	N/A
ED-CM-7	Pabellón Caribe	7	178.98	N/A
ED-CM-8	Oxxo Plaza las Américas	8	178.98	N/A
ED-CM-9	Plaza Forum by the Sea	17	187.62	N/A
ED-ES-1	Escuela Primaria Jose Ma. Morelos y Pavón	5	89.94	0.18
ED-ES-2	Escuela Secundaria Técnica No. 28	5	97.35	0.05
ED-ES-3	Escuela Primaria Nicolás Bravo	5	146.19	0.17
ED-GM-2	Curves Gym	7	178.98	N/A
ED-HP-1	Hospital Amerimed Cancún	10	178.98	N/A
ED-HT-10	Hotel Grand Oasis Palm	12	180.62	N/A
ED-HT-11	Hotel Dos Playas	12	187.62	N/A

Tabla 3.1. (Continuación)

ID	NOMBRE	Fig.	Velocidad de viento (km/h)	Tirante de inundación m
ED-HT-12	Hotel Hyatt Regency	12	190.56	N/A
ED-HT-13	Hotel Grand Fiesta Americana Coral Beach	12	190.56	N/A
ED-HT-14	Hotel Miramar Misión (Demolido)	12, 14	198.85	N/A
ED-HT-15	Hotel Caribbean Vill. Cancún (Demolido)	14	198.85	N/A
ED-HT-16	Hotel Ceiba del Mar Spa & Resort	15	205.82	N/A
ED-HT-3	Hotel Riu Cancún	12, 13	187.62	N/A
ED-HT-4	Hotel Riu Palace México*	N/D	204.78	N/A
ED-HT-6	Hotel Riu Playacar*	N/D	204.78	N/A
ED-HT-7	Hotel Riu Yucatán*	N/D	204.78	N/A
ED-HT-8	Hotel Riu Lupita*	N/D	204.78	N/A
ED-HT-9	Hotel Riu Tequila*	N/D	204.78	N/A
ESTRUCTURAS INDUSTRIALES				
EI-ES-1	Gasolinera (Cancún - Av. Nichupté)	22	181.01	N/A
EI-ES-2	Gasolinera (Cancún - Plaza las Avenidas)	22	178.98	N/A
EI-ES-3	Gasolinera (Av. Kabah)	22	178.98	N/A
EI-ES-4	Gasolinera (Carr. Tulum - Cancún)	22	190.05	N/A
EI-GM-1	Gimnasio	25	193.73	N/A
EI-NC-10	Office Max Cancún	24	181.01	N/A
EI-NC-11	Soriana Súper (Bodega Gigante)	24	181.01	N/A
EI-NC-12	SEARS Cancún	24	178.98	N/A
EI-NC-13	Plaza las Américas	25	178.98	N/A
EI-NC-14	Chrysler Cancún (Las Avenidas)	19	178.98	N/A
EI-NC-15	Chevrolet del Caribe	19	181.01	N/A
EI-NC-16	Ford Cancún	19	181.01	N/A
EI-NC-17	Renault Cancún	20	185.02	N/A
EI-NC-2	Nave Comercial (Chedraui P. del Carmen)*	N/D	204.78	N/A
EI-NC-3	Nave Comercial (Chedraui Coba, Cancún)	24	181.01	N/A
EI-NC-8	City Club Cancún	25	181.01	N/A
EI-NC-9	Galerías El Triunfo Decoración	26	181.01	N/A
EI-NI-2	Nave Industrial*	N/D	214.22	N/A
SISTEMAS EXTENDIDOS				
SE-AP-1	Aeropuerto Internacional de Cancún	28	190.60	N/A
SE-AT-1	Antena Repetidora de Telecomunicaciones	41	187.27	N/A
SE-CR-1	Entronque, Carretera Col. Yucatán - Cenote Azul	31	131.29	0.29
SE-CR-2	Carretera a El Cuyo	31	129.46	0.27
SE-CR-3	Carretera Tizimín - Colonia Yucatán	31	127.77	0.09
SE-CR-4	Camino a Santa Rosa	31	143.24	0.23

Tabla 3.1. (Continuación)

ID	NOMBRE	Fig.	Velocidad de viento (km/h)	Tirante de inundación m
SE-CR-5	Carretera a Dzonot Carretero	31	130.13	0.24
SE-FR-1	Faro de El Cuyo	35	146.19	N/A
SE-LT-1	Torres de Alta Tensión (Av. Bonampak)	33	187.27	N/A
SE-ML-1	Malecón de Cozumel	37	214.04	N/A
SE-PT-1	Puente, carretera Progreso - Telchac Puerto	32	40.96	N/A
SE-PT-2	Puente, carretera Telchac Puerto -Dzilam de Bravo	32	47.76	N/A
SE-PT-3	Puente, carretera Dzidzantún - Santa Clara	32	57.64	N/A
SE-PY-1	Playa Langosta	39	180.62	N/A
SE-TF-1	Servicios Náuticos "El Dorado"	37	187.62	N/A
SE-TF-2	Terminal de Ferrys Playa del Carmen	37	204.78	N/A
VIVIENDA				
VI-6	Vivienda Residencial (Av. Bonampak)	44	187.27	N/A
-	Daños en viviendas- Colonia Región 96	45	179.59	0.14

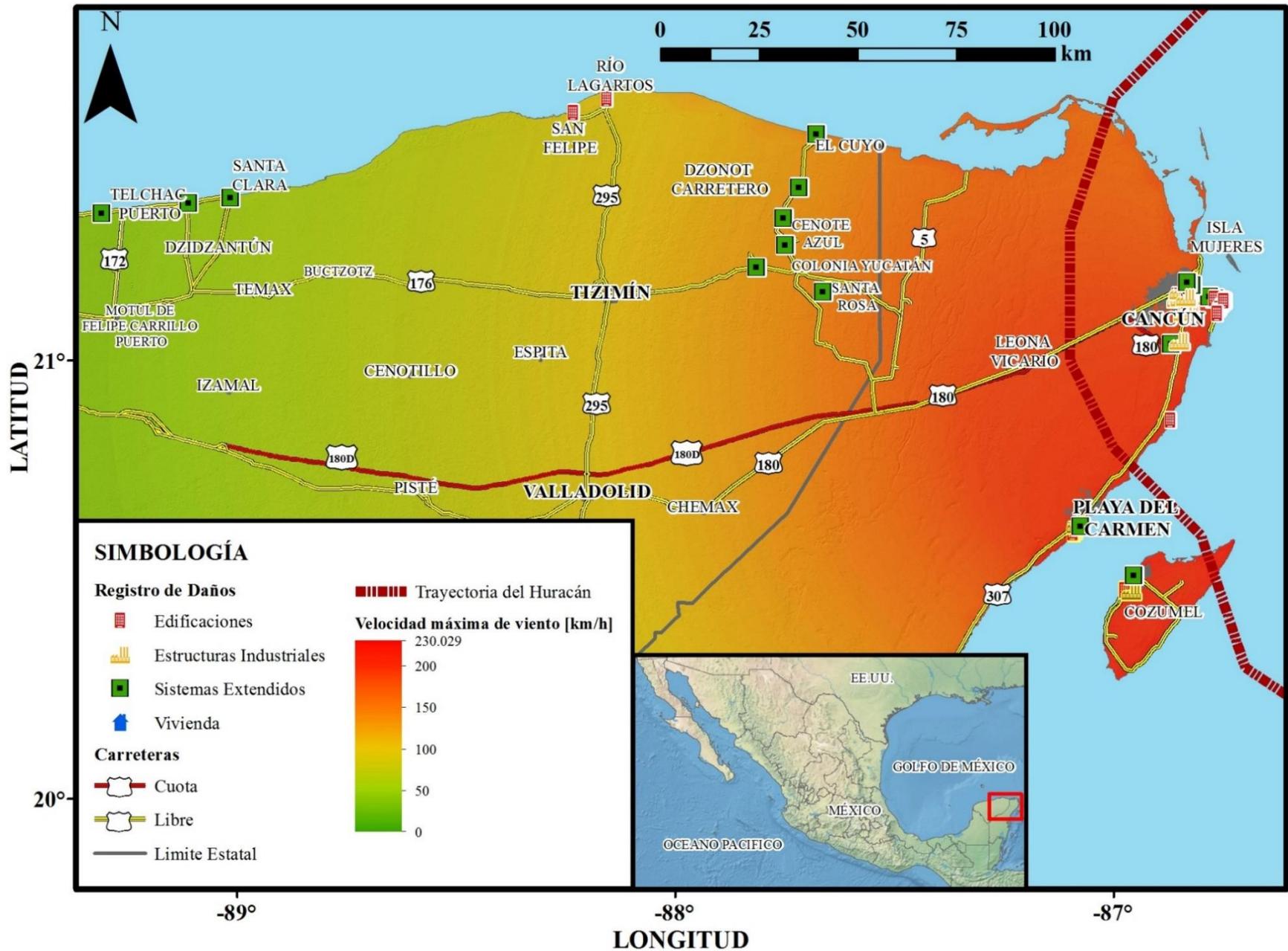


Figura 3.1. Sitios con información de daños en la península de Yucatán.

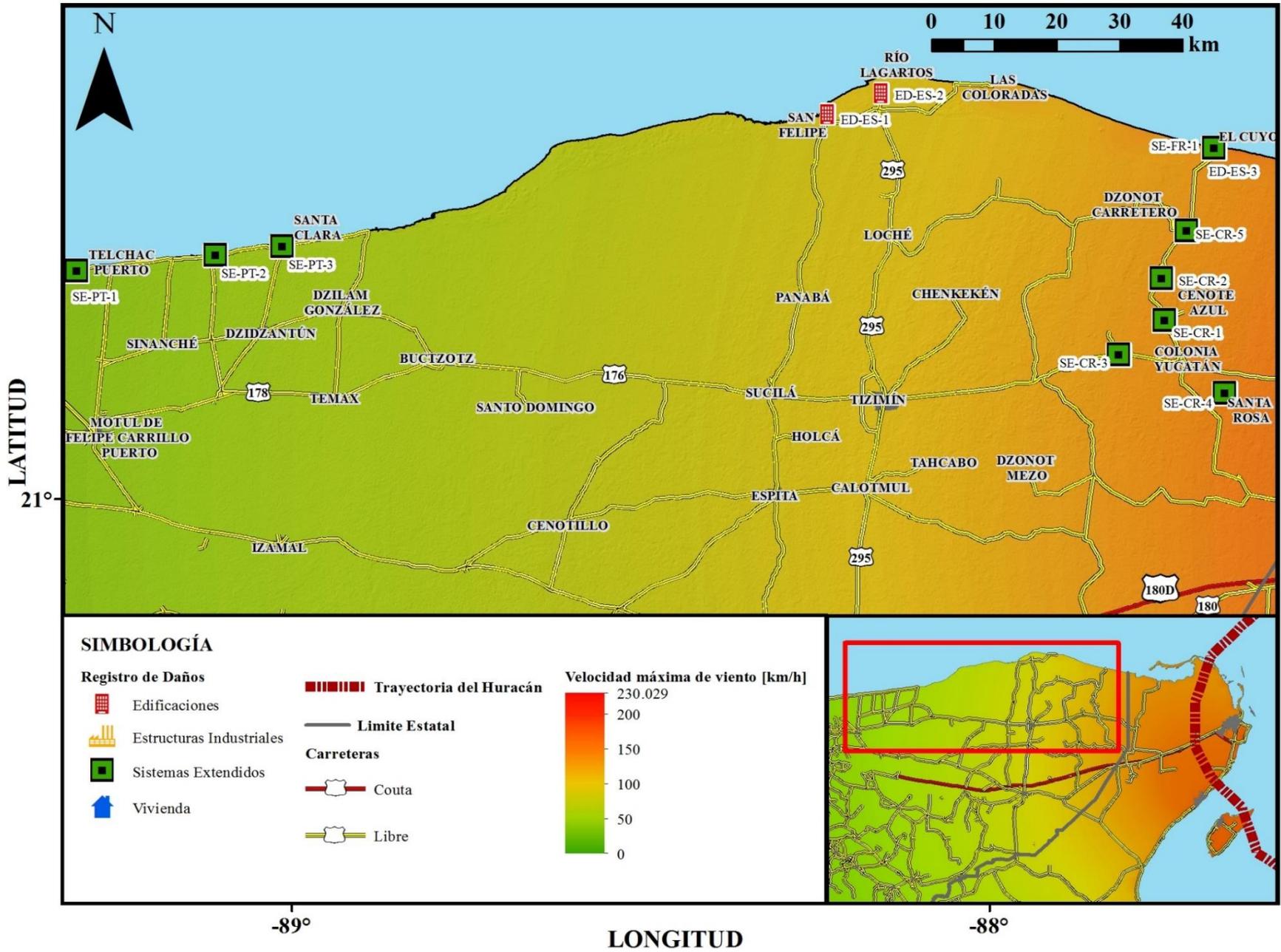


Figura 3.2. Sitios con información de daños en la zona de la costa norte de Yucatán

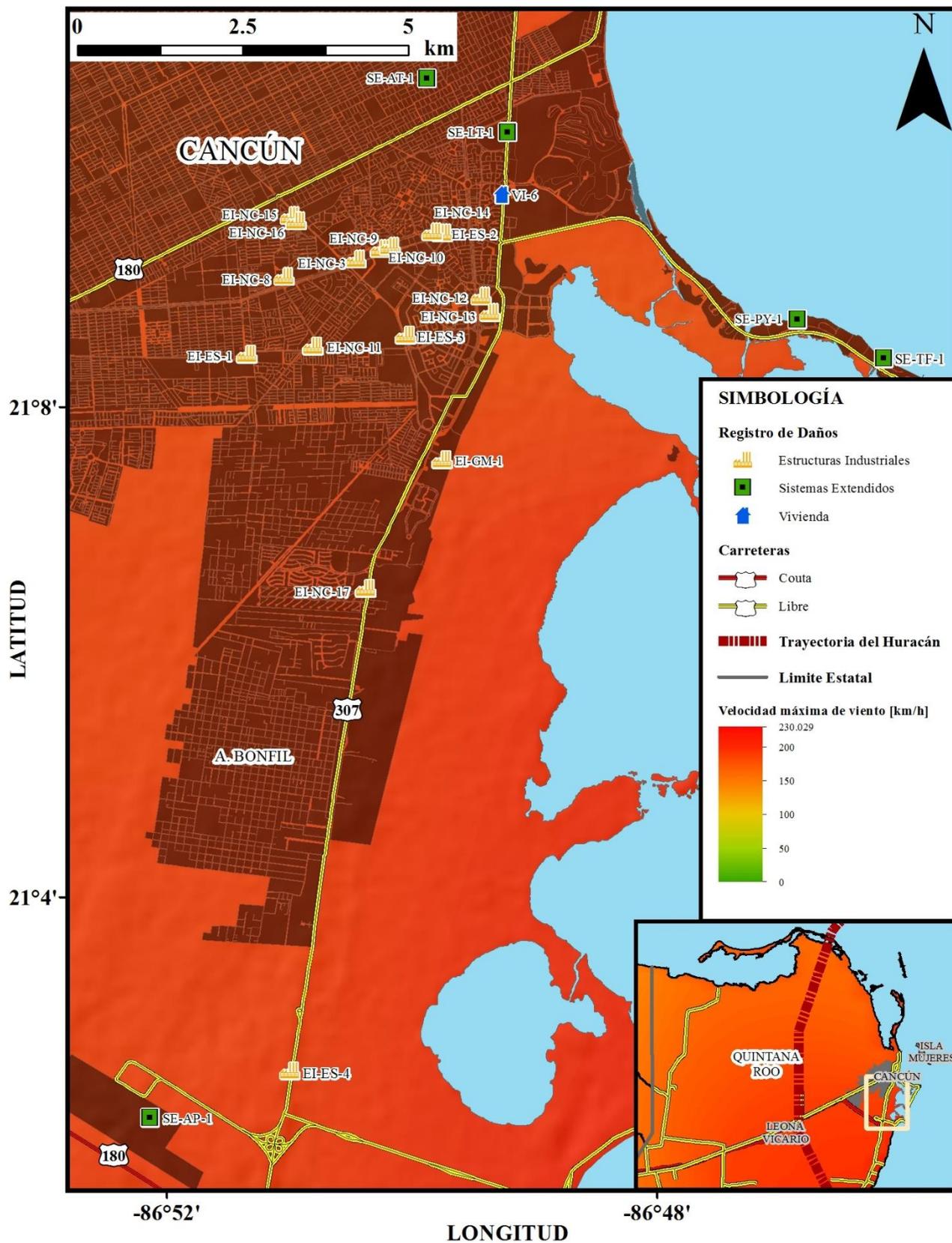


Figura 3.3. Sitios con información de daños en la zona de Cancún, Quintana Roo (Estructuras Industriales, Sistemas Extendidos y Vivienda).

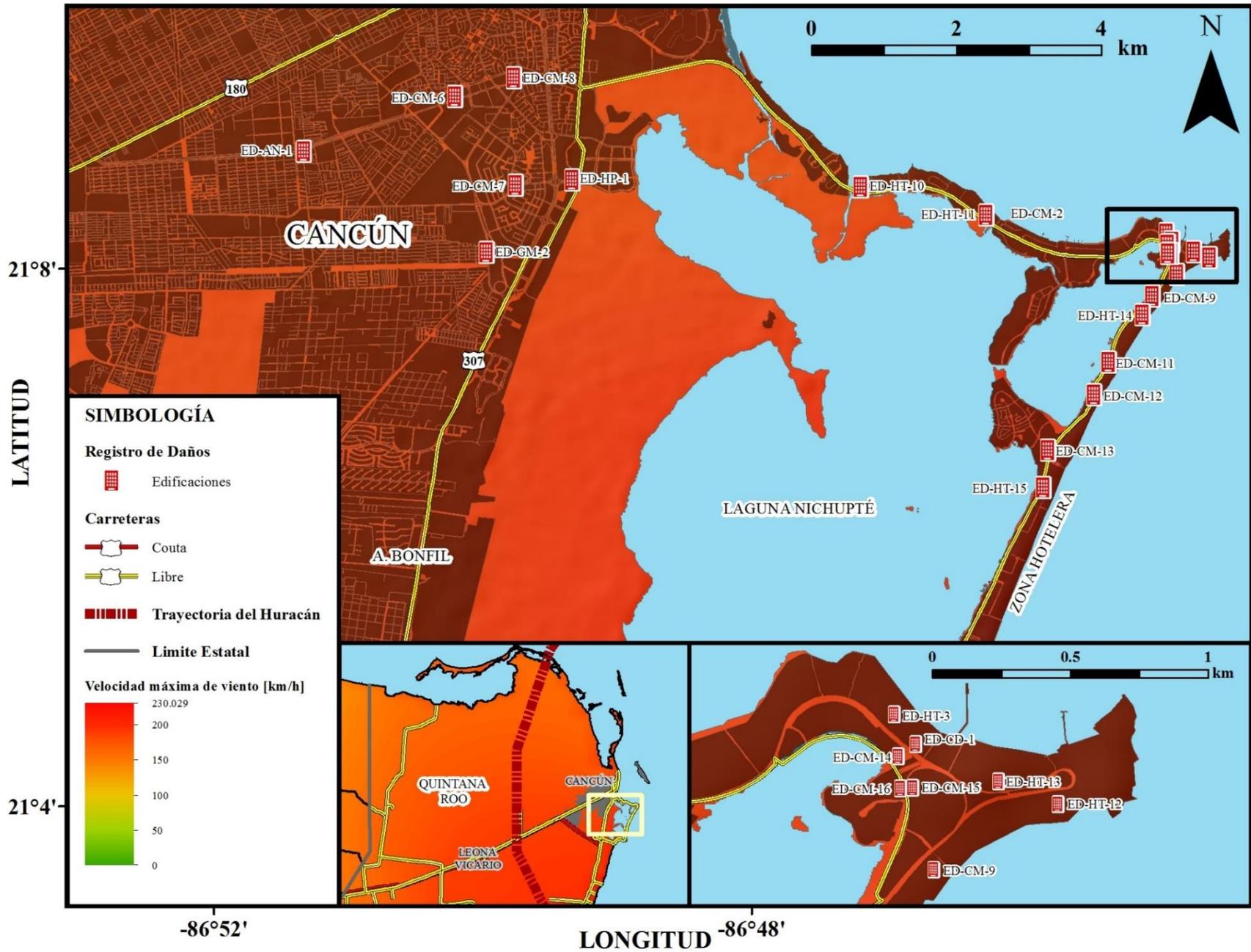


Figura 3.4. Sitios con información de daños en la zona de Cancún, Quintana Roo (Edificaciones)

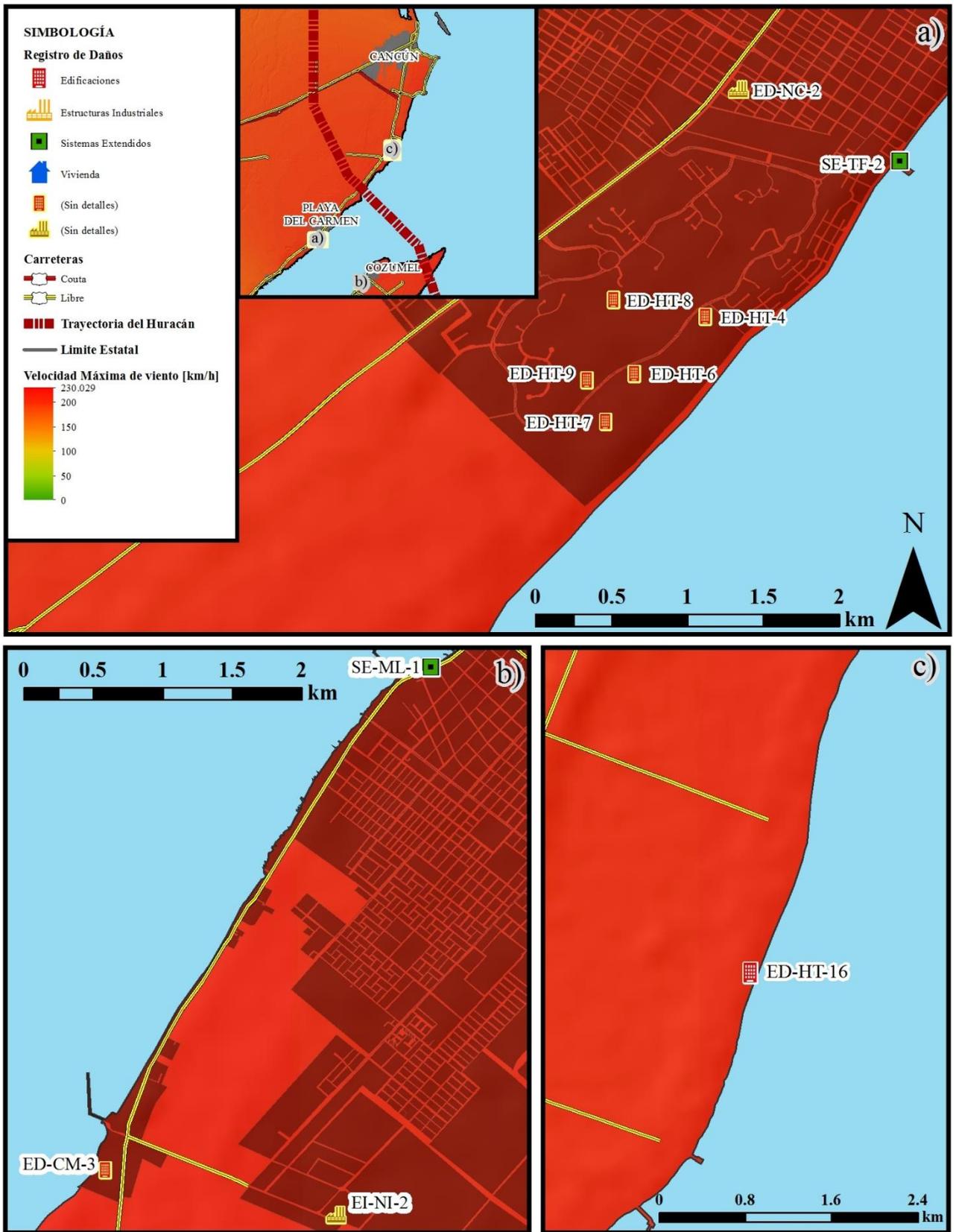


Figura 3.5. Sitios con información de daños en la zona de Playa del Carmen y Cozumel, Quintana Roo

3.3 Edificaciones.

A continuación se muestran los daños que se presentaron en diferentes edificaciones como escuelas, comercios, hoteles y condominios durante el impacto del huracán. Se recopiló información y fotografías de afectaciones en estructuras de concreto, mampostería y acero mediante búsquedas en archivos de la prensa local y nacional, reportes publicados en congresos y artículos de instituciones académicas; así como en informes gubernamentales y diversos sitios de internet con material gráfico que se mencionarán en la bibliografía. La evaluación de los daños se hará con base en fotografías que fueron tomadas pocos días después del paso del huracán e información de la prensa. Se hicieron observaciones sobre el comportamiento de elementos estructurales y no estructurales.

3.3.1 Instituciones educativas

En los estados de Campeche, Quintana Roo y Yucatán se suspendieron clases durante el impacto del meteoro. Se encontraron escasos reportes de daños menores en instituciones públicas de educación básica, específicamente en los municipios de San Felipe y Tizimín pertenecientes al estado de Yucatán.

Las escuelas afectadas fueron: Escuela Primaria Jose Ma. Morelos y Pavón en San Felipe; Escuela Secundaria Técnica No. 28 en Rio Lagartos y la Escuela Primaria Nicolás Bravo en El Cuyo. Dichas escuelas sufrieron daños en techos, pero principalmente se tuvieron pérdidas en mobiliario y equipo electrónico. Desafortunadamente, la fuente no contiene evidencia fotográfica de dichos daños. Sin embargo, con la herramienta "Google Street View" se examinaron las edificaciones anteriormente mencionadas, esto con el fin de conocer sus sistemas estructurales (Figura 3.6).

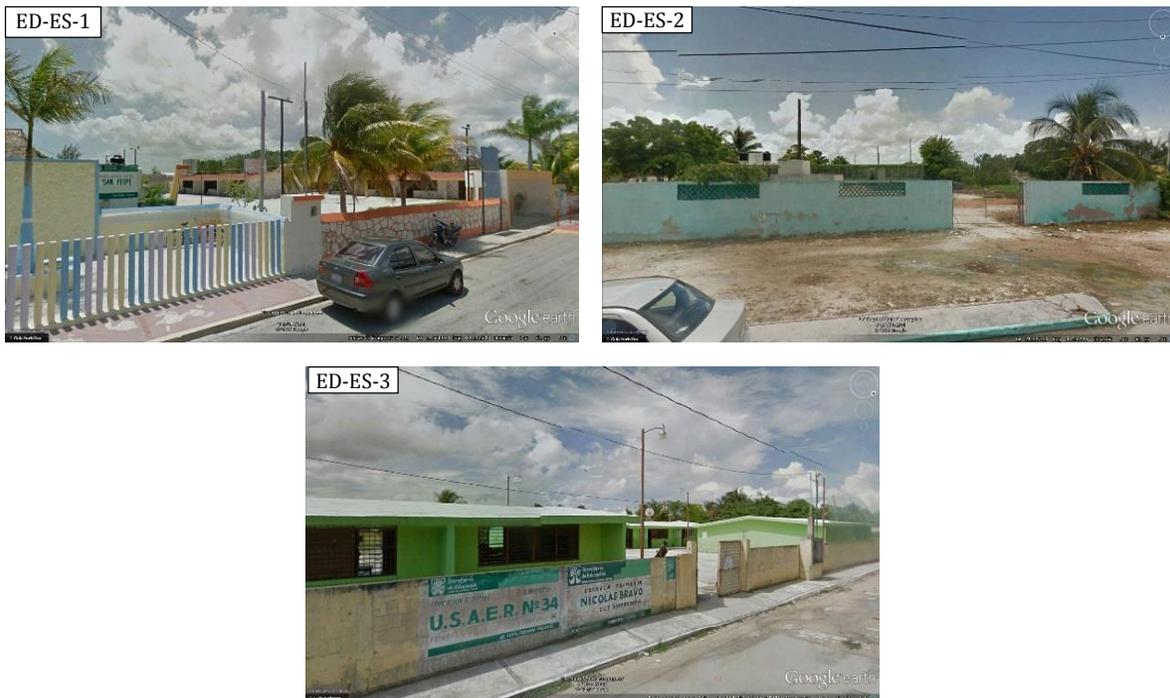


Figura 3.6. Escuelas con registro de daños en Yucatán

Se observa que las escuelas de la Figura 3.6 están construidas con elementos de concreto reforzado y mampostería en columnas y paredes. En las losas se identifica al concreto reforzado como principal material. Se observa también que ninguna de estas escuelas cuenta con una techumbre de lámina en espacios como canchas o patios.

Estas edificaciones se encuentran en localidades pesqueras (San Felipe, Río Lagartos y El Cuyo) que se asientan en el litoral yucateco del Golfo de México en un la isla barrera, específicamente dentro de la Reserva de la Biosfera Ría Lagartos el cual es un estero localizado en el litoral norte del estado. Debido a esta situación geográfica, las edificaciones en estas poblaciones son especialmente susceptibles a los efectos provocados por un huracán, principalmente a inundaciones. Es muy probable que los daños en mobiliario y equipo de cómputo estén relacionados con inundaciones consecuencia de las precipitaciones extraordinarias causadas por el huracán Wilma.

Según datos de la Secretaria de Educación de Yucatán, los daños se presentaron en 5 municipios al oriente del estado, principalmente en bardas, luminarias y ventanas. En las localidades de El Cuyo y Santa Rosa Concepción se suspendieron clases durante 15 días, mientras que en el resto del estado en promedio fueron de 2 a 3 días. El total de escuelas afectadas en el estado fue de 71, tanto de educación básica como media superior.

Por su parte, la Secretaria de Educación y Cultura de Quintana Roo reportó que el 60% de los planteles educativos de todos los niveles en el estado resultó con algún tipo de daño por el ciclón, principalmente en el norte y centro del estado.



Figura 3.7. Daños en diferentes escuelas en Quintana Roo

De forma semejante al estado de Yucatán, la mayoría de afectaciones en instituciones educativas en Quintana Roo se registraron en ventanas y bardas, además de inundaciones y caída de árboles en los planteles.

Se observa que los daños fueron causados principalmente por acción del viento, las ventanas fallaron permitiendo que el agua hiciera estragos en el mobiliario y el material didáctico. Las bardas, al no tener confinamiento con dalas y columnas de concreto, colapsaron ante la presión de empuje del viento. Conforme a información del CENAPRED, se estima que el monto por los daños a la infraestructura educativa fue del orden de los 156 millones de pesos.

3.3.2 Comercios y oficinas

Son establecimientos que en su mayoría son tiendas de conveniencia, locales comerciales y restaurantes. Por lo general, estos comercios son franquicias que se caracterizan por usar sistemas estructurales ligeros y estandarizados, propios de la cadena a la que pertenece la franquicia. Es por ello que usualmente estas estructuras no son revisadas ni diseñadas apropiadamente para que cumplan los requisitos mínimos de seguridad, ante fenómenos naturales que pueden afectar al lugar donde están construidas.

En la Figura 3.8 se presentan algunos de los inmuebles que resultaron con afectaciones por el paso del huracán.



Figura 3.8. Daños en comercios

Las imágenes muestran daños provocados por los fuertes vientos principalmente en los elementos no estructurales y en contenidos. En la mayoría de los casos, los sistemas estructurales no tuvieron problema alguno mostrando un buen comportamiento.

Los daños comunes en estos inmuebles fueron principalmente la rotura de vidrios y desprendimiento de fachadas. Al no contarse con muros de mampostería o de concreto, las

ventanas no tienen un apoyo adecuado para soportar las presiones ejercidas por los vientos huracanados, provocando finalmente que los vidrios colapsen y permitan la entrada del viento y del agua, causando estragos en los contenidos y en la funcionalidad del edificio. En cuanto a las fachadas, muchas de ellas están conformadas por paneles prefabricados de concreto y yeso, que están apoyadas en retículas o ganchos de acero fijadas a elementos estructurales. Al ser sistemas ligeros, estos se desprenden fácilmente por la acción del viento o son deteriorados por la humedad.

Existen dos edificios que cuentan con recubrimientos de madera y palma seca (Fig. 8, ED-CM-11 y ED-CM-10). Estos también presentaron desprendimientos de sus elementos de fachada pero sin daños estructurales ni en contenidos.

En los edificios mencionados en los párrafos anteriores, a pesar de las afectaciones, sus elementos estructurales no sufrieron daño alguno. Sin embargo, hubo casos en los que se presentaron fallas de consideración en ciertos componentes del inmueble. En la figura 3.9 se muestra una tienda de conveniencia en la cual, una marquesina compuesta de acero y paneles de concreto colapsó. El viento creó un empuje horizontal en el pretil que servía de soporte a dicha marquesina y el elemento falló por flexión fuera de su plano. Se observa la falta de confinamiento y signos de poca adherencia entre las hiladas de mampostería.



Figura 3.9. Colapso de pretil y marquesina en tienda de conveniencia

Finalmente, todos los establecimientos mencionados fueron reparados y actualmente están en funcionamiento. Nuevamente, usando la herramienta “Google Street View”, se verificó el estado actual de los inmuebles (Figura 3.10). Es visible que siguen usando los mismos elementos no estructurales, aunque probablemente los vidrios tengan especificaciones anticiclónicas para evitar que ocurran nuevamente fallos ante el embate de un huracán en el futuro.



Figura 3.10. Comercios en su estado actual (Google Street View 2014-2015)

3.3.3 Hospitales e infraestructura de salud

De acuerdo a información del CENAPRED, en Quintana Roo se reportaron daños por inundaciones con daños menores en equipo médico. Las afectaciones mayores se dieron en el Hospital General de Cancún y el Hospital General de Cozumel, mobiliario, equipo médico y sistemas de aire acondicionado resultaron con algún tipo de daño. Por otra parte, en el estado de Yucatán solo se identificaron daños menores en 4 unidades de primer nivel de los Servicios de Salud de Yucatán.

Únicamente se tiene información gráfica de un hospital privado ubicado en Cancún, ubicado en Av. Nichupté esq. Con Av. Bonampak, cerca de la zona hotelera (Fig. 3.11). Este edificio tuvo como afectación principal la rotura de vidrios, pérdidas en contenidos y daños importantes en sus instalaciones. Esto derivó en la suspensión de los servicios médicos. El edificio resuelto a base de mampostería y marcos de concreto así como la fachada hecha de losetas, no presentaron daños y mostraron un comportamiento adecuado.

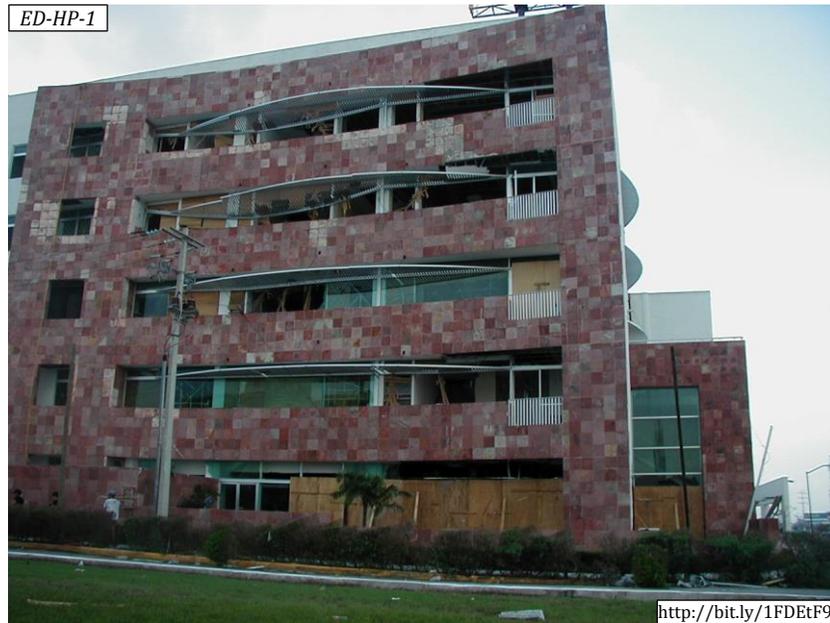


Figura 3.11. Hospital (Av. Nichupté)

Después del paso de Wilma se hicieron modificaciones a varios elementos del edificio. Las pequeñas marquesinas de aluminio fueron removidas y se hicieron modificaciones a las cancelerías, ahora las ventanas están sostenidas por una retícula de aluminio proporcionando un mejor apoyo a los vidrios, en lo que se traduce en un mejor comportamiento de los elementos no estructurales ante el empuje del viento y se reduce la probabilidad de daños en contenidos (Figura 3.12).

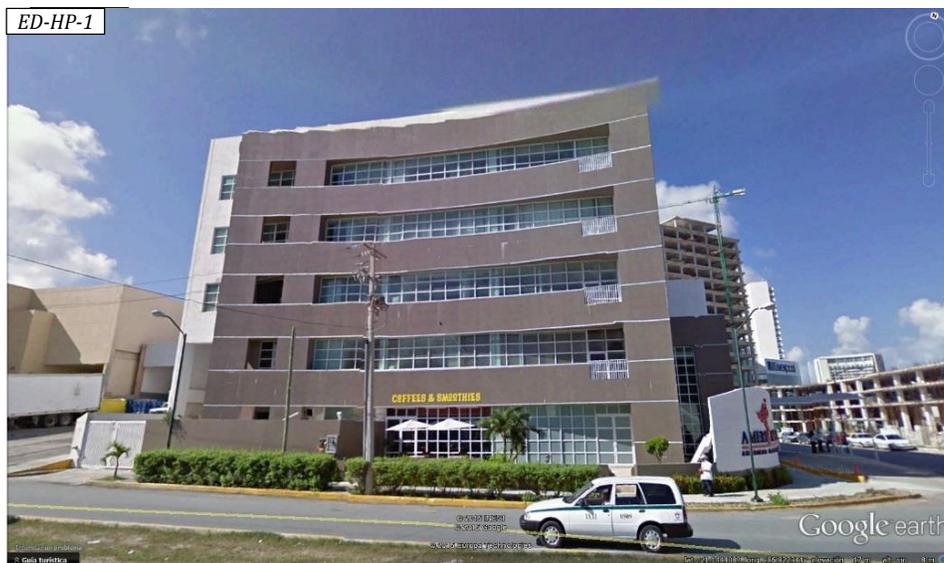


Figura 3.12. Hospital en su estado actual (Google Street View 2015)

3.3.4 Hoteles y condominios

Los daños en hoteles y condominios representan un porcentaje importante dentro del sector de edificaciones y del registro general de daños ocasionados por el paso del huracán Wilma. Estos tipos de edificaciones se distinguen por su altura y contenidos además de ser parte primordial de la infraestructura turística de Cancún y de la Riviera Maya.

Se cuenta con información fotográfica de siete hoteles y un edificio de condominios en Cancún y un hotel en Puerto Morelos.

Los hoteles se concentran en la Zona Hotelera de Cancún a lo largo de la Avenida Kukulcán. Dichos edificios, en su mayoría, presentaron daños en sus elementos no estructurales y de contenidos principalmente (Figura 3.13).

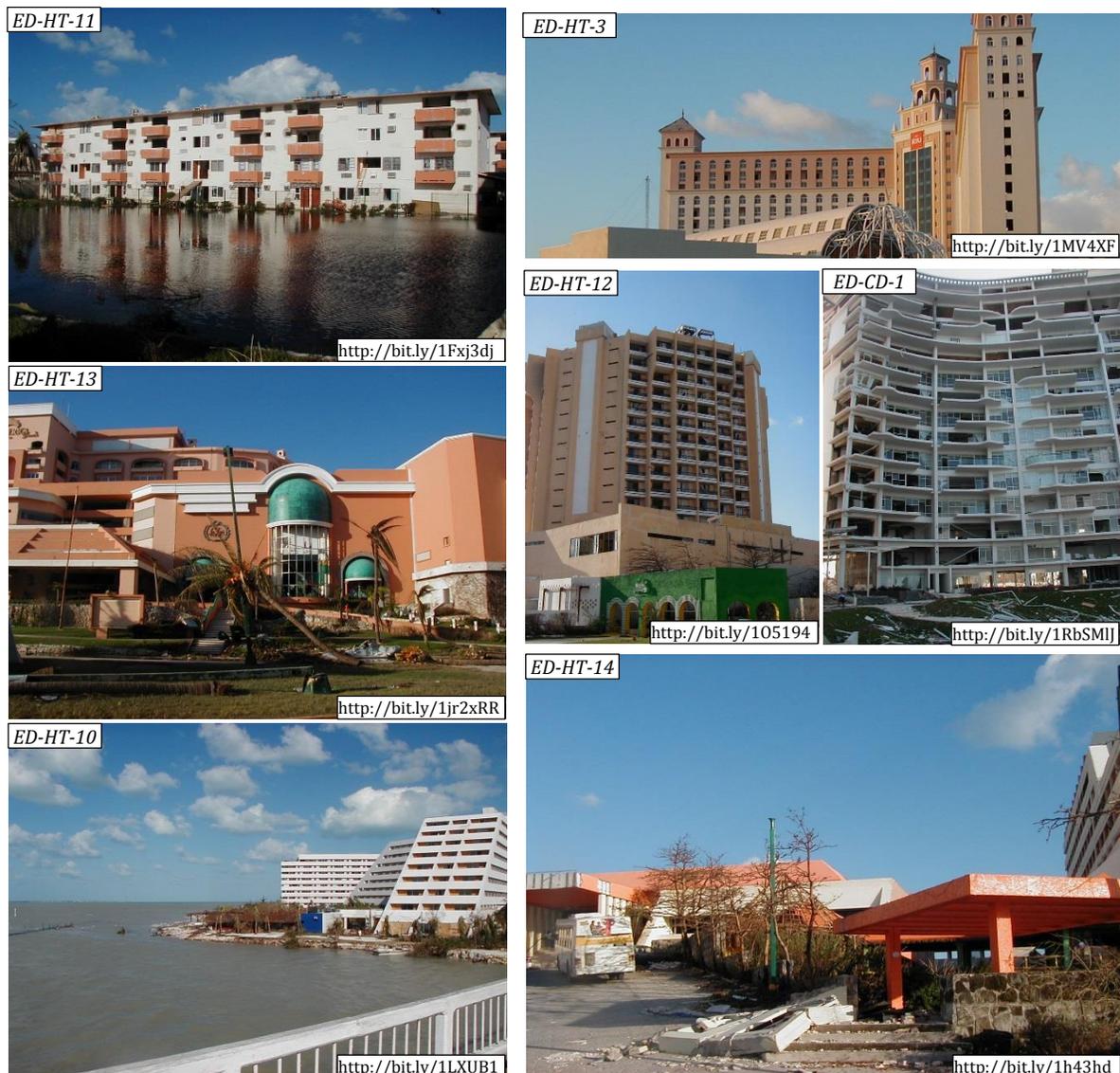


Figura 3.13. Daños en Hoteles y Condominios en la zona hotelera de Cancún

El hotel con el código *ED-HT-3* es uno de los que cuenta con mayor altura en la zona, los elementos de fachada mostraron un comportamiento adecuado, sin embargo, se tuvieron roturas debidas al viento en las ventanas de las habitaciones, provocando que están quedaran inutilizables por la entrada de agua y escombros. Además, se presentaron graves afectaciones a plafones y recubrimientos en el lobby del hotel (Figura 3.14).



Figura 3.14. Lobby del hotel ED-HT-3

De igual manera los hoteles *ED-HT-10*, *ED-HT-12* y *ED-HT-13* presentaron rotura de vidrios y graves daños en sus accesos, contenidos, jardines e instalaciones de recreación.

Esos hoteles junto con el mencionado en el párrafo anterior se distinguen por tener condiciones de irregularidad en su configuración en planta y en elevación. Se tienen formas complejas de planta en forma de “V”, “U”, “Y” y “L”. Estas condiciones de irregularidad estructural ocasionan efectos desfavorables en el comportamiento del edificio ante la acción del viento, debido a que facilitan la formación de vórtices con velocidades de viento muy intensas por lapsos prolongados (Zenteno *et al.* 2006).

A diferencia de los hoteles anteriormente mencionados, el identificado como *ED-HT-11*, tiene una configuración regular en planta y elevación. Se vio afectado principalmente por inundaciones provocadas por la lluvia y el oleaje, además de rotura de algunos vidrios y daños menores en sus contenidos.

Por otro lado se encuentra un condominio de lujo ubicado también en la zona hotelera de Cancún (Fig. 3.13, *ED-CD-1*). Consiste en dos torres con una configuración de planta semicircular con quince pisos de altura. Este resultó con daños en sus cancelerías junto con afectaciones severas en sus contenidos por acción del viento. Se observa también que en algunas partes, las ventanas mostraron un comportamiento adecuado, sin embargo, el edificio no muestra condiciones óptimas para su uso. Además, es notable la cantidad de escombros producidos, los cuales ante la presencia de los vientos huracanados se vuelven proyectiles que ponen en riesgo a la población y a otros edificios cercanos.

Mención especial merecen las edificaciones *ED-HT-14*, *ED-HT-15* (Fig. 3.15) y *ED-HT-16* (Fig. 3.16). En estos se presentaron fallas estructurales en instalaciones recreativas y habitaciones, ocasionadas por la socavación de sus respectivas cimentaciones debido al oleaje elevado que se presentó. La altura de marea de tormenta registrada para el huracán Wilma fue

aproximadamente de 8 m. Estas edificaciones no contaban con muros de contención, a pesar de estar en la primera línea de costa. Dichos hoteles están ubicados, dos de ellos en Cancún y otro en Puerto Morelos, en el estado de Quintana Roo.



Figura 3.15. Socavación por marea de tormenta

La Figura 3.15 muestra la socavación de la cimentación de los hoteles ubicados en Cancún. Del lado izquierdo, se observa el colapso parcial del restaurant que estaba frente al mar, es visible el grado de afectación en los marcos de concreto, los cuales fallaron por flexión ante la inadecuada transferencia de cargas al sistema suelo y el impacto del oleaje. En cambio, en la imagen del lado derecho muestra también una socavación de los elementos de cimentación pero de menor gravedad. La estabilidad de la estructura resuelta a base de marcos de concreto no se ve comprometida, aunque las instalaciones para albercas y esparcimiento resultaron dañadas debido al oleaje. Cabe resaltar que estos hoteles fueron demolidos en el año de 2006 y actualmente no existen edificaciones nuevas en esos terrenos (Fig. 3.17, ED-HT-14-15).



Figura 3.16. Hotel con daño estructural en Puerto Morelos (Fotografía: Michel Rosengaus)

El caso más grave de afectación estructural se observó en un hotel ubicado en Puerto Morelos (Figura 3.16). La imagen muestra un colapso parcial y un evidente daño estructural severo del edificio. El oleaje impactó de forma directa al edificio y al mismo tiempo se daba la socavación del sistema de cimentación, provocando finalmente la falla de las columnas y marcos de concreto ante la demanda de los empujes generados por la marea de tormenta y el viento.

En la actualidad, la mayoría de estos edificios siguen operando, a excepción de dos hoteles, los cuales fueron demolidos. Se observa que fueron reparados y no se detectaron cambios significativos, únicamente algunas modificaciones en las fachadas (Figura 3.17). Un ejemplo es el hotel *ED-HT-3*, que en su parte superior se observa la sustitución del recubrimiento por ventanas sostenidas por una retícula de aluminio. Es probable que esta nueva configuración fuese apropiadamente diseñada para resistir el empuje de los vientos huracanados pero a la vez puede sea más susceptible a sufrir daños ante el impacto de un huracán en el futuro.

En el caso del hotel *ED-HT-16*, no se observa la construcción de un muro de contención, por lo cual la estructura tiene nuevamente un alto riesgo de presentar daños semejantes a los provocados por el huracán Wilma, en caso de que un nuevo ciclón toque tierra en la zona.

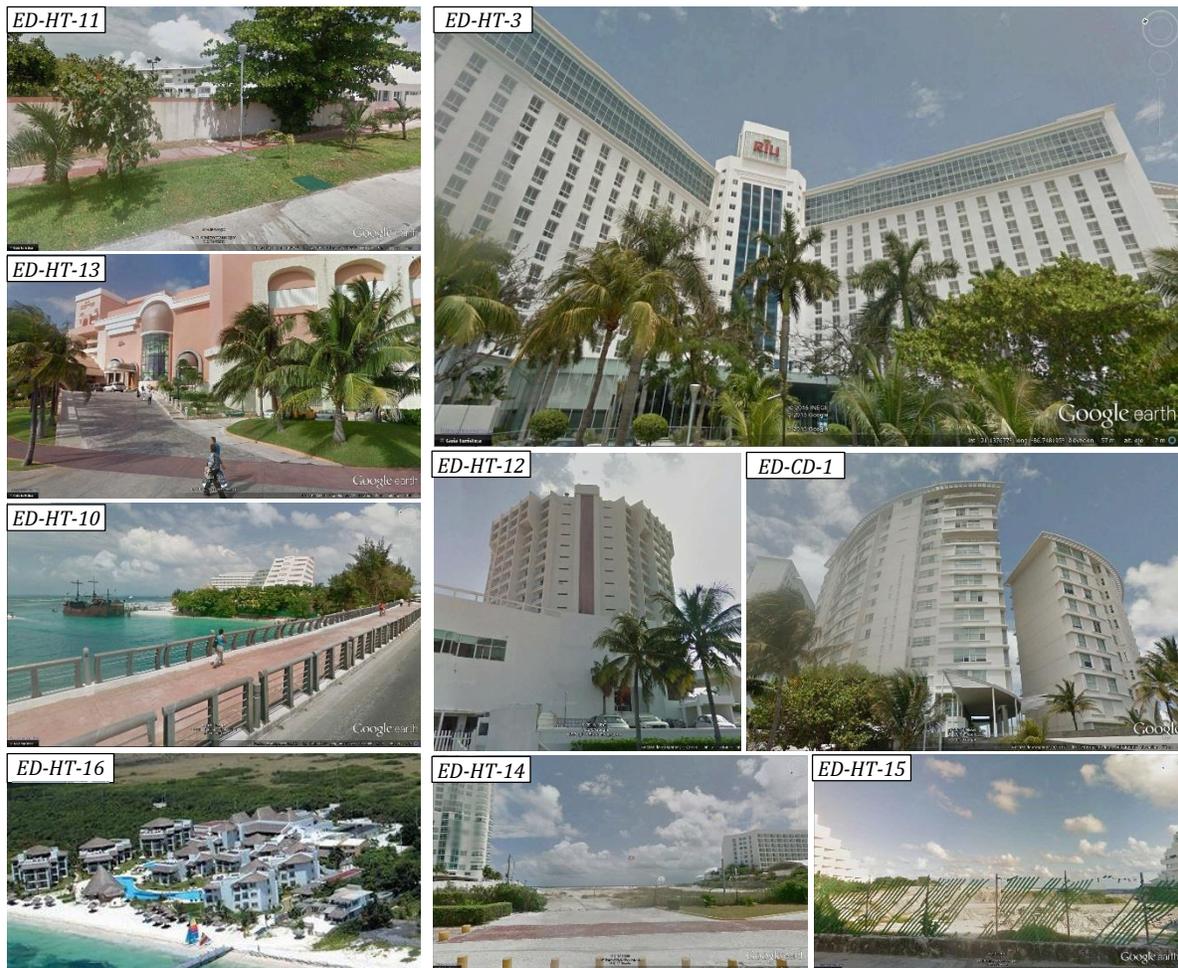


Figura 3.17. Hoteles y condominios en su estado actual (Google Street View 2015)

3.3.5 Plazas comerciales

Las plazas comerciales, la mayoría ubicadas en la zona hotelera, presentaron daños graves en contenidos y elementos no estructurales en fachadas e interiores (Figura 3.18). Estas construcciones se caracterizan por tener secciones con ventanales amplios destinados para exhibición y fines estéticos, los cuales no resisten las presiones del viento y la lluvia, ya sea por no tener apoyos adecuados, o por las bajas especificaciones del vidrio usado en estos edificios. También se nota la presencia de recubrimientos ligeros para ocultar instalaciones en pasillos y accesos a estas plazas, que de igual manera se desprendieron por la fuerza del viento.

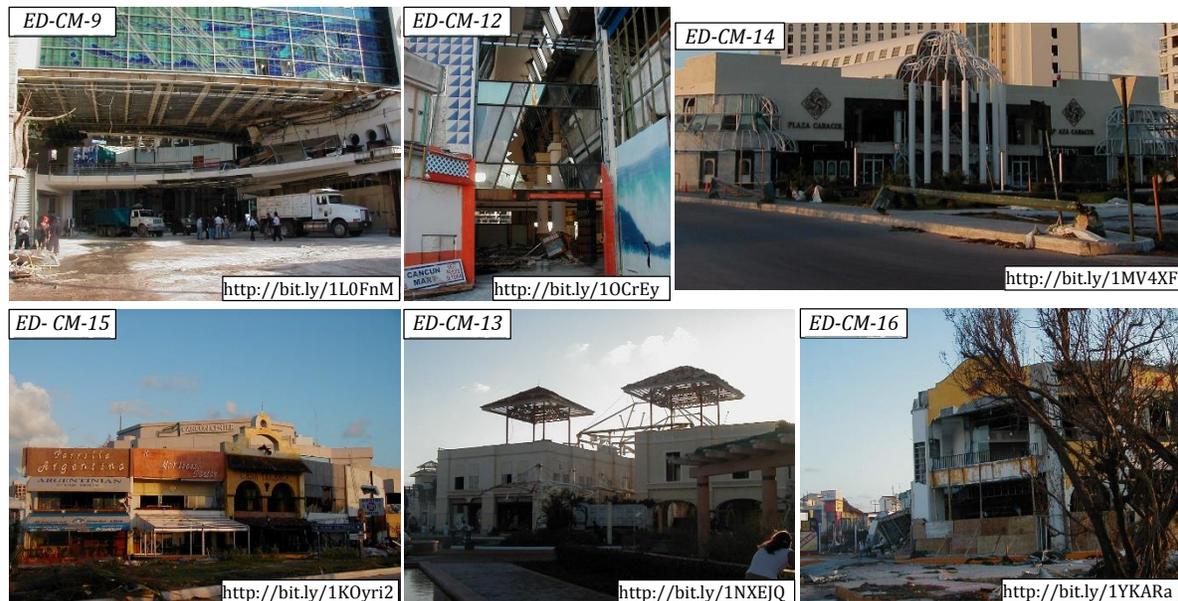


Figura 3.18. Daños en Plazas Comerciales

Los edificios *ED-CM-9* y *ED-CM-12* presentan amplias entradas por las que el viento y la lluvia lograron ingresar al interior, causando daños graves en los contenidos y en la instalaciones. En el segundo, la entrada está recubierta por un vitral de importante área, la demanda generada por las ráfagas de viento provocaron que este vitral colapsara dejando una importante cantidad de escombros. En el resto de los inmuebles se presentaron fallas en los recubrimientos, palapas y marquesinas de lona y aluminio; además de los daños mencionados en párrafos anteriores.

Estas edificaciones no presentaron fallas en sus sistemas estructurales, todos mostraron un comportamiento adecuado ante los empujes generados por los vientos huracanados.

Actualmente, todas las plazas antes mencionadas se encuentran operando, es visible que no se hicieron cambios, a excepción del código *ED-CM-14*, el cual tuvo modificaciones significativas en los elementos de fachada y accesos, sustituyendo las columnas y armaduras de perfil tubular de acero por una techumbre de aluminio con amplios ventanales (Figura 3.19). Los edificios siguen usando sistemas ligeros de panel de concreto y aluminio en recubrimientos y accesos. Es probable que, como en el caso de otros tipos de edificaciones, se usaran vidrios con especificaciones anticiclónicas en lugar de vidrio convencional.



Figura 3.19. Comercios en su estado actual (Google Street View 2015)

La mayoría de edificaciones dañadas en Cancún pertenecen al sector productivo dedicado al turismo. El estado de Quintana Roo genera un tercio de todos los ingresos que por concepto turístico recibe el país y aporta un monto significativo de impuestos al erario público (CENAPRED, 2006). Se estima que el monto de los daños en el sector fue de alrededor de 25,221 millones de pesos, principalmente por pérdidas de infraestructura e ingresos que se dejaron de percibir por la inoperatividad de las instalaciones turísticas.

3.4 Estructuras industriales

Esta clase de estructuras se caracterizan por contar con cubiertas ligeras y grandes áreas expuestas, por esta razón son más vulnerables ante los efectos del viento de un huracán. Dentro de esta clasificación se encuentran naves comerciales de tiendas departamentales, agencias de automóviles y estaciones de servicio. De la misma manera que con las edificaciones, se usará como base para la evaluación de daños diversos registros fotográficos, así como información oficial, de prensa y artículos académicos.

3.4.1 Agencias de autos

Se tiene información a detalle de cuatro agencias ubicadas en la zona urbana de Cancún. Todas ellas tienen sistemas estructurales semejantes a base de columnas, vigas y armaduras de acero con algunas secciones perimetrales de mampostería; recubrimientos y techumbres de materiales ligeros como acero laminado, plafones y paneles de concreto. En los elementos no estructurales cuentan con amplias ventanerías para exhibición, estantería de aluminio y paneles de concreto.

En la Figura 3.20 se presentan tres agencias de autos que resultaron con daños por los efectos de Wilma.

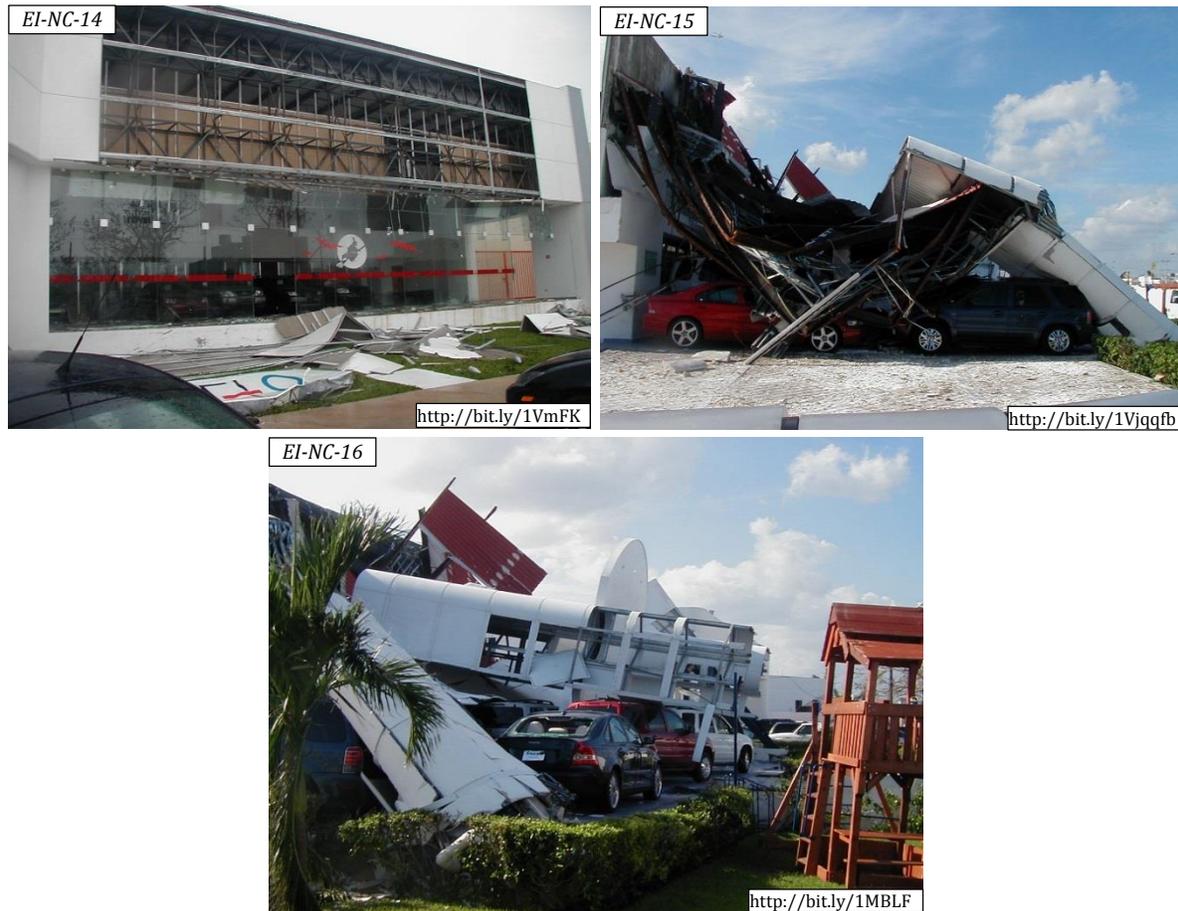


Figura 3.20. Daños en agencias de autos

La imagen con el código *EI-NC-14* muestra desprendimiento de recubrimiento (panel de yeso) en la parte superior de su fachada de exhibición, dejando al descubierto la parte interna del sistema de techado. En la parte inferior se observa que la cristalera mostró un buen comportamiento en la mayoría de sus elementos. Solo tres paneles fallaron. A simple vista se nota que no hubo afectaciones graves a contenidos e instalaciones, únicamente entrada de agua de lluvia, basura y pocos escombros.

En cambio, las agencias identificadas como *EI-NC-15* y *EI-NC-16*, presentaron graves daños a elementos estructurales y no estructurales.

En el primero se tiene un colapso de una cubierta para zona de exhibición al exterior del inmueble, causando pérdidas en contenidos. Dicha cubierta estaba constituida por marcos hechos a base de perfiles Monten, así como de armaduras de aluminio y acero laminado. Es visible el deterioro por corrosión de los perfiles y de los empotramientos previo al huracán. Esta situación propició que estos elementos fallaran por flexión al no soportar las demandas generadas por el viento y el peso propio.

En el segundo se tiene una situación similar, la fachada presenta un colapso de elementos estructurales y recubrimientos. Los apoyos de dicha estructura tampoco soportaron el empuje del viento y la lluvia.

También se encontró que algunas fachadas de estas agencias están fabricadas de amplios ventanales apoyados con retículas de aluminio. La Figura 3.21 muestra a una agencia de autos que contaba con este tipo de fachada. Probablemente, el vidrio no contaba con especificaciones anticiclónicas y ante el empuje del viento y la lluvia, cedió. Consecuencia de lo anterior y aunado al desprendimiento del sistema de techumbre (acero laminado), el viento ingresó al interior dañando las instalaciones, contenidos y acabados que ahí se encontraban. El edificio perdió prácticamente toda su envolvente dejando al descubierto su sistema estructural de vigas y columnas de acero.



Figura 3.21. Agencia de autos en Cancún

Este último ejemplo representa, de forma muy clara, las graves consecuencias de la omisión del diseño apropiado de los elementos no estructurales. Esto es en parte debido a que estas agencias, al igual que algunos tipos de edificaciones vistos anteriormente, se basan en estructuras tipo que no cuentan con un diseño específico para zonas con alto riesgo de impacto de fenómenos hidrometeorológicos.

Todos los inmuebles anteriores fueron reparados y puestos de nueva cuenta en servicio. En las dos estructuras que sufrieron colapsos se modificaron sus respectivas fachadas por configuraciones más compactas y con mejores apoyos para un mejor comportamiento ante el viento, se observa nuevamente la presencia de materiales ligeros para el recubrimiento. Las dos restantes no tuvieron cambios en la configuración y se volvieron a usar los mismos materiales (Figura 3.22).



Figura 3.22. Agencias de autos en su estado actual (Google Street View 2015)

3.4.2 Estaciones de servicio (Gasolineras)

Al igual que tiendas de conveniencia, las estaciones de suministro de gasolina se basan en estructuras tipo para todas las franquicias. En la Figura 3.23 se tienen 4 estaciones que resultaron con afectaciones diversas en su estructura. Constan de una estructura metálica para la techumbre, debajo de esta cuentan con falso plafón además de instalaciones eléctricas. Los faldones perimetrales constan de un panel compuesto de dos paredes de aluminio laminado y núcleo de polietileno de alta densidad.

Toda la techumbre está apoyada en columnas de acero tubular, las cuales están fijadas a una base de concreto por medio de pernos. Estas estructuras no cuentan con envolventes, además de contar con grandes áreas expuestas por donde el viento genera empujes importantes.

Entre los daños más significativos se encuentran los desprendimientos de los recubrimientos y elementos de acero en techumbres por el azote de los vientos; colapso de las columnas por fallas en el anclaje y pérdida en contenidos como bombas despachadoras, estantes e instalaciones de mantenimiento.

Es común que dentro de las estaciones se encuentren pequeñas tiendas de conveniencia, oficinas y sanitarios. Estos presentaron daños como rotura de vidrios, caída de cancelerías, desprendimientos de plafones, afectaciones en instalaciones y pérdidas de contenidos. Se puede deducir que estos daños son consecuencia del impacto del viento junto con los escombros generados por el colapso de las techumbres de la estación de servicio.



Figura 3.23. Daños en estaciones de servicio

Hoy en día, las estaciones se encuentran operando de manera normal, se observa que los sistemas estructurales son semejantes a los usados en 2005, acorde a los lineamientos establecidos por los manuales de operación de la franquicia (Figura 3.24). Probablemente cuenten con materiales con especificaciones anticiclónicas así como con mejores sistemas de anclaje.



Figura 3.24. Estaciones de servicio en su estado actual (Google Street View 2015)

3.4.3 Naves comerciales

Dentro del sector de estructuras industriales, las naves comerciales fueron las más afectadas por los efectos del huracán Wilma. Los daños a este tipo de construcciones fueron generalizados en la zona de Cancún, en donde se encontraron evidencias gráficas. También es importante señalar que no se sabe realmente hasta qué punto los daños fueron provocados directamente por el huracán, ya que en estas tiendas se presentaron daños por rapiña y vandalismo.

Uno de los estragos más comunes fue el desprendimiento de recubrimientos. La Figura 3.25 muestra diversas tiendas departamentales y supermercados en donde se tuvieron estragos en fachadas y techos. Se observa que la mampostería de los muros perimetrales a baja altura mostró un comportamiento adecuado al no tener alguna deficiencia. En la parte superior, se tienen elementos ligeros de recubrimiento como acero laminado, paneles de concreto y yeso apoyados en retículas y armaduras de aluminio; los cuales se desprendieron ante el empuje del viento y el agua.

Las naves comerciales con los códigos EI-NC-3 y EI-NC-10 tienen las afectaciones más graves de este tipo. En el primero es visible un colapso de las retículas que servían de apoyo a recubrimientos y techumbres. Los esfuerzos generados por el viento fueron lo bastante grandes para hacer fallar por flexión a estos elementos. En el segundo, se tuvo una pérdida prácticamente total de la envolvente superior de una tienda de artículos de oficina, permitiendo que la lluvia ingresara al interior provocando cuantiosas pérdidas en contenidos. En las dos imágenes restantes, los daños fueron solamente estéticos, a excepción de los accesos, provocados aparentemente por rapiña.



Figura 3.25. Daños en Naves Comerciales

Otro daño observado fue el colapso de los muros de mampostería perimetrales de las naves. La Figura 3.26 presenta estos casos, donde los muros mostraron un comportamiento deficiente, las cuales fallaron por flexión fuera de su plano, debido al empuje generado por los vientos huracanados, junto con la lluvia. En las imágenes es visible el escaso confinamiento en la construcción, siendo los códigos *EI-NC-8* y *EI-GM-1* más representativos, los cuales perdieron la mayoría de su envolvente.

Ambos muestran una separación grande entre los elementos verticales de confinamiento, junto con la inexistencia de dalas para el confinamiento horizontal. Esta situación provocó que los muros no resistieran el impacto del viento y finalmente fallaran, dejando pasar el agua y el viento al interior de las naves llevándose todo a su paso.

Tomando como base a las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (NTC-M, 2004) del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal; la separación máxima entre los castillos de confinamiento no debe ser mayor a los 4 m y no mayor de 3 m para las dalas, además se debe de contar con confinamientos en los extremos y uniones con otros muros.

En la imagen con el código *EI-NC-13*, de igual manera se encontraron deficiencias en la construcción de los muros. Se observa el escaso refuerzo de los castillos de confinamiento y los pretilos no cuentan con dalas en su parte superior.

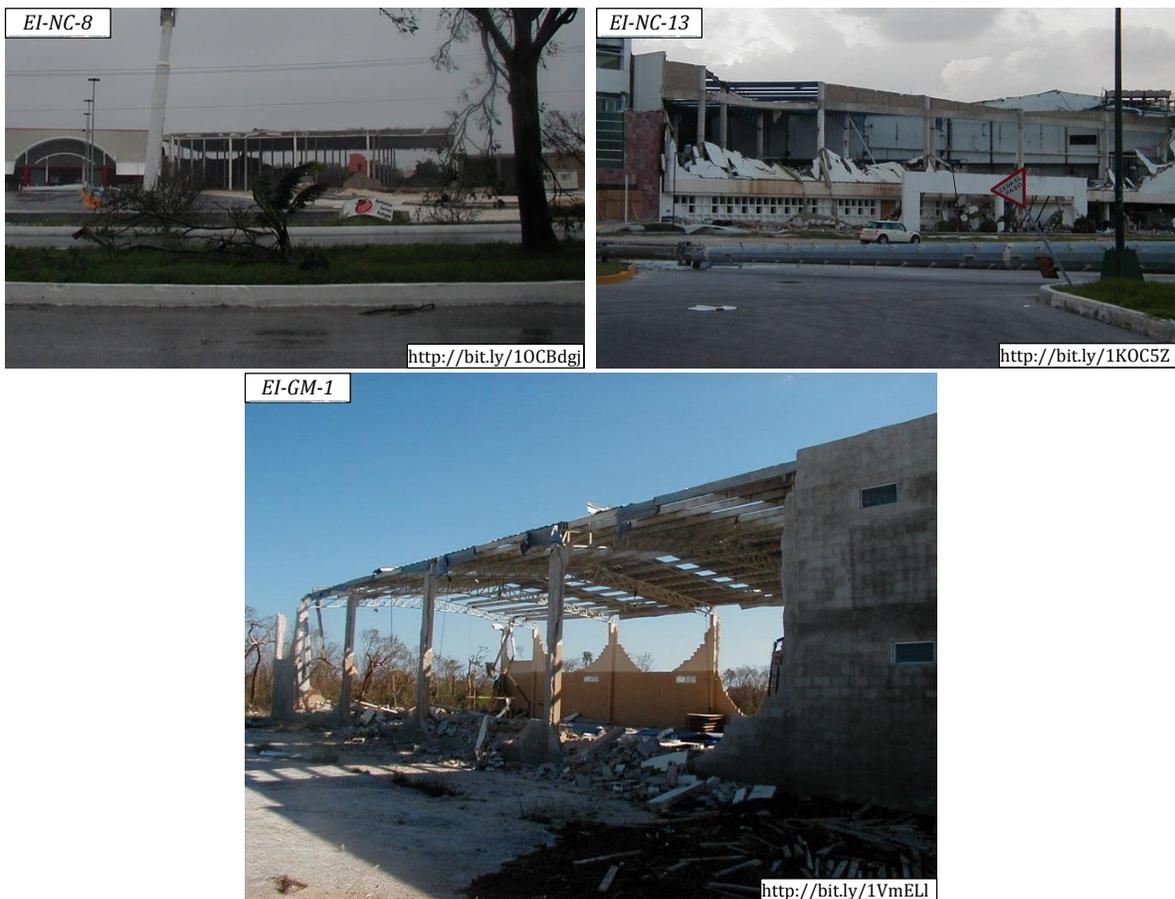


Figura 3.26. Daños en cubiertas y mamposterías

En la Figura 3.27 se muestra una bodega de muebles, la cual presenta daños por desprendimiento de la cubierta ligera en la parte superior, junto con daños en los muros perimetrales. Se observa que los elementos ligeros no estaban apropiadamente anclados al sistema estructural de trabes y columnas de acero, el cual no tuvo alguna falla estructural. En la planta superior, se tienen graves afectaciones a los contenidos, sin embargo, en la planta baja no sufrieron daños gracias a que la cubierta en dicho nivel está compuesta por losas de concreto y muro de mampostería confinada por columnas de acero. Los accesos presentan daños provocados probablemente por actos de saqueo.



Figura 3.27. Daños en bodega de muebles

Finalmente, todas las naves mencionadas están nuevamente en servicio sin mayores cambios en sus sistemas estructurales y no estructurales (Figura 3.28). Las cubiertas ligeras siguen usándose en sus envoltentes aunque es difícil saber si sus muros perimetrales fueron reparados adecuadamente o se tengan mejores sistemas de anclaje entre las cubiertas ligeras y las columnas de acero y concreto.



Figura 3.28. Naves Comerciales en su estado actual (Google Street View 2015)



Figura 3.28. (Continuación)

3.5 Sistemas extendidos

Este sector fue uno de los más perjudicados por los efectos del huracán Wilma, ya que muchas de las estructuras que componen a estos sistemas son altamente vulnerables a los vientos y a la lluvia que se generan durante el paso de un huracán. Dentro de esta clasificación se encuentra la infraestructura aeroportuaria, carretera, eléctrica, portuaria (junto con las playas), de telecomunicaciones etc.

3.5.1 Aeropuertos

En Quintana Roo, los aeropuertos del estado suspendieron operaciones el 21 de octubre de 2005, mismo día en el que Wilma tocó tierra, mientras que en Yucatán los aeropuertos siguieron operando, principalmente el de Mérida, ayudando a la evacuación de turistas de la península de Yucatán.

El aeropuerto más dañado fue el de Cancún; según datos de Grupo Aeroportuario del Sureste (ASUR) en un reporte posterior al huracán, el 50% de la superficie de oficinas administrativas resultó severamente dañada. En la Figura 3.29 se muestra el sistema estructural a base de trabes y armaduras de acero, apoyadas en columnas de concreto. Es notorio el nivel de daño dentro de una de las salas de espera en la terminal dos.

Se tienen desprendimientos importantes de recubrimientos, así como la pérdida de instalaciones y mobiliario. El sistema estructural de la techumbre y muros no resultó averiado, pero se perdió prácticamente la totalidad de la envolvente, provocando la entrada de viento y lluvia, lo cual generó graves daños a los contenidos de la sala de espera y de los comercios que se encontraban también al interior de la terminal.

Las pistas de aterrizaje y de maniobras no tuvieron afectaciones mayores, salvo acumulación de basura y escombros. Para el día 24 de octubre de 2005 el aeropuerto reinicia operaciones exclusivamente para maniobras de traslado de ayuda y equipo por parte del Ejército Mexicano.



Figura 3.29. Afectaciones sala de espera del Aeropuerto Internacional de Cancún - Terminal 2.

Al igual que en algunas estructuras mencionadas anteriormente, es difícil conocer el estado real actual de la estructura, así como el comportamiento que tendrá ante el embate de un nuevo huracán. A simple vista, el aeropuerto utiliza los mismos materiales en los sistemas no estructurales, como lo son fachadas, interiores y recubrimientos (Figura 3.30).



Figura 3.30. Aeropuerto Internacional de Cancún en su estado actual (Google Street View, Wikipedia.org)

3.5.2 Carreteras y puentes

El estado de Yucatán tuvo mayor número de reportes de afectaciones en vías de comunicación, todas ellas de administración estatal concentradas en el municipio de Tizimín al oriente del estado. Esta zona es una de las más bajas del estado, todas las carreteras que resultaron afectadas atraviesan dicha zona, la cual se caracteriza principalmente por sus llanuras de caliza con vegetación selvática, en las cuales es común que se presenten inundaciones debido a precipitaciones.

El primero de los tramos afectados fue la carretera Colonia Yucatán – El Cuyo que atraviesa los humedales de la reserva Ría Lagartos antes de llegar a El Cuyo; se reportaron afectaciones en treinta alcantarillas, de las cuales cuatro fueron daños totales. Los entronques a Dzonot Carretero y a Cenote Azul, junto con la salida a la comunidad de Santa Rosa tuvieron rupturas y fallas en alcantarillas. La causa de las afectaciones fueron las inundaciones consecuencia de la precipitación torrencial durante el paso del huracán Wilma. Otra carretera que tuvo daños fue la que comunica a las poblaciones de Tizimín y Colonia Yucatán, esta también tuvo daños por inundaciones con afectaciones en 45 km.

En el estado de Quintana Roo no hubo estragos graves a diferencia de los que se tuvieron en Yucatán, las afectaciones consistieron en la obstrucción del paso vehicular por caída de árboles y de postes de energía eléctrica y algunas inundaciones puntuales de hasta 1.5 m de tirante sin mayores daños estructurales a los caminos. La carretera Felipe Carrillo Puerto – Cancún, y la autopista Mérida – Cancún fueron las afectadas.

Todas las carreteras mencionadas anteriormente se repararon y actualmente están operando y muestran un buen aspecto, después de varias temporadas de lluvias desde 2005 (Figura 3.32). Sin embargo, se observa que no están recibiendo un mantenimiento adecuado, en el código SE-CR-3, es notorio que ese tramo no cuenta con terraplén ni con un sistema adecuado de drenaje por lo cual sigue siendo vulnerable a inundaciones. En las carreteras afectadas en Yucatán (Figura 3.31), se propuso un mejoramiento a la vía por medio de riego de impregnación para evitar filtraciones durante la época de lluvias, además de incrementar la altura de los terraplenes para evitar inundaciones.

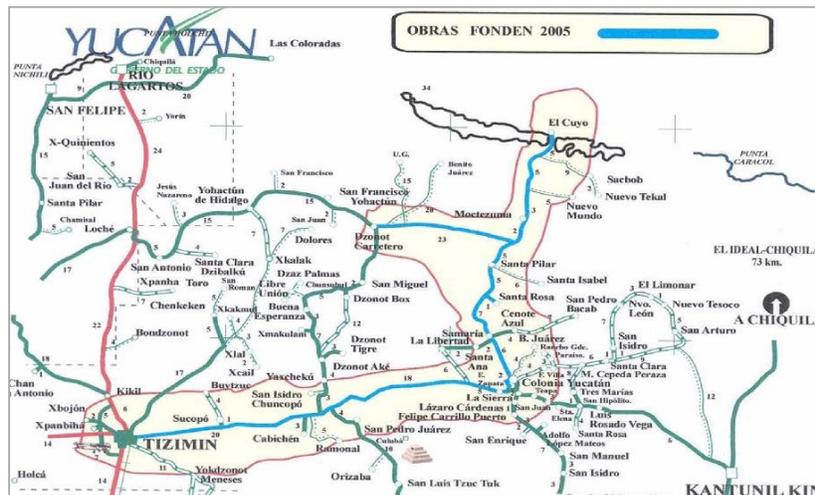


Figura 3.31. Carreteras reparadas al oriente de Yucatán (Comisión de Vías Terrestres de Yucatán)

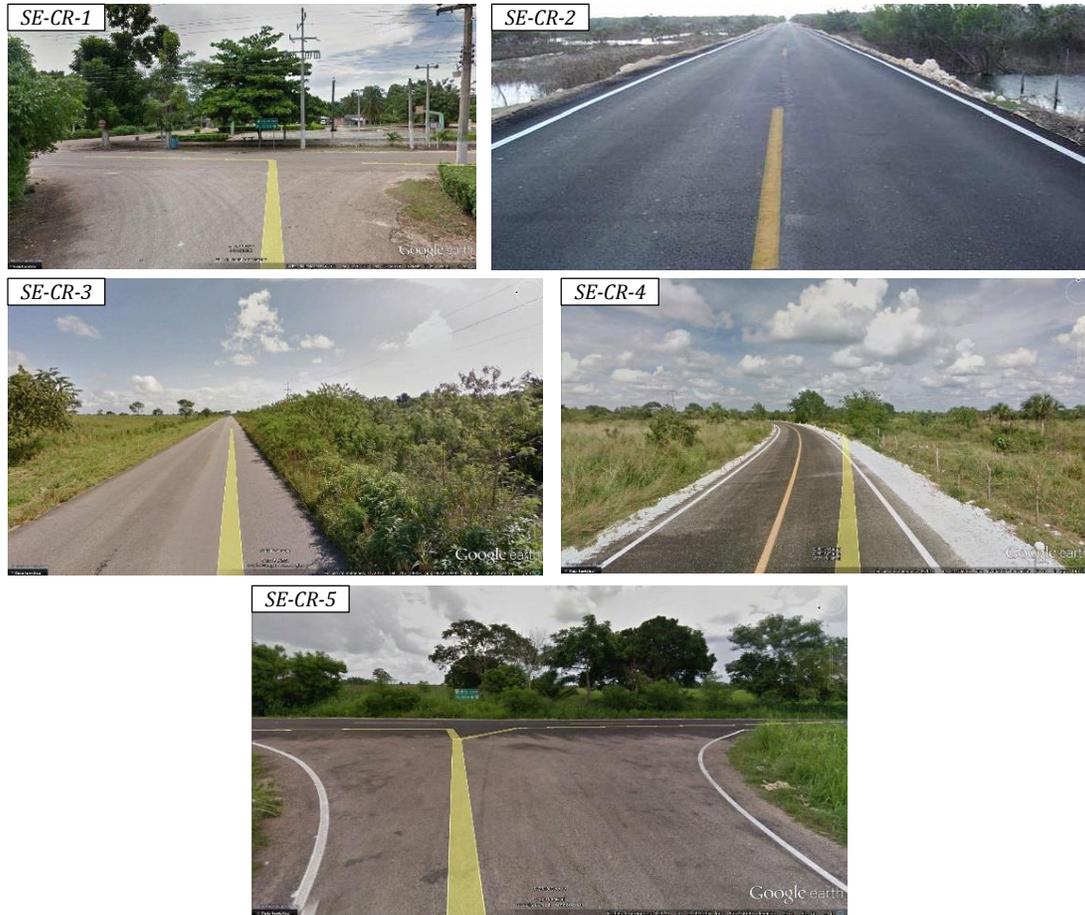


Figura 3.32. Carreteras en su estado actual (Google Street View – CENAPRED)

Dentro de la infraestructura carretera se encuentran también los puentes, se encontró información sobre daños en tres puentes localizados en la costa yucateca del golfo, específicamente en los puentes de acceso a las poblaciones de Telchac Puerto, Chabihau y Santa Rosa.

Las localidades están ubicadas en una franja de tierra firme entre el mar y diversas lagunas, por lo que la zona es susceptible a inundaciones. Las lluvias provocadas por Wilma incrementaron el nivel de agua en la laguna y los vientos por su parte aumentaron la altura del oleaje. Según la información del diario “La Crónica de Hoy” y Notimex, los puentes presentaron daños por inundación y socavación en los terraplenes de acceso en los costados que dan a la playa. Lamentablemente no se tiene evidencia gráfica de los desperfectos para analizarlos a detalle.

La Figura 3.33 muestra a los puentes antes mencionados en su estado actual. Es claro que siguen siendo altamente vulnerables a inundaciones, ya que están en medio de cuerpos de agua de considerable tamaño, además de estar a lo máximo a 2 m de altura con respecto al nivel del agua. Es importante corregir estos problemas para garantizar la comunicación de estas poblaciones con el resto del estado y del país ante una situación de contingencia por fenómenos hidrometeorológicos.

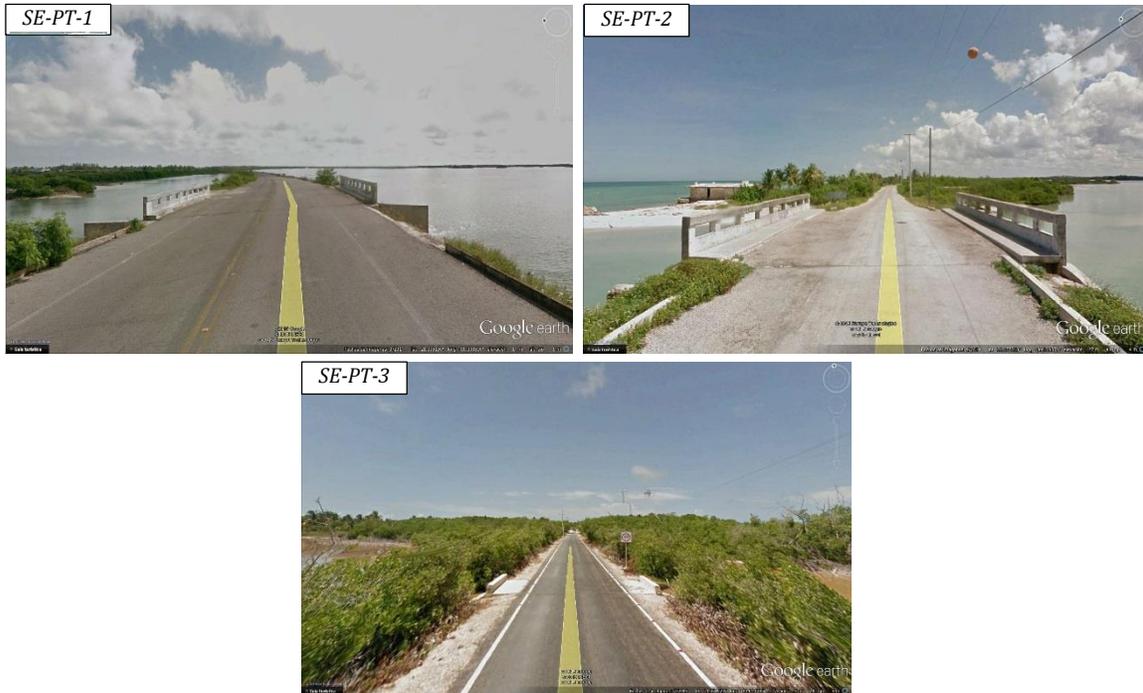


Figura 3.33. Puentes en su estado actual (Google Street View 2015)

3.5.3 Infraestructura eléctrica

El sector eléctrico sufrió severos daños ante el embate del huracán Wilma. De acuerdo a datos del CENAPRED, el costo por daños directos a la red eléctrica ascendió a los 352 millones de pesos solo en Quintana Roo, mientras que en Yucatán el costo fue de 45.5 millones de pesos. La suspensión del servicio de energía eléctrica afectó a más de 300 mil personas en ambos estados por alrededor de 3 días.

Las estructuras más afectadas en la red fueron los postes; estos generalmente están contruidos de concreto reforzado y son usados principalmente para sostener líneas de baja a media tensión, aunque también se usa ocasionalmente postes de madera para este fin. En cambio en la alta tensión, se usan estructuras de acero, las cuales pueden ser torres fabricadas con solera y perfiles “L”, o bien, postes metálicos de perfil circular. Los postes y las torres también pueden estar contruidos por estructuras híbridas de acero y concreto reforzado.

Los postes de alta tensión son altamente vulnerables ante la presión del viento, debido a que pueden alcanzar alturas de los 25 m a 50 m lo que generaría enormes esfuerzos de flexión en estas estructuras.

Un claro ejemplo de las fallas que pudiesen ocurrir en estas líneas de transmisión lo tenemos en la Figura 3.34. La imagen nos muestra el colapso de una línea de transmisión que se encontraba sobre la Av. Bonampak, en Cancún. Los postes de acero presentan fallas por flexión debidas a ciclos de carga continuos generados por las ráfagas de viento, las cuales alcanzaron una velocidad de 190 km/h.



Figura 3.34. Daños por flexión en líneas de alta tensión en Av. Bonampak, Cancún.

Hoy en día, la línea de transmisión de alta tensión fue sustituida por una de mediana tensión, probablemente para evitar usar estructuras de altura importante, necesarias para las líneas de alto voltaje. Los postes actuales son de concreto reforzado de una altura no mayor a los 15 m para minimizar el riesgo de colapso ante la presencia de vientos de gran intensidad (Figura 3.35).



Figura 3.35. Línea de media tensión en Av. Bonampak en la actualidad (Google Street View 2015)

3.5.4 Infraestructura portuaria y playas

Debido al extremo oleaje que se presentó en la costa del caribe mexicano, hubo serios daños en diversas estructuras portuarias tanto en Quintana Roo y Yucatán.

En Yucatán, específicamente en el puerto de El Cuyo, se reportó el colapso del faro del puerto. Desafortunadamente no se cuenta con información gráfica de los daños al faro, únicamente con diversos artículos de prensa (El Universal, Terra Networks) en donde se reporta la destrucción del faro a causa de las ráfagas de viento.

De acuerdo a información proveniente de la Secretaría de Marina, el sistema estructural del faro se basa en una torre cilíndrica de concreto armado, la cual se asienta en la cima de un cerro, lo que lo hace vulnerable a la acción del viento. No se sabe realmente si el faro usara esos materiales en su estructura al momento del paso del huracán Wilma, ya que no existe información sobre el historial de modificaciones del faro. La Figura 3.36 muestra el estado del faro en 1999.

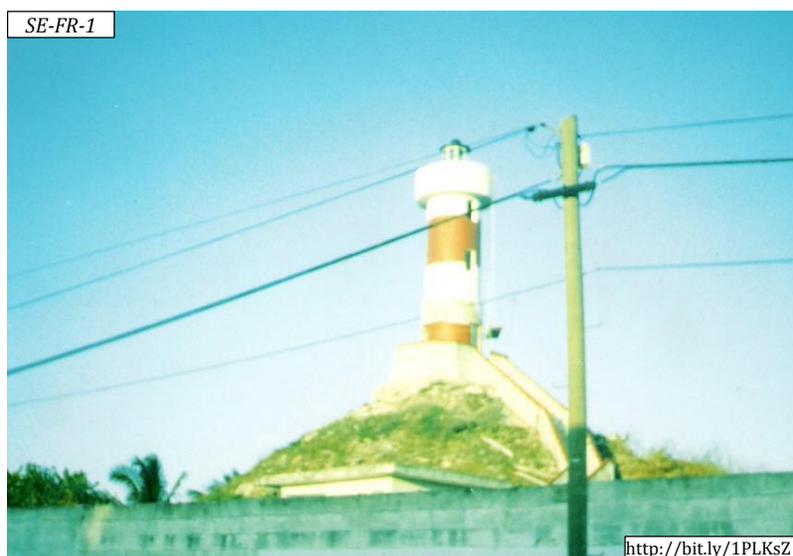


Figura 3.36. Faro de El Cuyo en 1999

Con esta información solo se pueden hacer suposiciones sobre los detalles del colapso del faro. Una de ellas es considerar que el concreto no estaba debidamente reforzado; por lo anterior, el empuje del viento, junto con la lluvia y escombros, provocó colapsos parciales en la parte superior del faro. Tampoco se descarta un colapso por volteo causada por las fuerzas horizontales del viento y un comportamiento deficiente de la cimentación, ya que la torre está construida sobre antiguas ruinas mayas y rellenos inestables.

El faro en la actualidad está operando normalmente, se observa en la Figura 3.36 que se encuentra en buen estado sin signos de deterioro, indicando un mantenimiento apropiado.

Después del huracán Wilma no se tienen registros de daños al faro en huracanes posteriores, lo que indica que se realizaron correcciones a las deficiencias en la estructura y que ahora muestra un buen comportamiento ante los vientos huracanados, asegurando su operatividad como señalamiento marítimo.



Figura 3.37. Faro de El Cuyo en su estado actual (Google Street View 2013)

En Quintana Roo se tienen datos sobre daños en el malecón de la isla de Cozumel y de dos terminales para ferrys en Cancún (Figura 3.38).

La imagen izquierda, muestra los daños que se presentaron en el malecón. El muro de contención mostró un buen comportamiento ya que no se ven indicios de socavación o asentamientos.

Sin embargo, en las aberturas para los accesos a embarcaderos, el oleaje elevado provocó la socavación del firme de tierra, así como el levantamiento de las losas de concreto tanto de la acera como del arroyo vehicular. Las tuberías de polietileno para líneas de transmisión de energía eléctrica también resultaron afectadas por la socavación.

El código *SE-TF-1* presenta los restos de una terminal para una línea de ferrys en Cancún, localizada en Playa Tortugas dentro de la zona hotelera. El sistema de cimentación para la terminal y los accesos está resuelta a base de pilotes hincados en la playa y una retícula de vigas de madera sobre la superficie del agua. La cimentación mostró un buen comportamiento, pero los tabloncillos usados para los accesos se desprendieron, quedando únicamente los elementos estructurales de dicha cimentación.

La terminal perdió la totalidad de su envolvente junto con la mayoría de su superestructura ante los efectos combinados del viento y el oleaje, quedando únicamente en pie la base de la estructura y una cantidad importante de escombros. El código *SE-TF-2*, ubicado en Playa del Carmen, tuvo principios de socavación de su cimentación a base de mampostería, además de daños similares a la terminal de Cancún en cuanto a desprendimiento de palapas y estragos a elementos no estructurales.

Es visible el uso de materiales ligeros con fines estructurales, como son palapas, paneles de concreto, tabloncillos de madera con sujeciones de acero y cancelerías de aluminio. Este tipo de estructuras muestran poca resistencia ante la acción de fuertes vientos, por lo que generalmente resultan severamente dañadas, afectando las construcciones y contenidos.



Figura 3.38. Daños en infraestructura portuaria

En la actualidad las estructuras antes mencionadas están prestando nuevamente servicio. En el caso del malecón, las aceras junto con la calle fueron reconstruidas sin cambios importantes. Los muelles y las terminales para los ferrys continúan empleando sistemas ligeros de recubrimientos y techumbres, por lo cual siguen siendo altamente vulnerables a vientos y oleajes extremos que se presentan durante el impacto de un huracán (Figura 3.39).



Figura 3.39. Infraestructura portuaria en su estado actual (Google Street View – Panoramio 2015)

Las playas, junto con la infraestructura portuaria, tuvieron graves daños ante la marea de tormenta causada por el huracán Wilma. Las playas son acumulaciones de materiales no consolidados en zonas litorales y están sujetas a la acción del oleaje, las corrientes, los vientos y las mareas (Carranza-Edwards, 2009).

Una de las más afectadas fue Playa Langosta en Cancún (Figura 3.40), ya que además de la erosión, también se vio afectada por acumulación de restos de vegetación y escombros de edificaciones cercanas. En general, las playas de Cozumel, Playa del Carmen y principalmente la zona hotelera de Cancún, tuvieron serios problemas de erosión.



Figura 3.40. Daños por erosión de playas (Fotografías: Michel Rosengaus)

La erosión costera es un fenómeno natural causado por procesos climatológicos, meteorológicos, hidrodinámicos y sedimentarios que junto con la batimetría de fondo de la costa provoca un retroceso de las playas (Guido A. *et al.* 2009).

El paso del huracán Wilma provocó pérdidas de arena en las playas, las cuales perdieron su ancho y en algunas partes quedó expuesto al aire libre el estrato rocoso. La erosión frecuentemente se debe a causas naturales, pero en el caso de Cancún, las actividades humanas en la isla barrera en donde se encuentra la zona hotelera tienen una influencia importante; en especial la construcción de hoteles en las dunas de las playas, la pérdida de vegetación en los corales y la construcción de obras de contención.

Ante esta situación en 2006, el gobierno federal en conjunto con el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), desarrollaron un proyecto para la recuperación de playas, el cual consistió en el dragado de 2.5 millones de m³ de arena, proveniente de bancos en el fondo del mar caribe, junto con la instalación de geotubos para la protección de la línea costera. El objetivo era recuperar 25 m de franja de playa a lo largo de 11 km de costa en la zona hotelera (Figura 3.41).



Figura 3.41. Trabajos de recuperación de playas en Cancún

A pesar de estos esfuerzos y de dragados posteriores, la erosión se sigue presentando en las playas, actualmente este fenómeno se encuentra bajo estudio ya que el evento es complejo y que depende de muchos factores

3.5.5 Infraestructura de telecomunicaciones

En diversas partes de Yucatán y Quintana Roo hubo colapsos de líneas telefónicas y de antenas de radio, televisión y telefonía celular. De forma similar con la infraestructura eléctrica, los daños se centraron en la caída de postes y torres metálicas por los efectos del viento.

Se tiene información gráfica a detalle del colapso de una antena repetidora de TV, perteneciente a una conocida cadena televisora del país. Su altura era de aproximadamente de 140 m desde nivel de piso, la torre estaba formada por una armadura de acero fijada a una base de concreto por medio de pernos.

La Figura 3.42 muestra que la estructura fallo por flexión, al igual que en postes de energía eléctrica, las ráfagas de viento crearon ciclos continuos de carga que provocaron la falla de los elementos principales de la armadura.

Cabe resaltar que la antena se encuentra justo en medio de una zona habitada de clase popular, por lo que un colapso como el ocurrido durante el huracán Wilma puede causar daños colaterales graves a las viviendas cercanas y a la integridad física de sus habitantes.

Hoy en día, dicha antena se encuentra en operación, conserva el mismo sistema estructural, aunque probablemente sus elementos tengan especificaciones más rigurosas en cuanto a resistencia ante la flexión generada por empujes horizontales. La ubicación de la antena sigue representando un severo peligro para los habitantes de las viviendas aledañas a esta antena, que están prácticamente de frente hacia la estructura (Figura 3.43).



Figura 3.42. Colapso de antena repetidora de TV



Figura 3.43. Antena repetidora en su estado actual (Google Street View 2015)

3.6 Vivienda

En el estado de Yucatán, este sector fue el que sufrió mayores daños, ya que generó cerca del 50% de los daños totales consecuencia del huracán Wilma en el estado, con un total de 6230 viviendas afectadas de acuerdo a estadísticas del CENAPRED y de SEDESOL. Los daños se debieron a las condiciones marginales de las viviendas, las inundaciones y a la lluvia torrencial.

Estas viviendas están fabricadas de elementos ligeros en sus techos, como puede ser acero laminado, madera o palma seca; los muros también presentan materiales ligeros en su estructura, en algunos casos puede ser de mampostería construidas con técnicas de

autoconstrucción. Las cancelerías generalmente son de acero, aluminio y vidrio convencional (Figura 3.44).



Figura 3.44. Viviendas dañadas en el estado de Yucatán

En Quintana Roo, los daños se concentraron en el municipio de Benito Juárez con un 55% de las viviendas afectadas en el estado. La mayoría de las viviendas afectadas se ubican en zonas populares de bajos ingresos, aunque también hubo daños en residencias de lujo.

En la Figura 3.45 presenta los daños en una residencia ubicada en Av. Bonampak en Cancún, los elementos no estructurales nuevamente resultaron los más afectados. Es visible el desprendimiento de recubrimientos exteriores e interiores, rotura de vidrios, colapso de cancelerías de aluminio y múltiples escombros en los tres niveles de la vivienda.

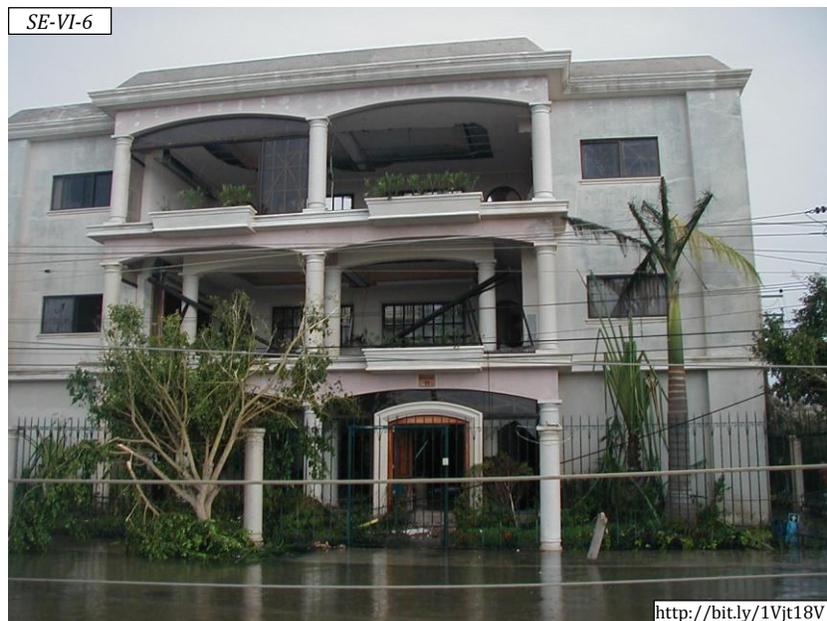


Figura 3.45. Afectaciones en residencia de Av. Bonampak, Cancún

Como se mencionó anteriormente, la mayoría de las viviendas afectadas pertenecen a familias de escasos recursos económicos. Por esta razón, las construcciones suelen estar fabricadas con materiales ligeros de bajas especificaciones, además del uso de técnicas de autoconstrucción deficientes que hacen más vulnerables a las viviendas ante los efectos de un huracán con la intensidad de Wilma. Los perjuicios a estos hogares se registraron a elementos estructurales, no estructurales y contenidos. La Figura 3.46 contiene imágenes de las afectaciones generales a las viviendas de la colonia Región 94 en Cancún, dos días después del paso del huracán Wilma.



Figura 3.46. Daños en viviendas en la Colonia "Región 94" de Cancún, Quintana Roo.

La imagen I de la figura anterior presenta el colapso de una barda de colindancia entre dos predios, es visible el poco confinamiento así como mortero de calidad deficiente y baja adherencia entre hiladas de elementos de mampostería. La imagen VI muestra parte de una barda perimetral de una vivienda en donde no existe ningún tipo de cementante entre los elementos de la mampostería volviendo a la estructura extremadamente inestable.

Otro daño generalizado que se observó es el desprendimiento de los techos de las casas, estos techos comúnmente son de láminas de acero ancladas a retículas de madera o montenes. Estos sistemas ligeros son altamente susceptibles a los efectos del viento, inclusive a baja altura.

Existen casos como los de las imágenes III y IV de la figura anterior, en donde se usan láminas de cartón corrugado comprimido por ser las más accesibles para personas con bajos recursos económicos. Este tipo de lámina ofrece poca resistencia a la humedad y a las cargas, lo que conlleva a un comportamiento deficiente ante la acción de la lluvia y el viento, finalmente la falla del techo permitió la entrada de la lluvia y el viento al interior, dañando seriamente a los contenidos.

Al igual que el estado de Yucatán, diversos predios se vieron afectados por las inundaciones en diversas partes de Cancún como lo muestra la imagen V, en donde parte de la calle al fondo se encuentra bajo el agua. Las inundaciones afectan de forma más severa a los contenidos y a la funcionalidad de los hogares, volviéndolas inhabitables temporalmente.

El daño más severo se muestra en la imagen II, en donde una vivienda colapsó a causa del viento y de la precipitación. El sistema estructural estaba compuesto de elementos de madera, como polines, tablones y palos. Es notable el avanzado deterioro de la madera y de las condiciones precarias en las que se encontraba la vivienda, situación por la cual, la estructura debilitada no soportó los empujes del viento combinado con la lluvia provocando su colapso.

Finalmente, según información del CENAPRED y del Instituto de Fomento a la Vivienda de Quintana Roo, 4,571 casas fueron pérdida total y 15,409 experimentaron daños parciales en todo el estado.

Varias de las viviendas mencionadas fueron reconstruidas con recursos del Fondo Nacional de Habitaciones Populares. Las condiciones de estos hogares siguen siendo precarias y por ende muy susceptibles a daños ante el paso de un huracán en el futuro.



Figura 3.47. Calle dentro de la colonia "Región 94" en la actualidad (Google Street View 2015)

4. NORMATIVIDAD

En este capítulo se realizará una revisión de los diferentes reglamentos de construcción y normas técnicas complementarias, aplicadas a los municipios que resultaron más afectados por el huracán Wilma. Se hará énfasis en los criterios relacionados con los efectos del viento sobre las construcciones, principalmente en elementos no estructurales. Además, se revisarán las velocidades de viento consideradas para el diseño estructural, así como la clasificación de la estructuras con sus respectivos tiempos de retorno.

4.1 Normatividad previa al impacto del huracán Wilma

En México, la mayoría de los municipios cuentan con un reglamento de construcción en donde se describen los lineamientos que deben seguir las edificaciones en términos de seguridad, habitabilidad e higiene, entre otros aspectos.

En algunos casos, estos reglamentos cuentan con sus respectivas normas técnicas complementarias, que detallan y amplían los requisitos que se mencionan en los reglamentos. Muchas veces estas normas técnicas complementarias no son realizadas por los municipios o no están disponibles; por esta razón, es común que se use el Manual de Obras Civiles de la Comisión Nacional de Electricidad, o también, las normas técnicas complementarias del reglamento de construcciones del Distrito Federal.

4.1.1 Reglamentos de construcción municipales

Los municipios que resultaron más afectados por el impacto de Wilma fueron Tizimín en el estado de Yucatán, así como Benito Juárez, Cozumel y Solidaridad en Quintana Roo

4.1.1.1 Tizimín, Yucatán

El municipio de Tizimín está localizado al oriente del estado de Yucatán, en una de las zonas más bajas del estado. De acuerdo a datos del INEGI, este municipio tiene un grado de marginación alto. Tizimín se vio afectado principalmente por las inundaciones causadas por la precipitación, afectando principalmente al sector vivienda. Se observó que el reglamento de construcciones no da lineamientos básicos de seguridad estructural ni de prevención ante desastres naturales, como lo son las inundaciones; esto a pesar de ser una zona vulnerable a los efectos de los ciclones tropicales. Dicho reglamento tuvo su última modificación en el 2003, lo que muestra que incluso después de las afectaciones provocadas por el huracán Wilma, no se hicieron modificaciones ni correcciones en las normativas para evitar futuros daños a la infraestructura del municipio.

4.1.1.2 Benito Juárez, Quintana Roo

En el estado de Quintana Roo, los municipios ubicados al norte fueron los más afectados. A diferencia de Tizimín Yucatán, estos municipios cuentan con reglamentos mejor elaborados, los cuales cuentan con una clasificación de estructuras y criterios de diseño estructural, como son velocidades de viento regionales para diversos tiempos de retorno.

El municipio de Benito Juárez es el que cuenta con un reglamento más elaborado, debido a su importancia en la actividad económica del estado y en el turismo nacional. La mayoría de sus criterios se basan en el manual de obras civiles de CFE. Previo al impacto de Wilma en octubre de 2005, el reglamento vigente en Cancún en aquel entonces databa de 1990.

En primer lugar el reglamento clasificaba a las estructuras en 2 grupos.

1. El grupo A esta conformado por “construcciones cuya falla estructural podría causar la pérdida de un número elevado de vidas o pérdidas económicas o culturales [...], así como construcciones cuyo funcionamiento es esencial a raíz de una emergencia urbana.”
2. El grupo B está conformado por “construcciones comunes destinadas a viviendas, oficinas y locales comerciales, hoteles y construcciones comerciales e industriales no incluidas en el grupo A.”

De acuerdo a la anterior clasificación, se usan diferentes criterios de diseño estructural para cada uno de los grupos. En todas las estructuras se deben tomar en cuenta los efectos de cargas muertas, de cargas vivas y del viento.

Este reglamento contaba con un capítulo dedicado al diseño por viento donde se establecían las bases para la revisión de seguridad y condiciones de servicio de la estructuras ante los efectos del viento, con el fin de que dichas estructuras, así como sus componentes expuestos al viento resistieran estos efectos.

Uno de los criterios con mayor importancia es la velocidad de viento base, siendo de 200 km/h para estructuras del grupo B localizadas en áreas urbanas y suburbanas. Para el grupo A no se especifica dicha velocidad. Para elementos de fachada, recubrimientos y elementos no estructurales, se indica una velocidad base de 160 km/h.

Además de los lineamientos mencionados en los diferentes artículos, el reglamento de construcción del municipio de Benito Juárez menciona la existencia de normas técnicas complementarias de diseño por viento, pero actualmente no se encuentran disponibles por lo que no se pueden analizar los procedimientos para dicho diseño.

4.1.1.3 Cozumel, Quintana Roo.

El siguiente municipio que resultó severamente afectado fue Cozumel al ser el primer punto de impacto del huracán. En octubre de 2005 Cozumel contaba con un reglamento publicado en el año de 1998 que contenía un capítulo dedicado al diseño por viento.

El reglamento de construcciones para el municipio de Cozumel no tenía normas técnicas complementarias de diseño por viento, por lo que los lineamientos y procedimientos se mencionan brevemente y a grandes rasgos dentro del mismo reglamento. Destaca que las estructuras se clasificaban en 3 grupos. Se mencionan los grupos A y B como en el reglamento de Benito Juárez, junto con un grupo C integrado por “construcciones cuya falla implicaría un costo pequeño [...] bardas con altura no mayor a 2.50 m y bodegas provisionales”.

Junto con la clasificación mencionada anteriormente, las construcciones también son agrupadas de acuerdo a los efectos del viento sobre la estructura, esta clasificación es semejante a la usada por el manual de obras civiles de CFE. Se mencionan cuatro tipos:

- Tipo I: Estructuras poco sensibles a las ráfagas y a los efectos dinámicos del viento.
- Tipo II: Estructuras cuya esbeltez o dimensiones reducidas en su sección transversal las hace especialmente sensibles a las ráfagas de corta duración, y cuyos períodos naturales largos favorecen la ocurrencia de oscilaciones importantes.
- Tipo III: Comprenden estructuras como las definidas en el tipo II, en que además, la forma de su sección transversal propicia la generación periódica de vértices o remolinos, de ejes paralelos a la mayor dimensión de la estructura.
- Tipo IV: Comprende las estructuras que por su forma o por lo largo de sus períodos de vibración presentan problemas aerodinámicos especiales, entre ellas se hayan cubiertas colgantes, que no puedan incluirse en el tipo I.

En cada uno de ellos, el reglamento establece los criterios con los que se debe llevar a cabo el diseño estructural tomando en cuenta empujes estáticos y dinámicos por vórtices o turbulencias.

Para las velocidades de diseño, el reglamento de Cozumel consideró dos valores base: 350 km/h máximo para construcciones del grupo B y en promontorio una velocidad de 400km/h. Para las construcciones del grupo A, las velocidades se incrementan un 10% las ya mencionadas. Las construcciones incluidas en el grupo C no requerían de diseño por viento. En el caso de recubrimientos y elementos no estructurales, solo menciona que se debe revisar la estabilidad de la cubierta y sus anclajes.

4.1.1.4 Solidaridad, Quintana Roo

Otro de los municipios que se vio severamente afectado fue Solidaridad, específicamente su cabecera municipal Playa del Carmen en donde también se concentra muy buena parte de la infraestructura turística de Quintana Roo. Para este reglamento no se tiene disponible información previa al impacto del huracán Wilma. Se sabe que la zona previamente pertenecía al municipio de Cozumel hasta la fundación del municipio de Solidaridad en 1993, por lo que probablemente se usó el manual de obras civiles de la CFE para el nuevo municipio hasta el 2007, cuando se promulgó el actual reglamento vigente.

4.1.2 Manual de obras civiles de la CFE: Diseño por viento (1993)

En los municipios y localidades en donde no existe una normativa amplia acerca de las construcciones, se usa como referencia el manual de obras civiles de la Comisión Federal de Electricidad (CFE). La edición 1993 fue la vigente previa al paso del huracán Wilma en la península de Yucatán. En el capítulo de diseño por viento, se determinan las velocidades de diseño y las fuerzas que estas generan, para con ello realizar un diseño estructural apropiado. Estos lineamientos son aplicables en toda la república mexicana ya que son resultado de amplias investigaciones sobre los efectos de los vientos que ocurren comúnmente en un año en todo el país, tomando en cuenta a los generados por ciclones tropicales.

De forma similar a los reglamentos previamente mencionados, el Manual clasifica a la estructuras de acuerdo a su importancia y a su respuesta ante la acción del viento.

Según su importancia, las estructuras se clasifican en tres grupos:

- Grupo A: Estructuras que requieren un nivel de seguridad elevado las cuales si fallaran causarían un número elevado de pérdidas humanas, perjuicios económicos o culturales excepcionalmente altos; así como los que almacenan sustancias tóxicas o las cuales su funcionamiento es imprescindible y deben continuar después de la ocurrencia de vientos fuertes como los provocados por un huracán.
- Grupo B: Estructuras en las que se recomienda un nivel de seguridad moderado, las cuales en caso de fallar representan un bajo riesgo de pérdida de vidas humanas y daños materiales intermedios. En este grupo están incluidos hoteles, viviendas, comercios, restaurantes, bodegas industriales, edificios de departamentos, postes de líneas de transmisión menor etc.
- Grupo C: Estructuras con bajo nivel de seguridad, las cuales cuya falla no implica graves consecuencias ni daños a estructuras de los grupos anteriores. Se incluyen lo que son bodegas provisionales, carteles, muros aislados; así como recubrimientos y cancelerías que formen parte de las fachadas siempre y cuando su desprendimiento no provoque daños materiales o corporales graves.

Según su respuesta ante la acción del viento, se clasifican en 4 grupos

- Tipo 1: Estructuras poco sensibles a las ráfagas y a los efectos dinámicos del viento. Pertenecen a este tipo la mayoría de los edificios para habitación u oficinas, bodegas, naves industriales, teatros [...], puentes cortos y viaductos.
- Tipo 2: Estructuras que por su alta relación de aspecto (mayor a 5) o las dimensiones reducidas de su sección transversal son especialmente sensibles a las ráfagas de corta duración y cuyos periodos naturales largos favorecen la ocurrencia de oscilaciones importantes. Están incluidas también las torres de celosía atirantadas y autosoportadas para líneas de transmisión, chimeneas, antenas, parapetos y anuncios en general.
- Tipo 3: Son estructuras que reúnen las características del tipo 2 que además presentan oscilaciones importantes transversales al flujo del viento provocados por la aparición periódica de vórtices o remolinos con ejes paralelos a la dirección del viento.
- Tipo 4: Estructuras que por su forma o por lo largo de sus periodos de vibración presentan problemas aerodinámicos. Se incluyen los cables de líneas de transmisión, tuberías colgantes u antenas parabólicas.

Dependiendo del tipo de estructura, se toman diferentes procedimientos para determinar las acciones por viento, las cuales pueden ser por análisis estático, análisis dinámico o mediante pruebas experimentales en túnel de viento. La Figura 4.1 muestra el diagrama de flujo con los pasos a seguir en la obtención de las acciones del viento.

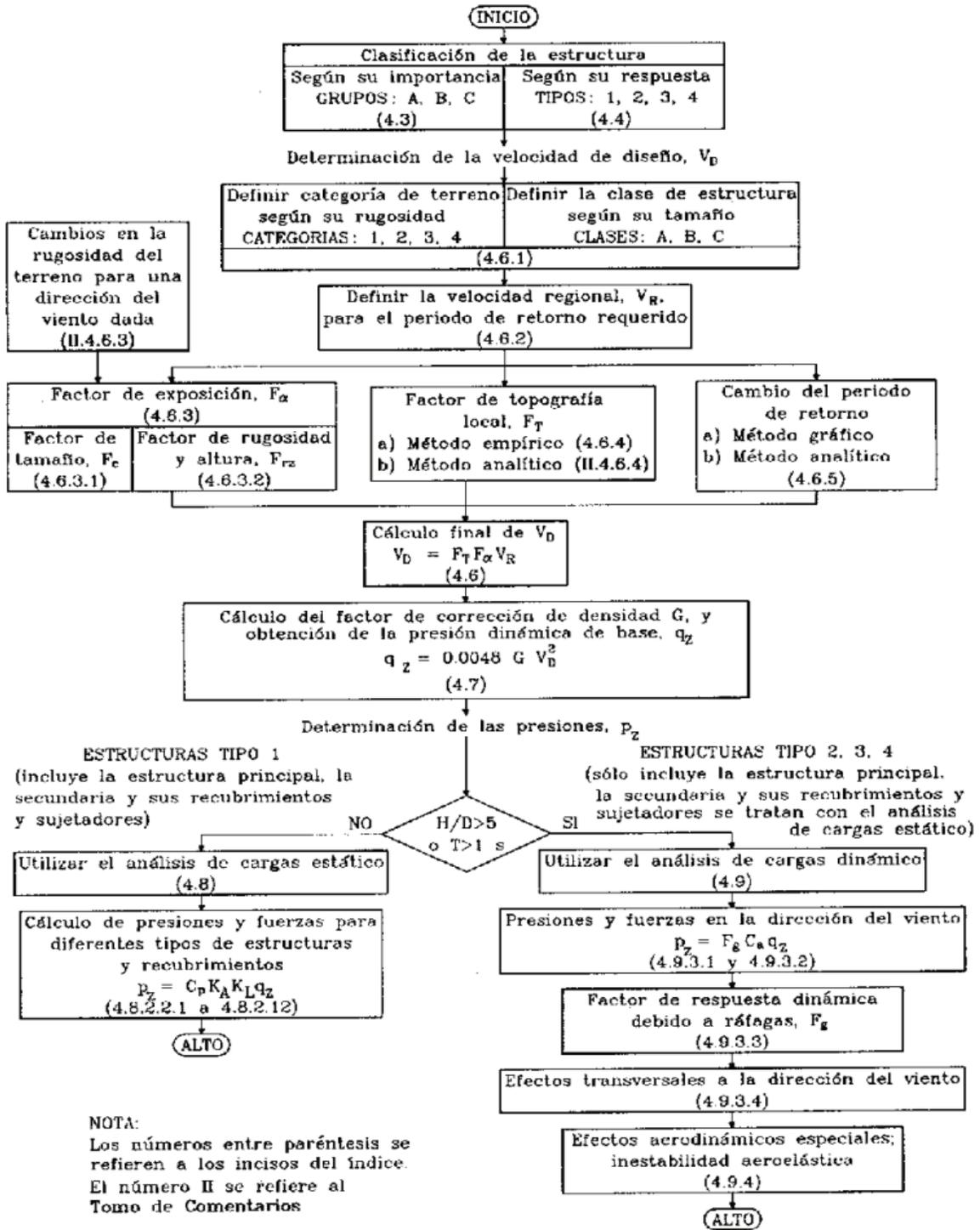


Figura 4.1. Diagrama de flujo del procedimiento para obtener las cargas por viento (Manual de diseño por viento - Comisión Federal de Electricidad 1993)

Para cualquiera de los procedimientos a seguir, se debe definir la velocidad regional, la cual es la máxima velocidad media probable de presentarse con un cierto periodo de recurrencia en una zona o región determinada del país. Estas velocidades se encuentran indicadas en diferentes mapas de isotacas con determinados tiempos de retorno (Figura 4.2). Dependiendo de la importancia de la estructura (A, B o C) se definen dichos tiempos de retorno. Para el grupo A se toma un TR= 200 años, para el grupo B un TR= 50 años y para el grupo C un TR= 10 años.

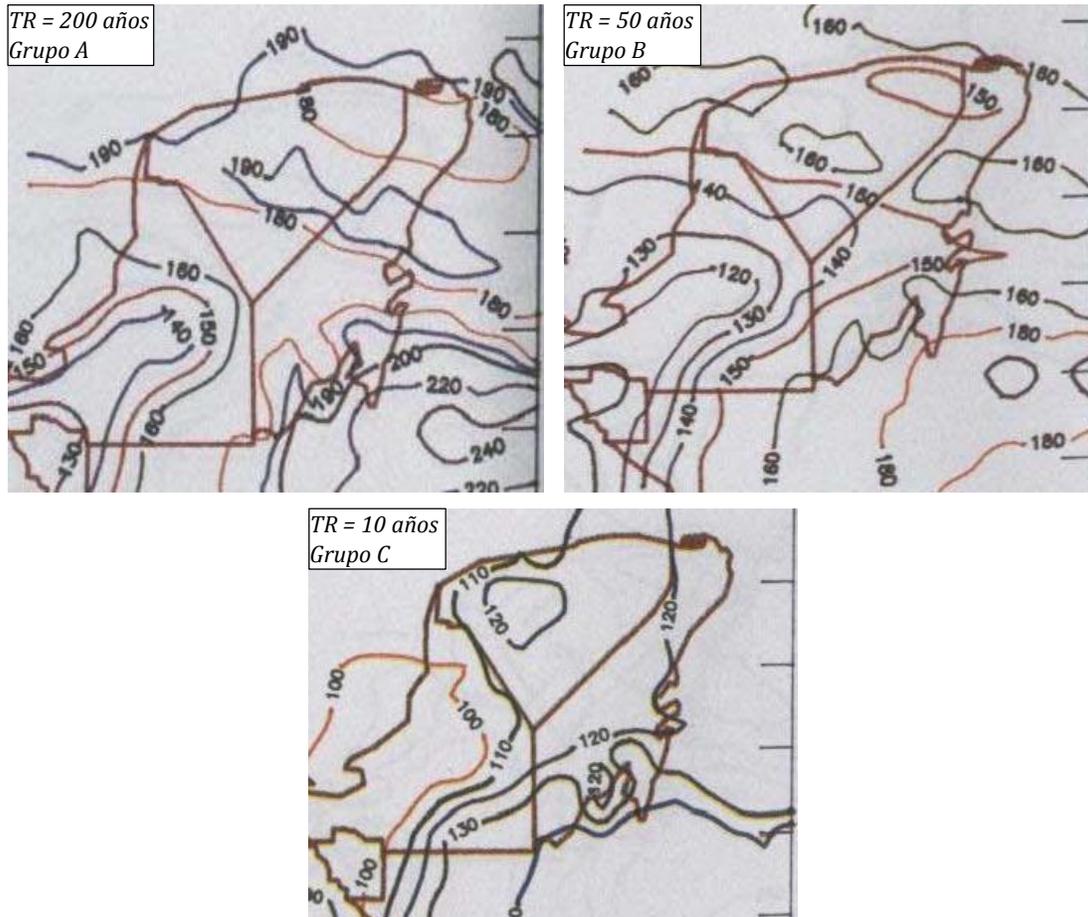


Figura 4.2. Velocidades regionales en la península de Yucatán CFE - IIE 1993 (Altura sobre terreno: 10 m, lapso de promediación: 3s)

Se observa que en la zona de la península de Yucatán, las velocidades de viento para estructuras tipo B es del orden de 160 km/h y para el tipo A de entre 180 km/h y 190 km/h.

Una vez obtenidas estas velocidades, se determina la velocidad de diseño mediante la aplicación de los diferentes procedimientos indicados por el manual para diversos casos, en lo que están involucrados factores de topografía, exposición de elementos al viento, tamaños etc. Finalmente con la velocidad de diseño se estiman las acciones del viento sobre la estructura.

Para los elementos no estructurales, el manual también da diferentes criterios para el adecuado diseño de soportes y sujetadores de dichos elementos. Para evaluar las fuerzas inducidas sobre estos, se usarán los procedimientos establecidos para estructuras del grupo C, esto siempre y

cuando no causen daños corporales o materiales importantes; en caso contrario se deberán analizar de la misma forma que la estructura principal.

4.2 Normatividad posterior al impacto del huracán Wilma.

El paso de Wilma por la península de Yucatán fue uno de los desastres más costosos en la historia del país, debido a su larga estancia en territorio mexicano y su intensidad. Los daños generados por este huracán mostraron claramente que existían deficiencias en los reglamentos de aquel entonces y las velocidades de diseño se encontraban subestimadas a comparación de las velocidades de viento observadas. Por lo tanto había la necesidad de actualizar las normativas, esto con el fin de diseñar estructuras más resistentes a fenómenos hidrometeorológicos de mayor intensidad y con ello disminuir la cantidad de daños en el futuro.

4.2.1 Actualizaciones y modificaciones en reglamentos municipales

Ante los daños que se presentaron en los diferentes municipios de Yucatán y Quintana Roo, algunos reglamentos municipales fueron modificados o actualizados con el fin de mejorar la seguridad de las construcciones y disminuir su vulnerabilidad a los vientos generados por un huracán.

Uno de ellos es el municipio de Solidaridad, el cual promulgó en junio de 2007 su reglamento de construcción. En este se incluyen lineamientos para las cargas accidentales en la estructura, estos indican que se debe considerar una velocidad básica de diseño de 270 km/h o una presión (P_o) de 335 kg/m², así como considerar los efectos del viento en equipo de izamiento y apoyos provisionales usados durante la construcción. También enfatiza sobre la estabilidad de los elementos no estructurales ante los empujes laterales del viento, de la misma forma, indica que los vidrios deben ser de por lo menos 6 mm para el caso de viviendas, si estos elementos fuesen de un área mayor o igual a 1.5 m², sus soportes y selladores deberán absorber las deformaciones y conservar su elasticidad ante el empuje del viento. Cabe destacar que este reglamento no contempla una clasificación en grupos según su importancia o su respuesta a los efectos del viento.

Aunque el reglamento menciona la existencia de Normas técnicas complementarias para diseño estructural, desafortunadamente no se encuentran disponibles por lo que se desconocen los valores de velocidad regional del viento aplicados a esa zona del estado de Quintana Roo.

Benito Juárez fue el municipio que hizo más cambios a su reglamento, así como a sus normas técnicas complementarias. Este reglamento, promulgado en 2007, menciona en diversos artículos las consideraciones de diseño que se deben tomar en cuenta para que los diversos elementos de las estructuras resistan los empujes del viento.

La actualización más importante al reglamento, después del impacto del huracán Wilma, es la adición de una propuesta de Normas Técnicas Complementarias de Diseño por Viento. Esta propuesta fue realizada por el Colegio de Ingenieros Civiles de Quintana Roo Zona Norte A.C. junto con el Colegio de Arquitectos de Cancún A.C. y la representación en Quintana Roo de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural. Se observa que esta propuesta es muy semejante a las Normas usadas por el reglamento de construcciones del Distrito Federal, los

procedimientos son básicamente los mismos, pero algunos criterios como la velocidad del viento, tiempos de retorno y zonificación eólica son diferentes. La clasificación de las estructuras según su importancia no tuvo modificaciones, a cada grupo de esta clasificación le fue asignado un tiempo de retorno y una velocidad de viento regional (Tabla 4.1).

Tabla 4.1. Velocidades regionales para los distintos grupos de estructuras (NTC de diseño de viento, Municipio de Benito Juárez, Quintana Roo)

	Velocidades regionales V_R según la importancia de la construcción y la zonificación eólica, km/hr		
	Importancia de la construcción		
	Grupo A	Grupos B1 y B2	Temporal o provisional
Periodo de retorno, años	2000	100	10
Zona I Norte del Estado	200	180	120
Zona II Ínsulas incluyendo zona hotelera y cordón litoral	200	180	120

Se encontró que las velocidades mostradas en la tabla 1, corresponden a las que están definidas en el manual de obras civiles de CFE en la versión de 1993 para los tiempos de retorno correspondientes, a excepción del grupo B. Se observa que para las estructuras del Grupo A se usa una velocidad de 200km/h para un tiempo de retorno de 2000 años, a diferencia del TR=200 años indicado en el manual para dicho grupo.

Para el grupo B, se toman los valores del grupo A determinados por el manual de CFE (180 km/h para un periodo de 200 años), aunque en la Tabla 1 el periodo se indica de 100 años. La velocidad actualizada es menor a la estipulada en la versión anterior del reglamento donde indicaba una velocidad de 200 km/h. El grupo C ya se considera en esta versión del reglamento y le corresponde una velocidad regional de 120 km/h.

Se puede decir con base a la información anterior que las velocidades regionales solamente se actualizaron a los valores contemplados por el manual de CFE de 1993, dado que fue hasta el año 2008 cuando se modificaron los manuales de CFE. En el caso del grupo B, las velocidades son inferiores a las generadas por el huracán Wilma en Cancún, que fueron del orden de los 190km/h a los 200km/h.

Es importante resaltar que en esta propuesta de normas técnicas existe un apartado en donde se toma en cuenta a los elementos no estructurales. En dicho apartado se especifica que estos deben ser diseñados con la misma velocidad regional usada para el diseño estructural en su dirección más desfavorable, además de mostrar los procedimientos necesarios para su correcto diseño e instalación.

Finalmente los municipios de Cozumel, Quintana Roo y Tizimín, Yucatán no hicieron cambios en sus reglamentos. Tizimín, no ha promulgado un nuevo reglamento desde 2004; Cozumel por

el contrario promulgó su nuevo reglamento en 2010 pero solo se hicieron pequeñas modificaciones y hubo corrección de algunas inconsistencias que se tenían en diversos artículos.

4.2.2 Actualización al Manual de obras civiles de CFE: Diseño por viento (2008)

En el año 2008 se publicó la nueva versión del Manual de Obras Civiles de CFE, en el cual se modificaron diversos criterios de diseño. En primer lugar aclara que el manual está enfocado a estructuras que no rebasen una altura de 200 m ni tengan claros mayores a 100 m. La clasificación de las estructuras sigue siendo la misma que en la versión del año de 1993 (Grupos A, B y C), así como sus tiempos de retorno (200, 50 y 10 años respectivamente).

El cambio más importante fue en las velocidades regionales para los distintos periodos de retorno. Para el grupo A, la velocidad pasó del orden de 180 km/h – 190 km/h, a los 200 km/h – 250 km/h. En el grupo B la velocidad regional se estableció entre 170 km/h y 200 km/h, a diferencia de los 160 km/h – 180 km/h de la versión de 1993. El grupo C por su parte pasó de 120 km/h a 130 km/h – 140 km/h (Figura 4.3).

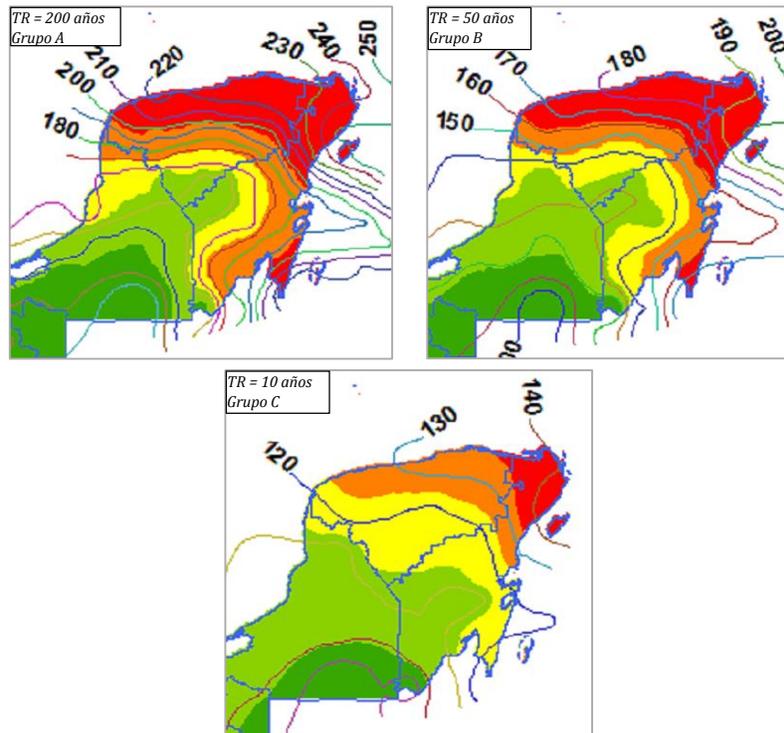


Figura 4.3. Velocidades de viento máximo en la península de Yucatán CFE - IIE 2008
(Altura sobre terreno: 10 m, lapso de promediación: 3s)

Se observa que las nuevas velocidades indicadas para el grupo B, son semejantes a las que se registraron durante en paso del huracán Wilma en octubre de 2005. Recordemos que este grupo de estructuras fue el que resultó más dañado por los vientos huracanados. Esto quiere decir que el manual se ha modificado de tal forma que las estructuras estén diseñadas para resistir efectos semejantes o mayores a los que generó Wilma al impactar la península de Yucatán.

De la misma forma que en la edición de 1993, el manual de diseño por viento da los lineamientos que se deben seguir para la instalación y diseño de elementos no estructurales. En esta versión los elementos no estructurales se analizarán como estructuras del grupo B siempre y cuando no causen daños corporales o materiales importantes. En caso contrario se analizarán como estructuras del grupo A.

5. CONCLUSIONES

El huracán Wilma de 2005 es catalogado como el más intenso que se ha registrado hasta la fecha en la zona del Atlántico norte, superando al huracán Gilberto de 1988 en cuanto a intensificación y en presión mínima en el ojo (882 mb). El sistema afectó la costa del caribe mexicano así como buena parte de la península de Yucatán del 21 al 23 de octubre de 2005. Sus efectos provocaron diversos daños a la infraestructura, principalmente de los estados de Quintana Roo y Yucatán, siendo los sectores de turismo y de servicios los que resultaron más afectados.

La trayectoria de Wilma en la península de Yucatán resalta por ser errática y estacionaria en algunos puntos, además de que el meteoro tenía un desplazamiento lento. Se estima, de acuerdo a información del Servicio Meteorológico Nacional, que la duración de los efectos de los vientos de huracán superiores a los 120 km/h fue de aproximadamente 51 horas. Esta situación, aunada a la intensidad de Wilma, fueron factores determinantes en la cantidad y gravedad de los daños registrados en los estados de Quintana Roo y Yucatán.

Los daños se concentraron principalmente en dos zonas: el norte del estado de Quintana Roo y el oriente del estado de Yucatán. Las ciudades con más afectaciones fueron Cancún, Playa del Carmen, Cozumel y Puerto Morelos en Quintana Roo; mientras que en Yucatán fueron Tizimín, Río Lagartos y El Cuyo.

De acuerdo a los registros de daños y a la evaluación de estos en el Capítulo 3, se observa que los agentes de daño fueron diferentes para cada una de las zonas donde se concentraron dichos registros.

En la zona del norte de Quintana Roo, las afectaciones se debieron principalmente a la acción del viento, lo cual coincide con el hecho de que las velocidades de viento fueron las más intensas para dicha zona, la cual fue la más cercana a la trayectoria del ciclón. Recordemos que en la zona del centro de un ciclón tropical es donde se tienen los valores más elevados de velocidad del viento.

Al igual que el viento, la marea de tormenta fue otro de los factores predominantes en la generación de los daños en el norte de Quintana Roo. Una buena parte de la estructuras son hoteles que están ubicados a lo largo de la línea costera entre Cancún y Playa del Carmen, por lo que reciben directamente el impacto del oleaje elevado. En algunos inmuebles en donde no se contaba con muros de contención, se tuvo socavación de cimentaciones provocando graves daños estructurales o colapsos parciales. Junto con los hoteles, la infraestructura portuaria se vio afectada, principalmente el malecón de Cozumel y las terminales de ferries de Cancún y Playa del Carmen, siendo la de Cancún pérdida total.

Pero el impacto más considerable de la marea de tormenta fue la erosión de playas a lo largo de 11 km de la zona hotelera de Cancún. Si bien no representa peligro para los hoteles y sus usuarios, las consecuencias económicas y ecológicas son graves ya que es uno de los atractivos turísticos más importantes de Cancún y del estado de Quintana Roo en general.

A diferencia de Quintana Roo, en el estado de Yucatán únicamente se tuvieron daños por inundaciones generadas por la precipitación extraordinaria registrada en dicha zona. Este tipo de daño también se debe a que la parte oriente de Yucatán es una de las más bajas del estado por lo que es susceptible a inundaciones. Las afectaciones se presentaron principalmente en vivienda e infraestructura carretera.

Los daños ocasionados por el huracán Wilma fueron generalizados en todas las construcciones, siendo las edificaciones y la estructuras industriales las más afectadas, principalmente por acción del viento. En general no hubo daños de consideración en los sistemas estructurales de las construcciones a excepción de algunos casos de colapso parcial en gasolineras y un hotel cerca de Puerto Morelos.

Las afectaciones más comunes se dieron por desprendimiento de elementos no estructurales en fachadas y techumbres, así como rotura de ventanerías de medianas a grandes. Estos elementos al estar constituidos por materiales ligeros y estar ubicados en áreas del edificio con alta exposición al viento, mostraron un comportamiento deficiente debido a la falla de sus sistemas de fijación o la falla de las mismas piezas de recubrimiento. Los materiales ligeros más usados fueron en su mayoría paneles de concreto y yeso, acero laminado, lonerías y cristales sin especificaciones anticiclónicas.

Al momento de que los sistemas de recubrimiento fallaron, la lluvia y el viento ingresaron a las construcciones y causaron serias pérdidas en contenidos, recubrimientos e instalaciones, lo cual generó una cantidad importante de escombros que suponen un peligro para las personas y a otros edificios al convertirse en proyectiles por los fuertes vientos.

Además de los aspectos mencionados anteriormente, el diseño arquitectónico tuvo una influencia considerable en la cantidad de daños. Se observó que diversas edificaciones cuentan con configuraciones irregulares de planta y de elevación, las cuales favorecen la aparición de vórtices de gran intensidad. Esta situación provoca que la estructura no tenga un adecuado comportamiento ante la acción del viento, que al final deriva en una mayor cantidad de daños a recubrimientos e instalaciones.

La mayoría de la infraestructura turística de la región estuvo inoperable debido a los daños en instalaciones y contenidos. Dicha situación fue la que generó cerca del 92% de las pérdidas económicas totales causadas por el huracán Wilma, superando a otros desastres previos en la península de Yucatán.

En el sector vivienda se encontró que el estado precario de las construcciones, junto con materiales de bajas especificaciones y técnicas deficientes de autoconstrucción, fueron factores determinantes en los daños registrados a dicho sector, que consistieron en colapsos parciales o totales de las viviendas, caída de bardas y techumbres e inundaciones en planta baja.

Posterior al paso del huracán Wilma, se actualizaron diversos reglamentos de construcción, en especial los aplicados en Benito Juárez, Cozumel y Solidaridad; los cuales fueron los municipios que resultaron más afectados en el estado de Quintana Roo.

En el caso de Benito Juárez, cuya cabecera municipal es Cancún, se hizo una propuesta de normas técnicas complementarias de diseño por viento en donde se toman en cuenta a los elementos no estructurales, además se modificaron las zonas eólicas y los valores de velocidad

de viento regional. En Cozumel y Solidaridad únicamente se actualizaron algunos valores y se corrigieron algunas inconsistencias.

Actualmente, hace falta una revisión más minuciosa a los reglamentos de construcción de los municipios que son más vulnerables a los efectos de un huracán en la península de Yucatán. A la vez, es necesaria la supervisión adecuada durante el diseño y la construcción de los diversos proyectos de edificación, esto con el objetivo de asegurar la correcta aplicación de los lineamientos establecidos por los diferentes reglamentos.

Los municipios del oriente de Yucatán no cuentan con una normatividad adecuada para el diseño de obra pública con el fin de evitar inundaciones y daños por acción del viento. El reglamento de Benito Juárez y sus normas técnicas complementarias deben ser revisadas nuevamente, debido a que la velocidad de viento regional definida para estructuras del tipo B esta subestimada con respecto a las velocidades que se presentaron en octubre de 2005 por Wilma. Es también importante que estas normas estén propuestas de acuerdo a las características propias de los vientos generados por un huracán en esa zona en especial.

El Manual de Obras Civiles de CFE por su parte, realizó diversas modificaciones a sus criterios de diseño. Las velocidades regionales se actualizaron para todos los grupos de estructuras, los valores asignados para el grupo B se asemejan a los que se registraron durante el paso de Wilma, por lo que en el futuro, las estructuras pertenecientes a este grupo podrán resistir los vientos de un huracán con la intensidad de Wilma. En el caso de los elementos no estructurales, el manual indica que deben ser analizados como estructuras del grupo A o B dependiendo de las afectaciones que puedan ocasionar.

Otro aspecto importante a tomar en cuenta, es que se debe evitar nuevamente el uso de materiales ligeros en recubrimientos y cubiertas, ya que muestran un comportamiento deficiente ante los efectos del viento. Así también se debe evitar usar configuraciones estructurales irregulares y diseños tipo en la construcción de nuevas edificaciones. Es necesario de igual manera utilizar materiales con especificaciones anticiclónicas para ventanas, techos, lonerías y fachadas.

Finalmente, se debe impulsar una mejora en las estaciones meteorológicas y mareográficas del país con herramientas de última generación para el monitoreo de los huracanes que impacten en territorio nacional. Desafortunadamente, en México no se cuenta con una base de datos completa de estos fenómenos hidrometeorológicos, gran parte de la información se obtiene de dependencias extranjeras como el Centro Nacional de Huracanes de los Estados Unidos y de la Agencia Meteorológica de Japón.

Actualmente no se tiene información que nos permita conocer el comportamiento real de los vientos huracanados en zonas costeras. Por ello es de suma importancia conocer a detalle las características de estos eventos meteorológicos, ya que con esta información, junto con una apropiada investigación, podemos conocer mejor el comportamiento de los ciclones y con ello realizar acciones para la prevención de desastres, así como el diseño y construcción de infraestructura más segura y confiable; todo esto con el fin de evitar daños en el futuro y garantizar la seguridad y el bienestar de la sociedad y su patrimonio.

BIBLIOGRAFÍA

- [1]. *Alertas y reportes hidrometeorológicos Huracán Categoría 5: Wilma del mar Caribe - 19 de Octubre* (2005). Recuperado el 6 de Mayo de 2015, de Secretaría de Gobernación, Centro Nacional de Prevención de Desastres:
http://www.cenapred.gob.mx/reportesHidros/Procesos?tipoProceso=detallesReporteHidros&no_fenomeno=10.
- [2]. *ASUR Actualiza sobre el impacto de huracán Wilma* (2005). Obtenido el 14 de mayo de 2015 del sitio web de Aeropuertos del Sureste:
http://www.asur.com.mx/assets/files/es/inversionistas/comunicados_de_prensa/ASUR-Aeropuerto-Comunicados-a-Bolsa-Huracan-Wilma-05-10-26.pdf.
- [3]. Avelar, C. E. (2006). *Daños ocasionados por el huracán Wilma en Cancún*. Obtenido el 4 de Junio de 2015 del sitio web de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural A. C.:
http://www.smie.org.mx/SMIE_Articulos/co/co_14/te_08/ar_11.pdf.
- [4]. Beven, J. L. et al. (2007). Annual summary: Atlantic Hurricane Season of 2005. *Annual Summary*, vol. 136, 1109-1173.
- [5]. Blanchard, B. W. & Hsu, S. A. (2006). On the radial variation of the tangential wind speed outside the radius of maximum wind during Hurricane Wilma (2005). *NWA Electronic Journal of Operational Meteorology (January, 2006)*. Obtenido el 29 de Abril de 2015 de:
<http://www.nwas.org/ej/pdf/2006-EJ4.pdf>.
- [6]. Brennan, M. J., Knabb, R. D., Mainelli, M., Kimberlain T. B. (2009). Annual summary: Atlantic Hurricane Season of 2007. *Monthly Weather Review*, vol. 137, 4061-4088.
- [7]. Carranza, A. (2009). *Causas y consecuencias de la erosión de playas*, UNAM. Obtenido de Publica tu Obra UNAM:
<http://www.tuobra.unam.mx/publicadas/090608101838.pdf>
- [8]. Centro Nacional de Prevención de Desastres CENAPRED & Comisión Económica para América Latina y el Caribe CEPAL (2006). *Características e impacto socioeconómico de los huracanes "Stan" y Wilma en la República Mexicana en el 2005*, CENAPRED, México.
- [9]. Centro Nacional de Prevención de Desastres CENAPRED (2006). *Características e impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la República Mexicana en el año 2005*, CENAPRED, México.

- [10]. Chen, H., Zhang, D. L., Caton J. (2011). On the rapid intensification of hurricane Wilma (2005). Part I: Model prediction al structural changes. *Weather and Forecasting*, vol. 26, 885-901
- [11]. Datos climáticos diarios de precipitación del CICLOM del SMN con gráficas de CICESE (<http://clicom-mex.cicese.mx>).
- [12]. Dunn, G. E., Davis, W. R., Moore, P. L. (1955). Hurricanes of 1955. *Monthly Weather Review*, December 1955, 315-326.
- [13]. Estiman que Wilma dejó daños en carreteras por 42 mdp (2005, 28 de octubre). *La Crónica de Hoy*. Recuperado de <http://www.cronica.com.mx/notas/2005/209514.html>.
- [14]. Guido, P., Ramírez, A., Godínez, L., Cruz S., Juárez, A. (2009). Study of coastal erosion in Cancun and Riviera Maya, Mexico. *Avances en Recursos Hidráulicos*, (20), 41-56.
- [15]. Hernández, A. & Cirilo, M. G. (sin fecha). *Resumen del Huracán Wilma del Océano Atlántico*. Obtenido el 14 de Mayo de 2015 de Comisión Nacional del Agua, subdirección General Técnica, Unidad del Servicio Meteorológico Nacional:

<http://smn.cna.gob.mx/ciclones/tempo2005/atlantico/wilma.pdf>.
- [16]. Hernández, A. (sin fecha). *Reseña del Huracán "Dean" del Océano Atlántico*. Obtenido el 5 de Mayo de 2015 de Comisión Nacional del Agua, Servicio Meteorológico Nacional:

<http://smn.cna.gob.mx/ciclones/tempo2007/atlantico/dean.pdf>.
- [17]. Kaufer, E. & Villanueva, C. (2011). Retos de la gestión de una cuenca construida: la Península de Yucatán en México. *Aqua-LAC: revista del Programa Hidrológico Internacional para América Latina y el Caribe Vol. 3* (2), 81-91.
- [18]. Landsea, C. A15) *How do tropical cyclones form?* (sin fecha). Recuperado el 20 de abril de 2015, de National Oceanic and Atmospheric Administration, Atlantic Oceanographic & Meteorological Laboratory:

<http://www.aoml.noaa.gov/hrd/tcfaq/A15.html>.
- [19]. Landsea, C. H1) *What is the Dvorak technique and how is it used?* (sin fecha). Recuperado el 16 de Mayo de 2015, de National Oceanic and Atmospheric Administration, Atlantic Oceanographic & Meteorological Laboratory:

<http://www.aoml.noaa.gov/hrd/tcfaq/H1.html>
- [20]. Lawrence M. B. & Gross J. M. (1989). Annual summaries: Atlantic Hurricane Season of 1988. *Monthly Weather Review*, vol. 117, 2248-2259.

- [21]. *Manual de la Franquicia de Pemex - Identidad e imagen con Cualli* (2008). Recuperado el 17 de junio de 2015 de Pemex Refinación, Franquicia PEMEX:
http://www.ref.pemex.com/files/content/02franquicia/sagli002/sagli002_13i.html.
- [22]. MDOC, CFE (1993). *Manual de Diseño por Viento, Comisión Federal de Electricidad*, Instituto de Investigaciones Eléctricas, México.
- [23]. MDOC, CFE (2008). *Manual de Diseño de Obras Civiles: Diseño por Viento, Comisión Federal de Electricidad*, Instituto de Investigaciones Eléctricas, México.
- [24]. México (1990). *Reglamento de construcción del municipio de Benito Juárez del estado de Quintana Roo*, Periódico Oficial del Gobierno del Estado de Quintana Roo, 1° de agosto.
- [25]. México (1998). *Reglamento de construcciones para el municipio de Cozumel, Quintana Roo*, Periódico Oficial del Gobierno del Estado de Quintana Roo, 15 de octubre.
- [26]. México (2003). *Reglamento de construcciones del municipio de Tizimín, Yucatán*, Diario Oficial del Gobierno del Estado de Yucatán, 17 de enero.
- [27]. México (2007). *Reglamento de construcción del municipio de Benito Juárez del estado de Quintana Roo*, Periódico Oficial del Gobierno del Estado de Quintana Roo, 25 de abril.
- [28]. México (2007). *Reglamento de construcciones del municipio de Solidaridad, Quintana Roo*, Periódico Oficial del Gobierno del Estado de Quintana Roo, 8 de junio.
- [29]. México (2010). *Reglamento de construcciones para el municipio de Cozumel del estado de Quintana Roo*, Periódico Oficial del Gobierno del Estado de Quintana Roo, 16 de marzo.
- [30]. National Oceanic and Atmospheric Administration, National Data Buoy Center, NDBC - Station 42056. Consultado el 20 de mayo de 2015:
http://www.ndbc.noaa.gov/station_page.php?station=42056&unit=E&tz=STN
- [31]. NTC (2006). *Propuesta de Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Viento*, Colegio de Arquitectos de Cancún A. C., Colegio de Ingenieros Civiles de Q. Roo Z. Norte A. C., Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural.
- [32]. NTC-M (2004). *Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería*, Gaceta Oficial del Distrito Federal, México D.F., octubre.
- [33]. NTC-V (2004). *Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Viento*, Gaceta Oficial del Distrito Federal, México D.F., octubre.
- [34]. Pasch, R. J., Blake, E. S., Cob, H. D., Roberts, D. P. (2006). *Tropical Cyclone Report Hurricane Wilma*. Obtenido el 5 de Mayo de 2015 de National Weather Service, National Hurricane Center:

- http://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/AL252005_Wilma.pdf.
- [35]. Rosengaus, M. & Hernández, A. (sin fecha). *Resumen de la temporada de ciclones tropicales 2005 (2a Parte)*. Obtenido el 7 de Mayo de 2015 de Comisión Nacional del Agua, Subdirección General Técnica, Unidad del Servicio Meteorológico Nacional:
<http://smn.cna.gob.mx/ciclones/tempo2005/rt2005b.pdf>.
- [36]. Schott, T. et al. (2011). *The Saffir-Simpson Hurricane Wind Scale*. Obtenido el 22 de Abril de 2015, de National Weather Service, National Hurricane Center:
<http://www.nhc.noaa.gov/pdf/sshws.pdf>.
- [37]. *Storm Surge Overview* (2014). Recuperado el 12 de mayo de 2015, de National Weather Service, National Hurricane Center:
<http://www.nhc.noaa.gov/surge/>.
- [38]. Sugg A. L. & Pelissier J. M. (1968). The hurricane Season of 1967. *Monthly Weather Review*, vol. 96 (4), 242-259.
- [39]. *Teoría sobre la formación de ciclones tropicales* (sin fecha). Recuperado el 21 de abril de 2015, de la Secretaria de Marina SEMAR, Dirección General Adjunta de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología:
http://meteorologia.semar.gob.mx/teoria_sobre_la_formacion_de_ciclones_tropicales.pdf.
- [40]. *Tropical Cyclone Formation Regions* (2011). Recuperado el 20 de abril de 2015, de National Weather Service , JetStream Online School for Weather:
http://www.srh.noaa.gov/jetstream/tropics/tc_basins.htm.
- [41]. United States of America, National Weather Service (2013). *Tropical Cyclone Definitions*. Obtenido el 7 de Mayo de 2015 de:
<http://www.nws.noaa.gov/directives/>.
- [42]. Wilma: el recuento de los daños (2005, 24 de octubre). *El Universal*. Recuperado de <http://archivo.eluniversal.com.mx/notas/312055.html>.
- [43]. Wilma: su paso en la península - (viernes) (2005, 21 de octubre). *El Universal*. Recuperado de <http://archivo.eluniversal.com.mx/notas/311574.html>.
- [44]. Wilma: su paso en la península (domingo) (2005, 23 de octubre). *El Universal*. Recuperado de <http://archivo.eluniversal.com.mx/notas/311884.html>.
- [45]. Wilma: su paso en la península (sábado) (2005, 22 de octubre). *El Universal*. Recuperado de <http://archivo.eluniversal.com.mx/notas/311744.html>.

- [46]. Zenteno, M., Avelar, C. E., Reinoso, E. (2006). *Estadísticas de los daños por viento causados a las estructuras por el huracán Wilma en el caribe mexicano*. Obtenido el 4 de Junio de 2015 del sitio web de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural A. C.:

http://www.smie.org.mx/SMIE_Articulos/co/co_14/te_08/ar_16.pdf.

ANEXOS

Tabla 1. Datos de precipitación en estaciones meteorológicas durante el paso de Wilma.

Estación	Estado	Municipio	Precipitación Acumulada (24h)		Acumulado [mm]
			[mm]		
			21/10/2005	22/10/2005	
Zoh Laguna	Campeche	Calakmul	13.4	0	13.4
Xbonil	Campeche	Calakmul	5	2	7
Conhuas	Campeche	Calakmul	9	0	9
Alvarado	Campeche	Calakmul	8	4.3	12.3
Cristóbal Colon	Campeche	Calakmul	13	2	15
Isla Arenas	Campeche	Calkiní	18.3	90.2	108.5
Becal	Campeche	Calkiní	80	60	140
Campeche (Dge)	Campeche	Campeche	55.1	38	93.1
Tixmucuy	Campeche	Campeche	50.1	23.2	73.3
Pablo T. Burgos	Campeche	Candelaria	12	19	31
Sabancuy	Campeche	Carmen	66	3.5	69.5
Chicbul	Campeche	Carmen	14.2	4.5	18.7
Pustunich	Campeche	Chamotón	0	0	0
Chamotón (DGE)	Campeche	Chamotón	32.5	1	33.5
Pixoyal (SMN)	Campeche	Chamotón	0	5	5
Hecelchakan (SMN)	Campeche	Hecelchakán	36	122	158
Bolonchen	Campeche	Hopelchén	48	31	79
Iturbide	Campeche	Hopelchén	46.8	50.9	97.7
Xcupil (Dge)	Campeche	Hopelchén	50	110	160
San Juan Bautista	Campeche	Hopelchén	112.7	65.3	178
Valle Hermoso	Quintana Roo	Bacalar	54.7	2.2	56.9
Reforma	Quintana Roo	Bacalar	48.3	0	48.3
Limonos	Quintana Roo	Bacalar	49	0	49
Otilio Montaña	Quintana Roo	Bacalar	68	2	70
Leona Vicario	Quintana Roo	Benito Juárez	43	10	53
Cancún	Quintana Roo	Benito Juárez	770	-	770
Central Vallarta	Quintana Roo	Benito Juárez	140	10	150
Felipe Carrillo Puerto (Dge)	Quintana Roo	Felipe Carrillo Puerto	30.1	24.9	55
Señor	Quintana Roo	Felipe Carrillo Puerto	45.5	4	49.5
Tihosuco	Quintana Roo	Felipe Carrillo Puerto	32.5	37	69.5
Andrés Quintana Roo	Quintana Roo	Felipe Carrillo Puerto	20	25	45
Laguna Kana	Quintana Roo	Felipe Carrillo Puerto	20	20	40
X-Pichil	Quintana Roo	Felipe Carrillo Puerto	36	6	42

*Evaluación de daños en la infraestructura de Quintana Roo y Yucatán
causados por el Huracán Wilma*

José María Morelos	Quintana Roo	José María Morelos	40	8	48
La Presumida	Quintana Roo	José María Morelos	3.5	8	11.5
Kantunilkin	Quintana Roo	Lázaro Cárdenas	310	20	330
Solferino	Quintana Roo	Lázaro Cárdenas	300	75	375
Nicolás Bravo Km. 71	Quintana Roo	Othón P. Blanco	0.7	0.9	1.6
Chetumal (Dge)	Quintana Roo	Othón P. Blanco	26.2	26.2	52.4
Sergio Butrón Casas	Quintana Roo	Othón P. Blanco	0	16	16
I.N.I.Arroyo Caechet	Quintana Roo	Othón P. Blanco	28	0	28
Mahahual	Quintana Roo	Othón P. Blanco	30.3	0	30.3
Playa Del Carmen	Quintana Roo	Solidaridad	240	10	250
Coba	Quintana Roo	Tulum	165.5	20	185.5
Tulum	Quintana Roo	Tulum	185.5	35	220.5
Abala	Yucatán	Abalá	45	17	62
Acanceh	Yucatán	Acanceh	56	19	75
Buctzotz	Yucatán	Buctzotz	60	40	100
Calotmul	Yucatán	Calotmul	120.8	160.8	281.6
Celestun (Dge)	Yucatán	Celestún	74.7	0	74.7
Chemax	Yucatán	Chemax	28.2	24.3	52.5
Catzin	Yucatán	Chemax	170	90	260
Dzan	Yucatán	Dzán	76.3	9.7	86
Dzitas	Yucatán	Dzitas	21.3	89.4	110.
Izamal Escuela	Yucatán	Izamal	31	26	57
Kinchil	Yucatán	Kinchil	37	14.5	51.5
Mérida (Obs)	Yucatán	Mérida	43.5	26.8	70.3
Motul	Yucatán	Motul	14	23	37
C.I.A.P.Y.	Yucatán	Muna	45	20	65
Tabi	Yucatán	Oxkutzcab	49.5	12.5	62
Loche	Yucatán	Panabá	183.3	169.6	352.9
Chicxulub Puerto	Yucatán	Progreso	11.5	13	24.5
Sotuta (Dge)	Yucatán	Sotuta	18.3	16.5	34.8
Telchaquillo	Yucatán	Tecoh	75	6	81
Becanthen	Yucatán	Tekax	82.6	3	85.6
Telchac Puerto	Yucatán	Telchac Puerto	0	25	25
Piste	Yucatán	Tinum	80.4	30	110.4
Tizimin	Yucatán	Tizimín	0	296	296
Chan Cenote	Yucatán	Tizimín	73.7	156	229.7
Dzonot Ake	Yucatán	Tizimín	0	296	296
Valladolid (Obs)	Yucatán	Valladolid	24.2	5.5	29.7

Tabla 2. Registros de altura de ola en la boya número 42056 de National Data Buoy Center del 20 al 23 de octubre de 2005.

Fecha - Hora	Altura de ola m	Fecha - Hora	Altura de ola m	Fecha - Hora	Altura de ola m
10/20 - 0:00	6.08	10/21 - 14:00	9.43	10/23 - 4:00	4.31
10/20 - 1:00	6.34	10/21 - 15:00	8.09	10/23 - 5:00	4.14
10/20 - 2:00	6.46	10/21 - 16:00	8.09	10/23 - 6:00	4.34
10/20 - 3:00	7.15	10/21 - 17:00	8.24	10/23 - 7:00	4.54
10/20 - 4:00	6.48	10/21 - 18:00	8.39	10/23 - 8:00	4.78
10/20 - 5:00	6.85	10/21 - 19:00	8.29	10/23 - 9:00	4.64
10/20 - 6:00	7.47	10/21 - 20:00	7.66	10/23 - 10:00	4.54
10/20 - 7:00	7.22	10/21 - 21:00	7.94	10/23 - 11:00	4.83
10/20 - 8:00	7.18	10/21 - 22:00	8.31	10/23 - 12:00	4.73
10/20 - 9:00	7.89	10/21 - 23:00	8.03	10/23 - 13:00	4.64
10/20 - 10:00	7.39	10/22 - 0:00	8.12	10/23 - 14:00	4.33
10/20 - 11:00	7.83	10/22 - 1:00	7.77	10/23 - 15:00	4.15
10/20 - 12:00	-	10/22 - 2:00	7.85		
10/20 - 13:00	7.45	10/22 - 3:00	7.49		
10/20 - 14:00	7.43	10/22 - 4:00	7.36		
10/20 - 15:00	7.87	10/22 - 5:00	7.09		
10/20 - 16:00	8.22	10/22 - 6:00	6.55		
10/20 - 17:00	-	10/22 - 7:00	5.98		
10/20 - 18:00	8.31	10/22 - 8:00	5.86		
10/20 - 19:00	8.39	10/22 - 9:00	5.15		
10/20 - 20:00	8.39	10/22 - 10:00	-		
10/20 - 21:00	9.16	10/22 - 11:00	5.29		
10/20 - 22:00	9.87	10/22 - 12:00	5.48		
10/20 - 23:00	9.44	10/22 - 13:00	5.07		
10/21 - 0:00	10.33	10/22 - 14:00	5.56		
10/21 - 1:00	9.95	10/22 - 15:00	5.28		
10/21 - 2:00	9.94	10/22 - 16:00	5.04		
10/21 - 3:00	9.94	10/22 - 17:00	5.23		
10/21 - 4:00	10.81	10/22 - 18:00	4.65		
10/21 - 5:00	10.69	10/22 - 19:00	5.17		
10/21 - 6:00	10.03	10/22 - 20:00	4.87		
10/21 - 7:00	10.45	10/22 - 21:00	4.79		
10/21 - 8:00	11	10/22 - 22:00	4.76		
10/21 - 9:00	10.28	10/22 - 23:00	4.47		
10/21 - 10:00	-	10/23 - 0:00	4.51		
10/21 - 11:00	10.18	10/23 - 1:00	4.47		
10/21 - 12:00	10.12	10/23 - 2:00	4.65		
10/21 - 13:00	8.84	10/23 - 3:00	4.5		