

Ojo del huracán Matthew
1 octubre 2016. Imagen
microondas UW-CIMMS

Propuesta Metodológica para elaborar mapa de amenaza de ciclones tropicales para Colombia.

Colombia menos vulnerable, comunidades más resilientes

Propuesta metodológica para elaborar mapa de amenaza de ciclones tropicales para Colombia.

Colombia menos vulnerable, comunidades más resilientes

UNIDAD NACIONAL PARA LA GESTIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES

Juan Manuel Santos Calderón

Presidente de la República

Carlos Iván Márquez Pérez

Director General UNGRD

Graciela Ustáriz Manjarrés

Subdirectora General UNGRD

Lina Marlene Dorado González

Subdirectora para el Conocimiento del Riesgo UNGRD

Autora UNGRD:

Gloria León Aristizábal - Subdirección Conocimiento del Riesgo - SCR

Colaboración técnica:

Christian Euscátegui – Oficina del Servicio de Pronóstico y Alertas – IDEAM

Vivian Farley Garzón - Oficina del Servicio de Pronóstico y Alertas – IDEAM

Juan Leonardo Moreno Rincón - Grupo de Investigación Científica y Señalización Marítima – DIMAR

Julio Monroy Silvera – Área de Oceanografía Operacional - CIOH – DIMAR

Corrección y Estilo UNGRD:

Oficina Asesora de Comunicaciones - UNGRD

DERECHOS RESERVADOS

Reproducción parcial o total del presente documento permitida con mención de la fuente.

Bogotá D.C., Abril de 2018

www.gestiondelriesgo.gov.co

Agradecimientos a IDEAM y DIMAR que participaron durante el proceso de la formulación de esta propuesta metodológica.

TABLA DE CONTENIDOS

LISTA DE TABLAS	II
LISTA DE FIGURAS	III
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. GENERALIDADES DE LOS CICLONES TROPICALES	3
CAPÍTULO 2. MÉTODOS USADOS PARA LA EVALUACIÓN DE AMENAZA POR CICLONES TROPICALES.....	17
MÉTODOS ESTADÍSTICOS.....	18
MÉTODOS DINÁMICOS	21
MÉTODOS DINÁMICOS - ESTADÍSTICOS	22
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA PROPUESTA PARA LA ELABORACIÓN DE MAPAS DE AMENAZA POR CICLONES TROPICALES PARA COLOMBIA.....	25
DATOS DE CICLONES TROPICALES.....	26
MODELO DE VIENTO.....	28
PROBABILIDAD DE PRESENTACIÓN DE CICLONES TROPICALES.....	31
PROBABILIDAD Y PERIODO DE RETORNO DE LA INTENSIDAD DE CICLONES TROPICALES.....	32
MAPAS DE AMENAZA POR CICLONES TROPICALES	34
BIBLIOGRAFÍA	35

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Escala de Vientos de Saffir-Simpson	4
Tabla 2 Tipo de daños asociados a los ciclones tropicales	4
Tabla 3 Características de ciclones tropicales que han pasado sobre zonas insulares, costeras o al interior de Colombia. Fuente: Elaboración Propia, según base de datos HURDAT2 -IBTrACS	6
Tabla 4 Frecuencia de ciclones tropicales para los periodos 1851-2016 y 1950-2016 para diferentes localidades colombianas sobre radios de 50, 75, 100, 150 y 200 km. Fuente: Elaboración Propia, según base de datos HURDAT2 –IBTrACS.....	8
Tabla 5 Radio de vientos máximos sostenidos de los ciclones tropicales para la cuenca del Caribe, periodo 2004-2016. Fuente: Elaboración Propia, según base de datos HURDAT2 -IBTrACS	11

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Trayectorias de ciclones tropicales periodo 1851- 2016. Fuente: Elaboración Propia, según base de datos HURDAT2-IBTrACS	6
Figura 2: Estructura del ciclón tropical. La fotografía de satélite superior corresponde al huracán Fran de 1996. El corte de la derecha muestra la velocidad de la componente vertical a partir de una simulación numérica con valores máximos (amarillo) de 8 m/s. El corte de la izquierda muestra la magnitud del viento medido en el huracán Inez de 1966 con valores máximos de 180 km/h (Adaptado, Emanuel 2003)	9
Figura 3: Perfil de la velocidad del viento en los ciclones tropicales (Fuente: COMET)	10
Figura 4: Intensidad del huracán Matthew en función del radio de vientos máximos en superficie (RMW-SFC) y del radio de vientos máximos a 700 hPa (RMW-FLTLVL). Entre las 0000 UTC del 29 de septiembre a las 0000 UTC del 3 de octubre de 2016. El período de intensificación rápida de Matthew se muestra con el sombreado rojo (Fuente: NHC-NOAA).....	12
Figura 5: Balance básico horizontal en un ciclón tropical por encima de la frontera de la capa inicial de la atmósfera (Fuente: HRD).....	13
Figura 6: Valores de presión (pulgadas de Hg), velocidad media del viento en 10 minutos (nudos), y ráfagas de viento (nudos) asociadas con el huracán Matthew (fuente: NHC- NOAA).....	14
Figura 7: Esquema comparativo de metodologías para la evaluación de la amenaza por vientos asociada a ciclones tropicales. Fuente: Elaboración Propia.	18
Figura 8: Esquema metodológico propuesto para la evaluación de la amenaza por ciclones tropicales. Fuente: Elaboración Propia.....	25

Figura 9: Trayectorias de sistemas ciclónicos entre 1851 a 2016, entre un buffer de 290 km con punto epicentrito el municipio de Riohacha (zona continental) y buffer de 150 km con epicentro la Isla Roncador (zona insular). Elaboración Propia, según base de datos HURDAT2-IBTrACS 28

Figura 10: Variables del modelo de viento del ciclón tropical. Imagen satelital del Huracán Matthew del 30 de septiembre de 2016 a las 18:20 UTC. (Fuente: NASA SNPP/VIIRS)..... 29

INTRODUCCIÓN

En nuestro país no es frecuente el tránsito de ciclones tropicales sobre las zonas continentales e insulares, sin embargo, por su severidad y extensión, cuando estos pasan muy cerca a de nuestras costas los efectos en las lluvias, vientos y oleaje se hacen sentir, como es el caso del año 2016, cuando el Huracán Matthew, la noche del 1° de octubre pasó a 125 km al norte de Punta Gallinas en La Guajira con una potente categoría 5 y en su núcleo central con vientos máximos de 260 km/h, dejando una estela de daños en el norte de Colombia.

Se reportaron cerca de 20 viviendas destruidas y 1.000 averiadas, afectando a más de 140.000 personas, en diversos municipios de los departamentos de La Guajira, Cesar, Magdalena, Bolívar, Atlántico y Sucre. Por otro lado, el 20 de noviembre, al formarse la depresión tropical, que más tarde tomó el nombre de Otto, en el suroeste del mar Caribe produjo precipitaciones importantes y en la isla de San Andrés se registraron lluvias intensas, cayendo solo en ese día el 25% del promedio mensual, este sistema alcanzó a ser un huracán categoría 1 y se mantuvo sobre esta zona del Caribe hasta el día 24, cuando giró hacia el oeste, y cruzó por el extremo noroeste de Costa Rica para internarse en el océano Pacífico. Para la UNGRD la temporada de huracanes del 2016 le representó una inversión total de \$16.000 millones de pesos.

La experiencia a nivel mundial ha demostrado que en muchas oportunidades causa más daño la falta de información o la mala interpretación de la misma, acerca de los diferentes fenómenos naturales, que el fenómeno mismo en sí. Es por ello, que la UNGRD, en cumplimiento de su función, busca conocer los riesgos asociados con los ciclones tropicales, inicialmente dirigido a establecer el peligro que representa este fenómeno en el país.

Con el propósito de construir el mapa de amenaza por ciclones tropicales se presenta esta propuesta metodológica, aprovechando las herramientas de geointeligencia para la determinación del grado de amenaza que representan estos sistemas a su paso por Colombia y con el objeto de que se disponga de elementos de juicio objetivos para ser posteriormente usados bajo un enfoque transdisciplinario en el análisis del riesgo y estimaciones de los potenciales de pérdida de los peligros para tomar mejores decisiones.

Este documento presenta 3 capítulos, el primero describe las generalidades de los ciclones tropicales, el segundo relaciona los métodos utilizados para la evaluación de los ciclones tropicales y el tercero propone la metodología para la elaboración del mapa de amenaza por ciclones tropicales para Colombia.

CAPÍTULO 1. GENERALIDADES DE LOS CICLONES TROPICALES

Los ciclones tropicales se han considerado como los fenómenos meteorológicos más peligrosos que puedan presentarse en la zona tropical. Todos los países del área del Caribe, incluido Colombia, en mayor o menor grado están expuestos a estos fenómenos naturales entre junio a noviembre de cada año.

Los ciclones tropicales son sistemas de baja presión (WMO, 2017) con escalas horizontales entre 100-1000 km y se extienden a lo largo de la troposfera, su formación se debe principalmente a la transferencia de calor de la superficie del océano, y por ello su disipación ocurre cuando llegan a agua fría o transitan sobre tierra (Emanuel, 2003) de núcleo cálido que se forma sobre el océano y presenta una clara circulación de tipo espiral con un nubes-precipitación-vientos-presión bien organizado.

Entre su nacimiento y su máximo desarrollo pueden pasar por cuatro etapas de acuerdo con el grado de organización:

Perturbación tropical: Área de baja presión en el trópico con carácter definido, mantiene su identidad por más de 24 horas. El sistema puede o no estar relacionado a disturbios perceptibles en el campo de los vientos. Si adquiere mejor organización e intensidad, puede ser el grado inicial de un ciclón tropical.

Depresión Tropical: Hay evidencia de una circulación cerrada alrededor de un centro con vientos sostenidos máximos¹ menores de 62 km/h (34 nudos o 38 mph).

Tormenta Tropical: El sistema meteorológico presenta vientos máximos sostenidos entre 63 y 117 kph (34 y 63 nudos o 39 y 73 mph) pero circunscritos a la parte más interna y próxima al centro. En esta categoría al ciclón tropical se le asigna un nombre.

¹ La intensidad de los ciclones tropicales se define en términos del viento máximo promedio cerca del centro del ciclón a la altura estándar de 10 m sobre el océano o sobre una superficie terrestre llana y abierta. La velocidad media del viento se describe para valores de viento promedio de 1 minuto, norma empleada en los Estados Unidos y no con la norma de la OMM, que es de 10 minutos.

Huracán: Vientos máximos sostenidos alrededor de la parte central que exceden los 118 kph (64 nudos o 74 mph). Los huracanes se clasifican en 5 categorías de acuerdo con su potencia arrasadora según la escala Saffir-Simpson (Tabla 1).

Tabla 1 **Escala de Vientos de Saffir-Simpson**

Categoría Saffir-Simpson	Velocidad máxima de vientos sostenidos*		
	Km/h	nudos	mph
1	119 - 153	64 - 82	74 - 95
2	154 - 177	83 - 95	96 - 110
3	178 - 208	96 - 112	111 - 129
4	209 - 251	113 - 136	130 - 156
5	≥ 252	≥ 137	≥ 157

*Velocidad del viento está tomada como la media de un minuto.

Tabla 2 **Tipo de daños asociados a los ciclones tropicales**

Ciclón tropical	Velocidad del viento km/h	Marea* m	Presión central* hPa	Daños
Depresión tropical	0 - 62	0	> 980	Daños mínimos locales. Las lluvias persistentes pueden llegar a causar algunos daños e incluso inundaciones. Aumento del oleaje.
Tormenta tropical	63 - 117	0 - 3	> 980	Daños mínimos. Las lluvias abundantes pueden provocar inundaciones. Daños principalmente en árboles y arbustos. Fuerte oleaje.
Huracán Categoría 1	119 - 153	1.2 - 1.5	980 - 994	Daños mínimos. Daños principalmente a árboles, arbustos. Caminos y carreteras en costas bajas inundadas; daños menores en construcciones, muelles y atracaderos.
Huracán Categoría 2	154 - 177	1.8 - 2.4	965 - 979	Daños moderados. Daños considerables a árboles y arbustos, algunos derribados. Destrucción parcial de algunos techos, puertas y ventanas. Pocos daños a estructuras y edificios. Carreteras y caminos inundados cerca de las costas. Las marismas se inundan.
Huracán Categoría 3	178 - 208	2.7 - 3.7	945 - 964	Daños extensos. Muchas ramas son arrancadas a los árboles. Grandes árboles derribados. Daños serios a las estructuras. Marejadas sobre lo normal, inundando extensas áreas de zonas costeras.
Huracán Categoría 4	209 - 251	4.0 - 5.5	920 - 944	Daños extremos. Hay grandes daños estructurales. Se producen altas marejadas. Los terrenos llanos son inundados.
Huracán Categoría 5	≥ 252	≥ 5.5	< 920	Daños catastróficos. Daños de gran consideración en estructuras. Se registran mareas muy superiores a lo normal. Ocurren daños considerables inundaciones. Situación caótica.

*Valor aproximado

Los principales efectos asociados con los ciclones tropicales se destacan en primer lugar los vientos fuertes como impulsor de misiles de elementos y escombros, caídas de árboles y daños a las construcciones. En segundo lugar, la marea de tormenta costera (aumento de agua y oleaje debido a los efectos de vientos fuertes, a las bajas presiones atmosféricas y mareas astronómicas) que produce inundaciones costeras.

En tercer lugar se tiene la acumulación de lluvia que origina inundaciones, todos estos daños implican grandes pérdidas monetarias. Además, por daños indirectos se contabilizan los derivados por pérdida de energía, agua, comunicaciones o acceso al sitio de las construcciones. Como ejemplo, las pérdidas causadas por el huracán Harvey categoría 4 que azotó a Texas el 25 de agosto de 2017, alcanzaron los \$125 mil millones de dólares según el Centro Nacional de Huracanes (NHC, 2018). En la

Tabla 2 se presenta un resumen del tipo de daños asociados a los ciclones tropicales.

Aunque en términos generales los ciclones tropicales más intensos son los más peligrosos, los impactos directos dependen de muchos factores además de la intensidad, uno de los cuales es el lugar donde el ciclón toca tierra. Un ciclón menos intenso que atraviesa una zona de alta densidad de población puede provocar más daños, heridas y muertes que una tormenta muy intensa que azota una zona rural.

En la Figura 1 se muestran las trayectorias de los ciclones tropicales en el océano Atlántico, Mar Caribe y Golfo de México, donde se presentan en promedio 12 tormentas y 3 huracanes por año¹; en el Mar Caribe el paso de estos sistemas es mucho menor y se estima que alrededor del 20% cruzan por esta zona (León, 2007).

De los huracanes originados en el Atlántico que pasaron por el Mar Caribe, solo el 17% afectó las costas colombianas. Lo que quiere decir, que de los huracanes que se originaron entre 1964 y 2004, solo el 5.4% se acercó a las costas colombianas (UNGRD, 2016).

¹ <https://www.nhc.noaa.gov/>

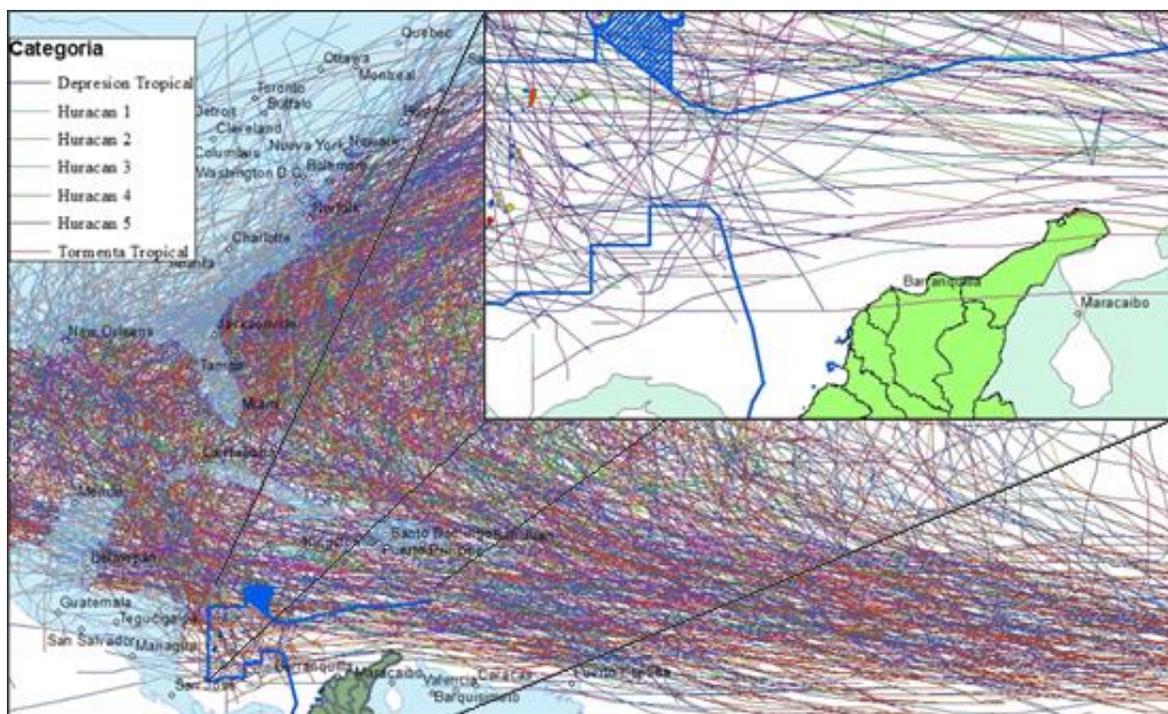


Figura 1: Trayectorias de ciclones tropicales periodo 1851- 2016. Fuente: Elaboración Propia, según base de datos HURDAT¹-IBTrACS²

Tabla 3 *Características de ciclones tropicales que han pasado sobre zonas insulares, costeras o al interior de Colombia.* Fuente: Elaboración Propia, según base de datos HURDAT2 -IBTrACS

Nombre	Estado	Lugar	Fecha	Vientos máximos sostenidos (km/h)	Presión central (hPa)
Sin Nombre	H2	Norte de La Guajira (Bahía Hondita, Norte parque Natural Macuira)	24-09-1877	167	SD
Sin Nombre	H2	Norte de La Guajira (Bahía Honda)	8-10-1892	157	SD
Sin Nombre	H2	Centro de la isla de San Andrés	10-09-1911	157	SD
HATTIE	H1	Nororiente de la isla de San Andrés	27-10-1961	120	911
ALMA	DT	Centro de la isla de Providencia	19-05-1970	46	1007
JOAN	TT	Norte de La Guajira (Uribia)	17-10-1988	111	995
BRET	TT	Sur de La Guajira (entre Barranca y Fonseca), Norte de la Sierra Nevada de Santa	8-08-1993	74	1006

¹ Best Track Data (HURDAT2) NHC <https://www.nhc.noaa.gov/data/#hurdat>

² International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS) <https://www.ncdc.noaa.gov/ibtracs/index.php>

Nombre	Estado	Lugar	Fecha	Vientos máximos sostenidos (km/h)	Presión central (hPa)
CESAR	TT	Marta, Norte de Magdalena (Zona Bananera) Norte de Atlántico (entre Baranoa y Polonuevo), Norte de Bolívar (cerca de Santa Catalina)	25-07-1996	74	1002
RINA	Perturbación	Norte de La Guajira (Bahía Hondita)	22-10-2011	46	1006

En Colombia son más frecuentes los ciclones tropicales en sus latitudes más septentrionales, por ello el área del Caribe occidental, donde se encuentra el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, presenta la mayor incidencia de estos sistemas, mientras que en la zona costera son raros, se destaca la Alta Guajira por ser la más expuesta.

La mayor parte de los impactos de los ciclones tropicales en nuestro país son por efectos indirectos¹, muy pocos de estos sistemas han tenido tránsito sobre las islas y costas colombianas. Los sistemas que han cruzado sobre el territorio nacional (

Tabla 3) con influencia directa sobre la isla de San Andrés han sido: el huracán de categoría 2 (sin nombre) que en el año 1911 cruzó sobre la parte central con vientos máximos sostenidos² de 157 km/h y el huracán Hattie categoría 3 que en el año 1961 transitó por el extremo nororiental con velocidades de 120 km/h.

Por la isla de Providencia, en 1970 la depresión tropical, que más tarde al convertirse en tormenta tropical tomó el nombre de Alma, cruzó con vientos de 46 km/h. La tormenta tropical Bret es el ciclón que ha pasado por la posición más austral de Colombia, en agosto de 1993 atravesó por el sur de La Guajira, y en su tránsito hacia el occidente, pasó por el costado norte de la Sierra Nevada de Santa Marta y salió al mar entre los límites de los departamentos de Atlántico y Bolívar, manteniendo vientos de 74 km/h. Sobre la Alta Guajira, la tormenta

¹ Efectos indirectos son consecuencias razonablemente previsibles de la acción del evento, pero son posteriores en el tiempo o se alejan más de los efectos directos (causados por la acción del evento y ocurren al mismo tiempo y lugar). Los efectos indirectos son conocidos como efectos secundarios. <https://www.fema.gov/types-effects>

² Promediados en 1 minuto

tropical Cesar cruzó en el año 1996 con vientos 74 km/h, el Joan pasó como tormenta tropical en 1988 con vientos de 111 km/h, en diciembre de 1887 transitó la tormenta tropical con vientos de 93 km/h, el huracán categoría 2 en septiembre de 1877 con vientos de 167 km/h y otro huracán categoría 2 el 8 de octubre de 1892 con vientos de 157 km/h.

En la Tabla 4 se muestra el número de ciclones tropicales que han pasado en un área de influencia de 50, 75, 100, 150 y 200 km de radio.

Los ciclones tropicales comparten algunos elementos característicos en su estructura (Laing, 2016). Todas las depresiones tropicales, tormentas tropicales y huracanes presentan: un flujo entrante en la capa límite, una pared alrededor del ojo, una capa de cirros, bandas de lluvia y un flujo saliente en la troposfera superior (Figura 2). La región despejada en el centro de los ciclones tropicales maduros, se conoce como el ojo, es relativamente tranquila, con vientos débiles y la presión de superficie más baja. La banda organizada de tormentas que rodea el centro tranquilo del ciclón es la pared del ojo y en el costado interno de este anillo de tormentas es donde se encuentra los vientos más intensos.

Tabla 4 Frecuencia de ciclones tropicales para los periodos 1851-2016 y 1950-2016 para diferentes localidades colombianas sobre radios de 50, 75, 100, 150 y 200 km. Fuente: Elaboración Propia, según base de datos HURDAT2 –IBTrACS

Localidad	Radio	1851-2016	1950-2016	Localidad	Radio	1851-2016	1950-2016
Serranilla	50 km	20	6	Cartagena	50 km	1	1
	75 km	37	16		75 km	2	1
	100 km	52	22		100 km	2	2
	150 km	73	29		150 km	5	5
	200 km	109	45		200 km	12	6
Providencia	50 km	18	7	Barranquilla	50 km	1	1
	75 km	30	5		75 km	1	1
	100 km	37	19		100 km	2	2
	150 km	63	31		150 km	8	4
	200 km	80	43		200 km	3	6
San Andrés	50 km	10	5	Santa marta	50 km	1	1
	75 km	22	11		75 km	3	3
	100 km	33	17		100 km	3	3
	150 km	47	21		150 km	7	5
	200 km	66	35		200 km	1	6
Punta	50 km	5	2	Valledupar	50 km	0	0
Gallinas	75 km	10	5		75 km	1	1

Localidad	Radio	1851-2016	1950-2016	Localidad	Radio	1851-2016	1950-2016
	100 km	14	7		100 km	1	1
	150 km	22	13		150 km	2	2
	200 km	33	18		200 km	3	3
				Riohacha	50 km	1	1
					75 km	2	2
					100 km	4	3
					150 km	9	5
					200 km	4	8

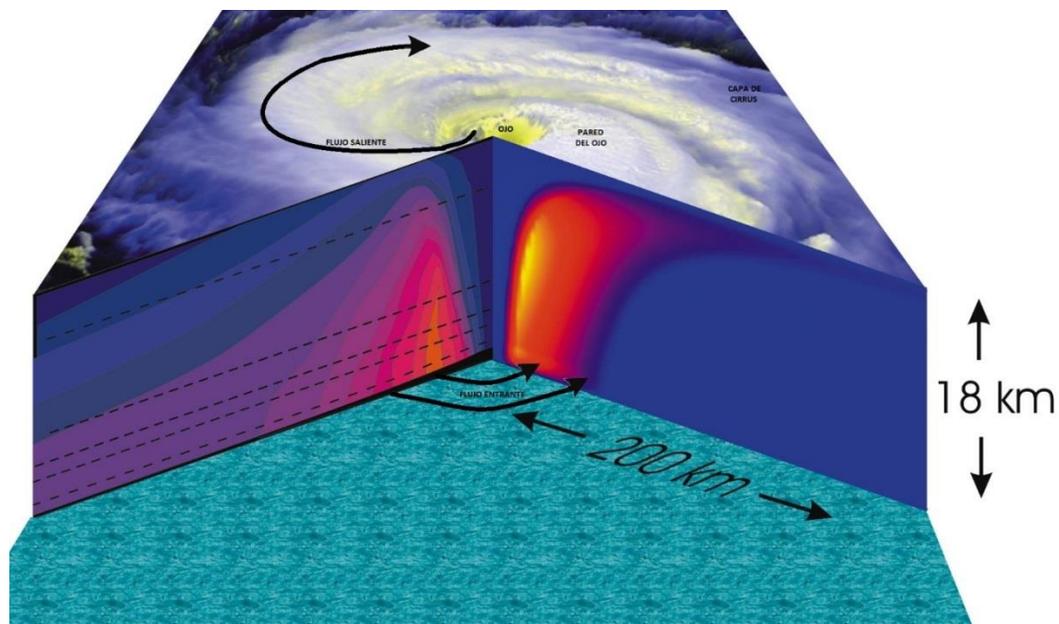


Figura 2: Estructura del ciclón tropical. La fotografía de satélite superior corresponde al huracán Fran de 1996. El corte de la derecha muestra la velocidad de la componente vertical a partir de una simulación numérica con valores máximos (amarillo) de 8 m/s. El corte de la izquierda muestra la magnitud del viento medido en el huracán Inez de 1966 con valores máximos de 180 km/h (Adaptado, Emanuel 2003)

El ojo está circundado por una banda de tormentas eléctricas situadas en la región de vientos máximos que recibe el nombre de pared del ojo. Las bandas de lluvia, que se caracterizan por convección fuerte y lluvias intensas, se extienden desde la pared del ojo hasta unos 200 a 300 km en promedio, pueden afectar zonas terrestres con precipitaciones

intensas, que pueden llegar a saturar el suelo muy rápidamente y provocar crecientes súbitas, avalanchas, inundaciones y deslizamientos, entre otros.

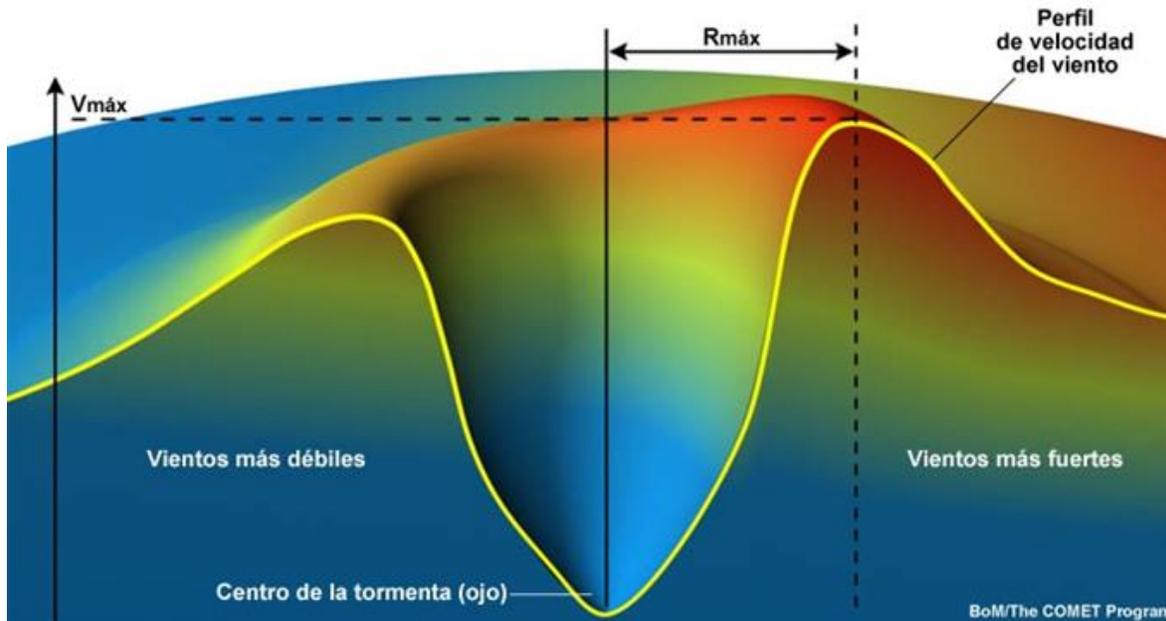


Figura 3: Perfil de la velocidad del viento en los ciclones tropicales (Fuente: COMET)

Los vientos fluyen ciclónicamente (en el mismo sentido que el componente vertical local de la rotación terrestre) a lo largo de la mayor parte del volumen ocupado por los ciclones tropicales, pero cerca de la parte superior de la tormenta, el sentido de rotación se invierte y es anticiclónico, excepto quizás muy cerca del centro de tormentas. Los vientos aumentan rápidamente hacia afuera desde el ojo, alcanzando una fuerza máxima de 10-100 km desde el centro (Tabla 5), y luego caen más gradualmente con el radio, siguiendo la ley de caída de radio de vientos máximos, aproximadamente a $r^{1/2}$, pero cayendo más rápido para radios más grandes (Emanuel, 2003).

En general, para radios entre 100 y 1000 km, las velocidades del viento se vuelven indistinguibles de las que normalmente se encuentran en la atmósfera tropical. En la Figura 9, se muestra la relación del radio de los vientos máximos y la intensidad del Huracán Matthew, que inició su travesía por aguas cálidas del Mar Caribe, el día 28 de septiembre de 2016 como tormenta tropical, y al aproximarse a la península de La Guajira se fortaleció muy

rápidamente, con aumento en sus vientos del orden de 140 km/h, pasando a huracán categoría 5 el día 1 de octubre, con vientos máximos sostenidos de 268 km/h, cuando se encontraba a menos de 150 km al norte de Punta Gallinas. Esta intensidad, convirtió a Matthew en el huracán de categoría 5 más austral de la cuenca del Atlántico, superando el récord previamente establecido por el huracán Iván en 2004 (NHC, 2018).

Tabla 5 **Radio de vientos máximos sostenidos de los ciclones tropicales para la cuenca del Caribe, periodo 2004-2016. Fuente: Elaboración Propia, según base de datos HURDAT2 -IBTrACS**

Radio de vientos máximos sostenidos (km)				
	63 km/h - NE	63 km/h - SE	63 km/h - SW	63 km/h - NW
Mínimo	48	32	32	24
Máximo	290	290	217	290
Promedio	149	112	79	125
	93 km/h - NE	93 km/h - SE	93 km/h - SW	93 km/h - NW
Mínimo	16	16	16	16
Máximo	161	121	80	161
Promedio	80	55	42	73
	118 km/h - NE	118 km/h - SE	118 km/h - SW	118 km/h - NW
Mínimo	16	16	16	16
Máximo	97	48	48	97
Promedio	46	30	26	43

Cabe señalar que en los ciclones tropicales los vientos máximos ocurren muy cerca de la superficie y decaen lentamente hacia arriba, finalmente invirtiendo la dirección cerca de la cima de la tormenta. La traslación de la tormenta, conduce a una asimetría en el campo de viento relativo al suelo. Por lo general, los vientos más fuertes de un huracán se encuentran en el lado derecho de la tormenta.

En el Mar Caribe el radio de los vientos máximos (Tabla 5) disponibles en la serie HURDAT2¹, realizadas a partir de los reconocimientos aéreos y las imágenes satelitales infrarrojas, indica que para velocidades hasta de 63 km/h (depresiones Tropicales) en el cuadrante NE el promedio de su extensión es de 149 km, es de anotar que son los que más se extienden horizontalmente comparados con el cubrimiento promedio para vientos de 93

¹ <https://www.nhc.noaa.gov/data/#hurdat>

km/h (tormentas tropicales) y 118 km/h (huracanes) que son de 80 km y 46 km respectivamente.

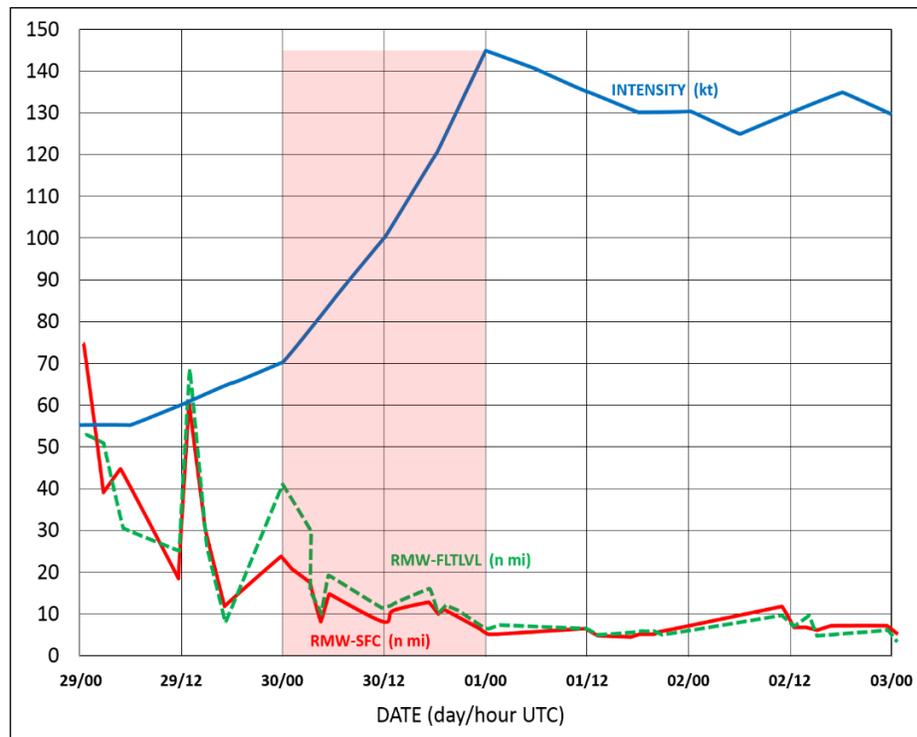


Figura 4: Intensidad del huracán Matthew en función del radio de vientos máximos en superficie (RMW-SFC) y del radio de vientos máximos a 700 hPa (RMW-FLTLVL). Entre las 0000 UTC del 29 de septiembre a las 0000 UTC del 3 de octubre de 2016. El período de intensificación rápida de Matthew se muestra con el sombreado rojo (Fuente: NHC-NOAA)

A veces los vientos fuertes de los ciclones tropicales pueden extenderse a áreas de tierra adentro. La velocidad del viento en la superficie baja como resultado de la fricción. El aumento de la fricción al tocar tierra actúa tanto para disminuir los vientos sostenidos como para aumentar las ráfagas que se sienten en la superficie, algo que parece ser contradictorio (Powell, 1996). Los vientos sostenidos (promedio durante 1 minuto o más) son reducidos a causa del efecto amortiguador por la mayor aspereza de la tierra (arbustos, árboles, y casas sobre la tierra comparado al océano que es relativamente suave y plano). Las ráfagas son más fuertes porque la turbulencia aumenta y trae vientos instantáneos más rápidos hacia la superficie por unos segundos.

La presión central, otra medida de la intensidad, se puede determinar mediante una relación viento-presión. El balance básico horizontal en un ciclón tropical por encima de la frontera de la capa inicial de la atmósfera (Figura 5), está entre la suma de la 'aceleración' de Coriolis y la 'aceleración' centrípeta, balanceada por la fuerza del gradiente de presión horizontal. A este balance se le llama balance de gradientes, donde la 'aceleración' de Coriolis es definida como la velocidad horizontal de una parcela de aire, v , multiplicado por el parámetro de Coriolis, f . La 'fuerza' Centrípeta es definida como la aceleración en una parcela de aire moviéndose en una trayectoria encorvada, dirigida al centro de curvatura de la trayectoria, con una magnitud v^2/r , donde v es la velocidad horizontal de la parcela y r es el radio de curvatura de la trayectoria.

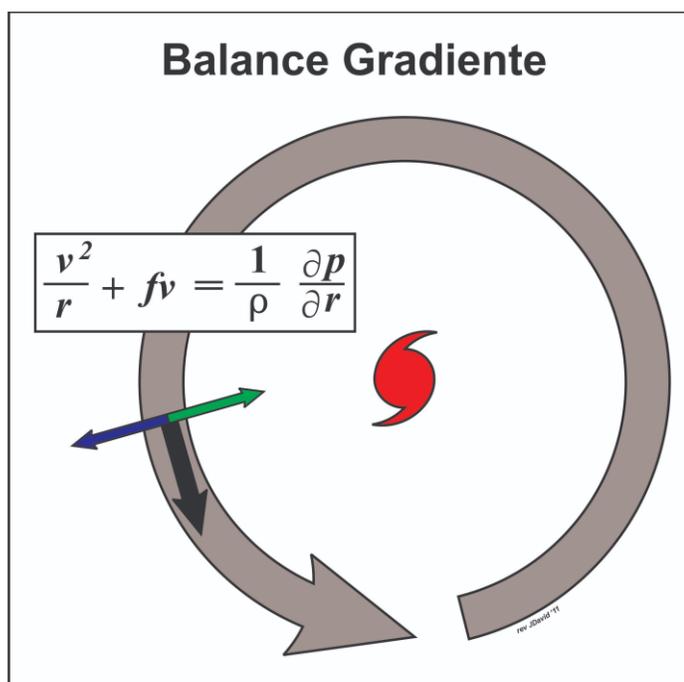


Figura 5: Balance básico horizontal en un ciclón tropical por encima de la frontera de la capa inicial de la atmósfera (Fuente: HRD)

La fuerza centrípeta altera el balance geostrófico original de las dos fuerzas y crea un viento de gradiente no-geostrófico. La razón por la que diferentes vientos máximos pueden terminar en diferentes presiones centrales, es el hecho de que el radio, r , del viento máximo varía. Una tormenta con vientos máximos de 40 m/s con un radio de vientos máximos de 100 km tendrá una presión mucho más baja que con un radio de vientos máximos de 25 km (HRD,

2004). En la Figura 6, se observa el caso de la relación presión y velocidad del viento del huracán Matthew de 2016.

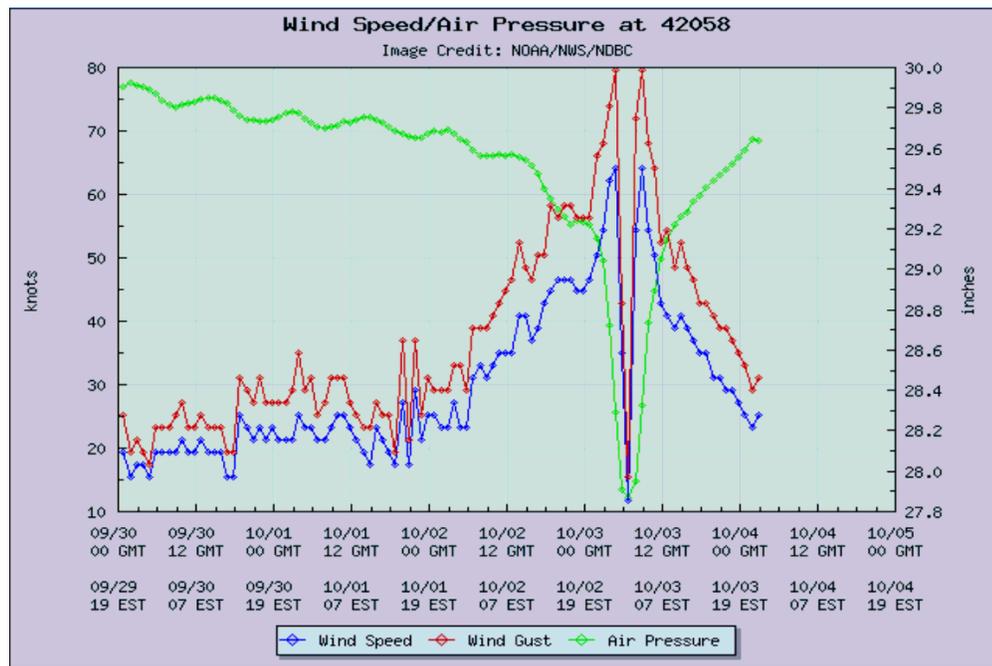


Figura 6: Valores de presión (pulgadas de Hg), velocidad media del viento en 10 minutos (nudos), y ráfagas de viento (nudos) asociadas con el huracán Matthew (fuente: NHC- NOAA)

Una vez que un sistema se encuentre sobre tierra firme, la relación entre la intensidad y el patrón nuboso cambia. Después de algunas horas, el ciclón tropical sobre tierra comienza a debilitarse rápidamente, no a causa de la fricción, sino debido a la falta de humedad y calor que el océano proporciona a la tormenta (HRD, 2004). Esta reducción de humedad y calor perjudica la capacidad del ciclón para producir tormentas eléctricas cerca del centro de la tormenta. Sin esta convección, la tormenta se debilita rápidamente.

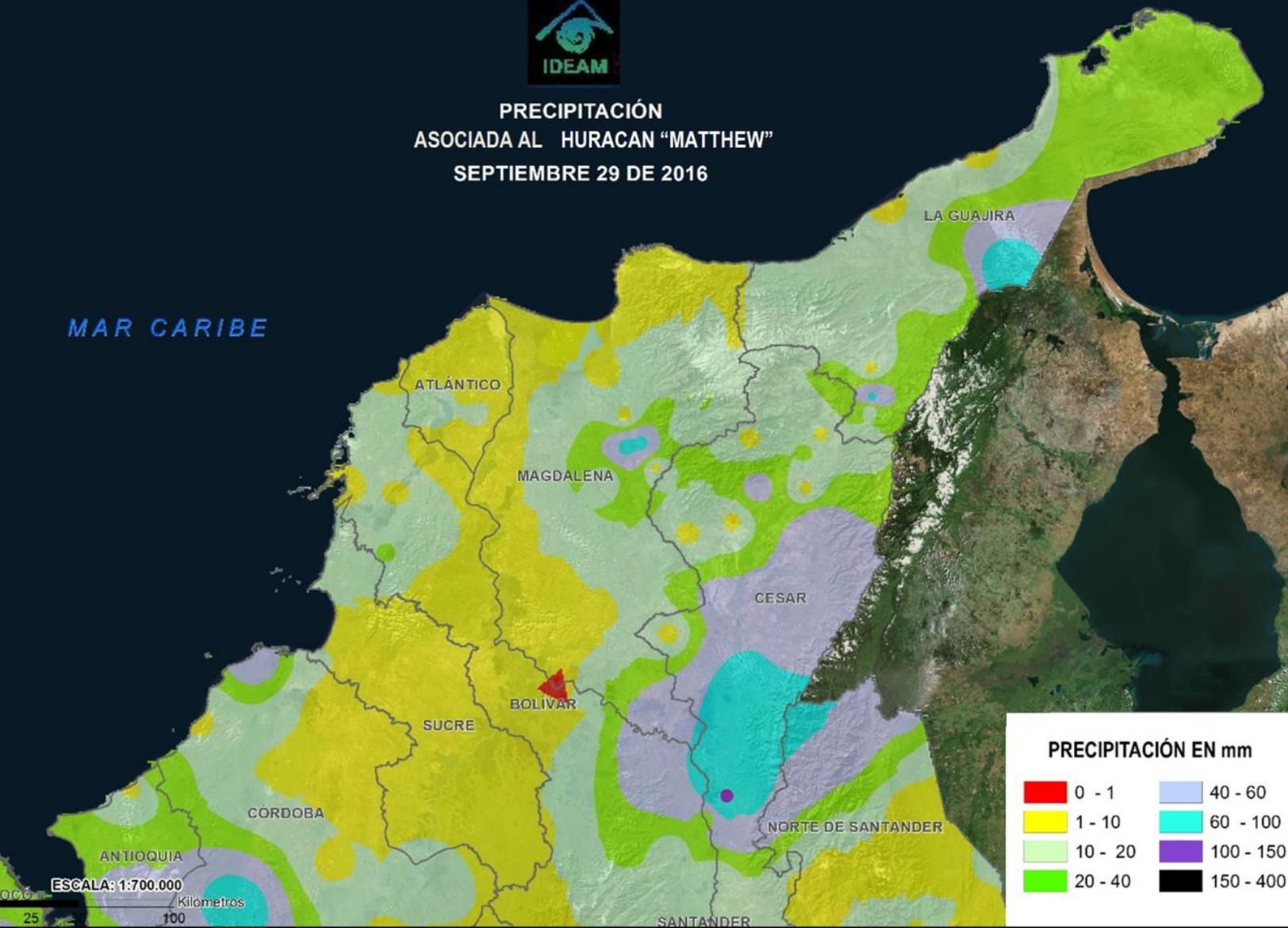
Los vientos fuertes, la lluvia intensa y la marea de tormenta o marejada ciclónica se constituyen en los principales peligros asociados con los huracanes que tocan tierra. La marea de tormenta es el aumento anormal del nivel del agua generado por los ciclones tropicales por encima de la marea astronómica prevista. El ascenso del agua se observa mucho antes de que el huracán toque tierra, lo que acorta el tiempo para la evacuación de la población. Su causa principal es el efecto de los vientos del huracán, que empujan el agua oceánica sobre la

costa, aunque las bajas presiones del ojo también contribuyen al efecto en cierta medida. Las olas pueden desplazarse decenas de kilómetros tierra adentro, inundando rápidamente y provocando la destrucción considerable de bienes, estructuras, vegetación y paisajes costeros, entre otros. La mayor parte de las 1.800 muertes causadas por el huracán Katrina que asoló Luisiana en 2005 fueron atribuidas a este fenómeno, según la NOAA.

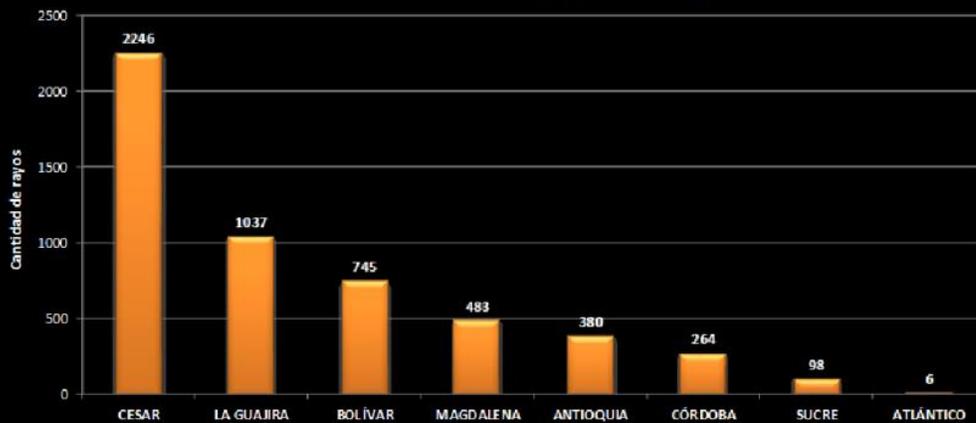
Las lluvias intensas son extremadamente variables en duración y extensión. Su distribución e intensidad dependen además de la velocidad de avance del sistema y factores locales como la topografía y la humedad, principalmente. La fuerte precipitación origina severos daños por la infiltración del agua en las construcciones que pueden dar lugar a fallas estructurales. Las lluvias intensas también pueden contribuir con la ocurrencia de deslizamientos, las áreas con pendientes desde medianas hasta muy pronunciadas se sobresaturan y fallan a lo largo de las zonas más débiles. Así, las áreas en un valle de terrenos bajos no son los únicos lugares vulnerables a la precipitación. Buena parte de los daños provocados por los ciclones tropicales son producto de las inundaciones causadas por las lluvias intensas.



**PRECIPITACIÓN
ASOCIADA AL HURACAN "MATTHEW"
SEPTIEMBRE 29 DE 2016**



Cantidad de rayos por departamentos de la región Caribe del 29 al 30 de septiembre (12:00 pm-12:00 pm)



Fuente: SITUACIÓN ACTUAL ASOCIADA AL HURACAN "MATTHEW". IDEAM Septiembre 30 de 2016

CAPÍTULO 2. MÉTODOS USADOS PARA LA EVALUACIÓN DE AMENAZA POR CICLONES TROPICALES

La evaluación de las amenazas que ponen en peligro los elementos expuestos de una zona determinada es el primer paso para el análisis de riesgo. Las condiciones de ocurrencia de eventos peligrosos, así como las características reportadas sobre eventos históricos importantes, proveen una primera idea del potencial destructivo de los fenómenos que amenazan la región, y permite conocer anticipadamente, de manera aproximada, los periodos de retorno de los eventos más importantes (ERN, 2018).

La amenaza está representada por la potencial ocurrencia de un evento, que puede causar daños, con determinada intensidad y duración. La caracterización de la amenaza se representa por un conjunto de escenarios, donde cada escenario tiene asociado una distribución geográfica de intensidades específicas y una frecuencia de ocurrencia determinada.

El cálculo de la intensidad de cada escenario, tiene un nivel de incertidumbre originado por las características de los datos de entrada y por la imposibilidad de saber dónde, cuándo y de qué intensidad serán los próximos eventos. En consecuencia, la intensidad se representa con una distribución de probabilidades con un valor esperado y un coeficiente de variación que represente a la incertidumbre.

En la evaluación de riesgos por ciclones tropicales el objetivo primordial es estimar la amenaza dada por las probabilidades de velocidad del viento relacionadas con los ciclones tropicales para las zonas costeras. Como evaluación complementaria se considera la marea de tormenta y las lluvias intensas.

Existe una variedad de métodos estadísticos, dinámicos e híbridos para modelar los peligros. Para estimar las probabilidades se efectúan por inferencia estadística de una base de datos de ciclones tropicales del pasado.

Métodos Estadísticos

La metodología más directa para estimar las probabilidades de viento relacionadas con ciclones tropicales en cualquier ubicación costera se resume en la Figura 7.

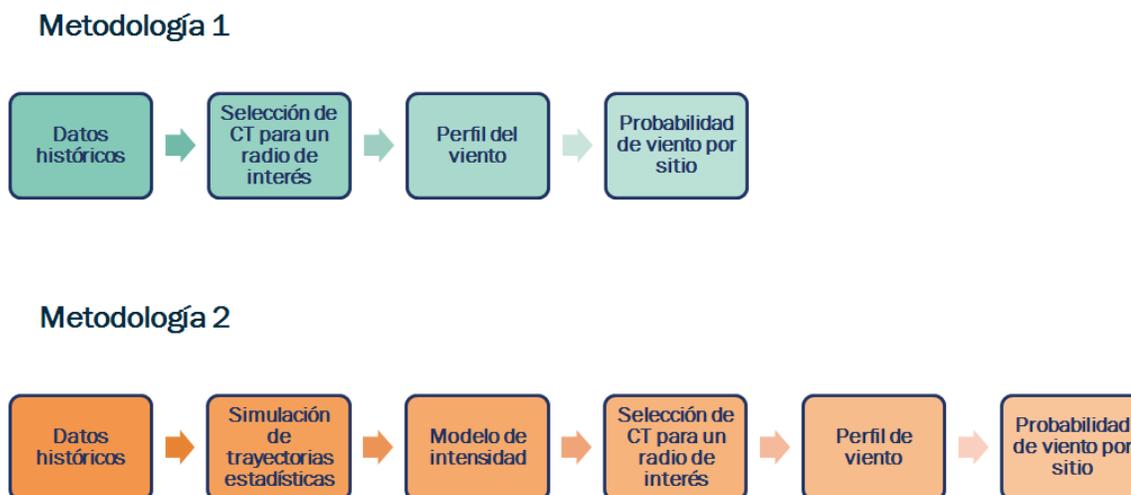


Figura 7: Esquema comparativo de metodologías para la evaluación de la amenaza por vientos asociada a ciclones tropicales. Fuente: Elaboración Propia.

La metodología 1, se centra en la estimación de las probabilidades de velocidad del viento en una ubicación particular, teniendo en cuenta la climatología de la variación espacial ciclones tropicales, donde solo se seleccionan las trayectorias históricas que pasan dentro de un radio de exploración para la ubicación dada. Dentro de esta subregión, se supone que las características son uniformes.

Dado que la base de datos de ciclones tropicales solo proporciona información sobre seguimiento e intensidad, un modelo de perfil eólico empírico o analítico se aplica para deducir el viento causado por los ciclones tropicales históricos seleccionados en el sitio de interés. De la serie temporal obtenida de vientos en el sitio de interés, se calculan las probabilidades de velocidad del viento. Sin embargo, el registro histórico es muy limitado para la inferencia estadística: para la cuenca del Atlántico Norte, solo hay 1402 trayectorias disponibles, de las cuales aproximadamente 200 corresponden a la cuenca del Caribe. Esto es particularmente

problemático cuando se estudian áreas restringidas, por ejemplo, en Cartagena solo pasan 12 trayectorias dentro de un radio de 200 km.

Al hacer inferencias estadísticas con muestras pequeñas se podría cometer algunos errores en las estimaciones. Además, los datos se vuelven menos seguros cuando estos corresponden a los primeros registros (Murnane, 2000), por incertidumbres sobre la posición y la intensidad, además es bastante probable que muchas tormentas no hayan sido detectadas antes de 1944, cuando se inició la era del reconocimiento por aeronaves o de 1970, cuando no había observaciones sistemáticas por satélite (Hagen et al., 2012, Jarvinen, et al., 1984). No obstante, no sería apropiado estimar los períodos de retorno de la fuerza más allá del rango de observación (DeMaria, et al., 2009, Chu&Wang, 1998).

En la metodología 2, se recurre al uso de simulaciones, en especial las de Monte Carlo. Se usan para aumentar el número de la muestra de análisis de viento máximo a partir de los cuales se calculan las probabilidades de excedencia (Neumann, 1987).

Por ejemplo, algunos autores (Chu & Wang, 1998, Jagger et al., 2001) ajustan a una distribución de valores extremos. Neumann (1987), calcula las funciones de densidad de probabilidad (PDF) de las características de los ciclones tropicales (como la distancia de acercamiento más próxima, intensidad, radio de vientos máximos) a partir de un radio de exploración, con las PDFs, se toman muestras de un gran número de características y se calculan los vientos.

En la mayoría de los modelos, la frecuencia e intensidad de ciclones se parametrizan por la presión central del sistema. Otros modelos usan un parámetro, llamado intensidad relativa (Emanuel, 1988, Darling, 1991). El parámetro de Holland B (Holland, 1980) que describe el perfil radial de presiones es utilizado en algunos modelos. Todos estos parámetros se ajustan a las distribuciones de probabilidad.

La teoría de valores extremos también se ha utilizado, hace uso de datos dispersos o eventos extremos para crear una distribución de probabilidad. Katz (2002) usa las distribuciones de Pareto generalizadas (un tipo de distribución de valores extremos) se ajustan

en los EE. UU., con los de datos de huracanes que tocan tierra, utilizando índices climáticos a gran escala como covariables.

El modelo de Vickery (2000) es una mejora sobre técnicas anteriores de simulación de huracanes porque elimina los problemas asociados con la selección de una subregión de la cual se deriva las distribuciones estadísticas necesaria en los modelos de simulación tradicionales. Una gran cantidad de trayectorias sintéticas e intensidades se producen a través de un modelo estadístico basado en un conjunto de ecuaciones de regresión ajustadas a los registros históricos.

James y Mason (2005) modela la ubicación central de los ciclones, latitud y longitud como un proceso autorregresivo (AR), lo que significa que el próximo paso simulado depende de los pasos anteriores.

Neumann (1970), con el modelo HURRAN (Hurricane Analog), simula trayectorias sintéticas y calcula las probabilidades para la próxima posición de las trayectorias simuladas a partir de esos análogos históricos. Posteriormente sugirió un modelo de regresión múltiple, CLIPER (Climatology-Persistence) (Neumann, 1972) basado en un conjunto de regresión polinomial para relacionar un número seleccionado de predictores con predictandos. Semejante al modelo de trayectoria de CLIPER, el modelo de SHIFOR (modelo Estadístico del Pronóstico de la Intensidad del Huracán) se usa como un pronóstico "sin habilidad" del cambio de la intensidad. Es un modelo estadístico de regresión múltiple que mejor utiliza la persistencia de las tendencias de la intensidad y también incorpora la información del cambio climatológico de la intensidad climatológica (Jarvinen and Neumann 1979).

Un modelo estadístico-sinóptico, SHIPS (Esquema Estadístico de la Predicción de la Intensidad de Huracanes), ha estado disponible desde mediados de los 1990s (DeMaria and Kaplan 1994). El modelo usa la información actual y pronosticada de la escala sinóptica las temperaturas en la superficie del mar, la cizalladura vertical, la estabilidad húmeda, entre otras, con una combinación óptima de la tendencia de la intensidad del ciclón.

Dada una trayectoria histórica o simulada específica, se necesitan modelos de campo de viento para calcular las velocidades y las direcciones del viento. Típicamente, los campos

de viento se modelan en tres pasos: campo de viento de nivel de gradiente medio, campo de viento de nivel de superficie medio, y factores de ráfaga.

Métodos Dinámicos

Los modelos dinámicos usan la comprensión física de los ciclones tropicales en un ambiente y clima específicos para simular estos sistemas. Sin embargo, la mayoría de los modelos dinámicos no tienen una resolución lo suficientemente alta como para representar los ciclones (Meehl et al., 2007), y su funcionamiento es muy costoso desde el punto de vista computacional si el objetivo es crear un gran conjunto de miles de años. Esto proporciona motivaciones para usar modelos que son completamente estadísticos y se basan en las observaciones históricas.

El Modelo de Beta y Advección (conocido como BAM por su sigla en inglés), sigue una trayectoria del viento horizontal promedio ponderado con la presión en la vertical del modelo de Aviación (GFS) comenzando con la actual posición del sistema con una corrección que toma en cuenta el efecto beta (Marks, 1992).

Un modelo barotrópico del pronóstico de la trayectoria del huracán (conocido como LBAR en inglés), para el Modelo Barotrópico de Área Limitado, se ejecuta de acuerdo con su función cada 6 horas.

SHIFOR5 (Statistical Hurricane Intensity Forecast), Pronóstico Estadístico de Intensidad de Huracanes se usa para medir habilidades en un conjunto de pronósticos de intensidad, incluye el componente de tasa de degradación de la tierra. Técnica de regresión múltiple utilizando predictores de climatología y persistencia.

El modelo espectral GFS (Global Forecast System) de la NOAA (Lord 1993) ha sido usado para el pronóstico de la trayectoria desde la temporada de huracanes del 1992, con una resolución espacial de aproximada de 13km.

Un modelo de ecuaciones primitivas con una malla móvil y triple añadido desarrollado en el Laboratorio de Dinámica Fluida (Bender et al 1993), conocido como el modelo de GFDL. El modelo es capaz de reproducir las características que son importantes

en un huracán. Estos incluyen la entrada de aire de bajo nivel en la región del núcleo interno del huracán; el suministro de la energía de la tormenta a partir de la evaporación del agua de la superficie del océano; corrientes ascendentes de aire cálido y húmedo que alimentan tormentas eléctricas en la región central de la tormenta, lo que ayuda a intensificar el huracán; y la salida de aire más frío y seco en los niveles superiores de la troposfera. Un modelo móvil no hidrostático de ecuaciones primitivas con una malla doble conocido como HWRF (para el Modelo de Investigación y Pronóstico de Huracanes y Tiempo). El modelo usa los campos de datos del GFS para las condiciones de contorno, cuenta con dos núcleos dinámicos, parametrizaciones físicas múltiples, un sistema de asimilación de datos variacional y capacidad para acoplarse con un modelo oceánico.

El Modelo Ambiental Global de la Marina de los Estados Unidos (conocido como NAVGEM por su sigla en inglés) también es un modelo mundial numérico que demuestra la habilidad de pronosticar la trayectoria del ciclón tropical (Fiorino et al. 1993). Este modelo hace parte del sistema operativo del Centro Nacional de Huracanes desde 1996.

El Modelo Ambiental Global del Centro Meteorológico Canadiense (GEM por sus siglas en inglés) se usa con fines de seguimiento e intensidad.

El modelo mundial del Centro Europeo para el Pronóstico del Tiempo de Medio Plazo Sistema de Predicción Integrada (conocido como IFS en inglés), comprende un modelo atmosférico espectral con un sistema de coordenadas verticales que sigue el terreno acoplado a un sistema de asimilación de datos 4D-Var. Ha demostrado ser el mejor modelo para el pronóstico de la trayectoria y es el modelo mundial disponible de la más alta resolución.

El Modelo Espectral Mundial de La Agencia Meteorológica Japonesa (conocido como GSM en inglés), utiliza una malla de 20 km de resolución espacial para predecir las trayectorias e intensidades de los ciclones tropicales desde 2007.

Métodos Dinámicos - Estadísticos

El modelo ENVIAR, Esquema estadístico de predicción de intensidad de huracanes es un modelo estadístico-dinámico basado en técnicas estándar de regresión múltiple. La

metodología de predicción está basada en la climatología, persistencia, parámetros ambientales de la atmósfera y del componente oceánico.

DSHP, Esquema de Predicción de Intensidad de Huracán-Estadística de Decaimiento es un modelo estadístico-dinámico basado en técnicas estándar de regresión múltiple. La metodología de predicción está basada en la climatología, persistencia, parámetros ambientales de la atmósfera, entrada oceánica y un componente de desintegración del interior.

LGEM, Modelo de ecuación de crecimiento logístico es un modelo estadístico para la intensidad basado en un marco simplificado de predicción dinámica. Un subconjunto de predictores, contenido de calor oceánico y variabilidad del medio ambiente es utilizado para determinar la tasa de crecimiento coeficiente de viento máximo.



HURACÁN JOAN 1988

TORMENTA TROPICAL BRET 1993

- | | |
|--------------------|-------------------|
| DEPRESIÓN TROPICAL | TORMENTA TROPICAL |
| HURACÁN CAT. 1 | HURACÁN CAT. 2 |
| HURACÁN CAT. 3 | HURACÁN CAT. 4 |
| HURACÁN CAT. 5 | |

Fuente: Elaboración según base de datos HURDAT2 -IBTrACS

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA PROPUESTA PARA LA ELABORACIÓN DE MAPAS DE AMENAZA POR CICLONES TROPICALES PARA COLOMBIA.

La metodología propuesta para la elaboración de mapas de amenaza por ciclones tropicales para Colombia es del tipo estadístico, basada en la metodología que usa el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), institución técnica-científica de la Coordinación Nacional de Protección Civil que tiene entre sus atribuciones la integración del Atlas Nacional de Riesgos (ANR) de México.

El desarrollo metodológico, establecido mediante el “ACUERDO por el que se emite la guía de contenido mínimo para la elaboración del Atlas Nacional de Riesgos” y publicado en Diario Oficial de la Federación Tomo DCCLIX No. 15 Ciudad de México, miércoles 21 de diciembre de 2016 (http://www.anr.gob.mx/Descargas/Guia_contenido_minimo2016.pdf), junto con Términos de Referencia para la Elaboración de Atlas de Peligros y/o Riesgos 2016 (https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/135433/TR_AR_231016_Pu_blico.pdf) y sus anexos; son los lineamientos adoptados para la elaboración de esta propuesta, que previamente fue consensuada con el IDEAM y DIMAR (Sede Central y CIOH).

Adicionalmente, la metodología fue complementada con el modelo de viento. La propuesta metodológica se resume esquemáticamente en la Figura 8.



Figura 8: Esquema metodológico propuesto para la evaluación de la amenaza por ciclones tropicales.
Fuente: Elaboración Propia.

A continuación, se describe el esquema meteorológico propuesto:

Datos de ciclones tropicales

El conjunto de datos “International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS) (Knapp et al., 2010, Kruk et al., 2010, Levinson, 2010) es una colección completa de todos los ciclones tropicales registrados en todo el mundo, incluida las cuencas del Atlántico, Golfo de México y Mar Caribe Norte, que a su vez es derivada de la base de datos Best Track Data (HURDAT2), para el periodo 1852 a 2016.

HURDAT2 (Landsea, 2013) hace uso de todas las observaciones disponibles, incluidas aquellas que pueden no haber estado disponibles en tiempo real. Además, el Centro Nacional de Huracanes de la NOAA - NHC lleva a cabo revisiones continuas de cualquier análisis retrospectivo de ciclones tropicales presentado a su atención y periódicamente actualiza el registro histórico para reflejar los cambios introducidos. Esta base de datos histórica de ciclones tropicales contiene información cada seis horas sobre la ubicación, los vientos máximos, la presión central y el tamaño de todos los ciclones tropicales y ciclones subtropicales conocidos (a partir del año 2004). El tamaño está asociado con la extensión de los vientos máximos sostenidos (promedió durante 1 minuto a 10 m de altura) para los umbrales de 34, 50 y 64 nudos en los cuadrantes noreste, sureste, suroeste y noroeste.

Para el caso colombiano, la región de trabajo, comprendida entre 5°N-20°N y 65W-85W, el subconjunto de la serie HURDAT2- IBTrACS, periodo 1851-2016, arroja cerca de 500 trayectorias para el análisis de amenaza. Razón por la cual las trayectorias históricas fueron enriquecidas con el subconjunto de trayectorias de las proyecciones de los modelos estadísticos, dinámicos y combinados para los ciclones durante toda la vida útil de la tormenta en la cuenca del Atlántico, que en su momento se constituyeron en una ayuda para crear los diagramas de orientación en tiempo real. Estas proyecciones de modelos procedentes de los Centros de Alerta de Ciclones, incluidos los del Centro Nacional de Huracanes (NHC) de los EE.UU., se encuentran públicamente disponibles en la plataforma Tropical Cyclone Guidance Project (TCGP) de NCAR.

Para el subconjunto de datos procedentes de proyecciones para la cuenca del Caribe, se evidencia el incremento en más de 20.000 trayectorias de ciclones tropicales procedentes los modelos GFS (ensamblados y 20 miembros), Canadiense (ensamblados y 20 miembros), NAVGEM, GFDL, Navy GFDL, HWRF, NAM, LBAR, UKMET, SHIFOR, CLIPER, SHIPS, NOGAPS, ETA, combinación CLIPER y SHIFOR, entre otros.

Para la selección de ciclones tropical afectando tierra, se considera la extensión del tamaño máximo de afectación por la extensión de los vientos máximos, según (Kruk, 2010). En la Tabla 5 ***Radio de vientos máximos sostenidos de los ciclones tropicales para la cuenca del Caribe, periodo 2004-2016.***

Usando todos los datos provistos en el conjunto de serie se obtiene una distancia máxima de radios de viento que es compuesta principalmente de observaciones sobre el agua y algunas pocas de observaciones en tierra. Aplicando este resultado sesgado a ubicaciones terrestres, da un recuento de frecuencias de trayectorias que posiblemente algunas no alcancen a tener efectos sobre zonas terrestres.

Por lo tanto, es necesario recalcular las distancias medias de radios de viento extrayendo solo aquellas trayectorias que alcancen las zonas terrestres. Esto también incluyó una extensión de la costa de 290 km mar adentro para asegurar que se incluyan las bandas espirales de los vientos del ciclón tropical sobre las zonas costeras y de 150 km en las zonas insulares. El uso de la extensión de 290 km es consistente con el enfoque según lo utilizado por Ho et al. (1987) y Schwerdt et al. (1979) para evaluar las características climatológicas de la descomposición tropical ciclones.

La aplicación de sistemas de información geográfica (SIG) es el marco para la organización de datos espaciales e información relacionada para el análisis y visualización de los ciclones tropicales. En la etapa de análisis se utiliza para hacer la selección trayectorias, dada su capacidad para representarlas gráficamente y la disponibilidad de una serie de herramientas de análisis, incluido el uso del buffer (se refiere a la construcción de un polígono que rodea un punto, línea o polígono a una distancia especificada). En la segunda etapa se usa para la generación de productos gráficos de orden espacial.

En la Figura 9, se presenta un ejemplo de buffer. Para la zona insular se tomó como epicentro la Isla de Roncador con un radio de influencia de 150 km, detectándose 59 ciclones para el periodo comprendido entre 1851 y 2016, con el subconjunto de datos HURDAT2. En cambio por la zona costera continental se tomó como epicentro el municipio de Riohacha - La Guajira variando el radio a 290 km por el cual transitaron 25 ciclones, para el mismo periodo.

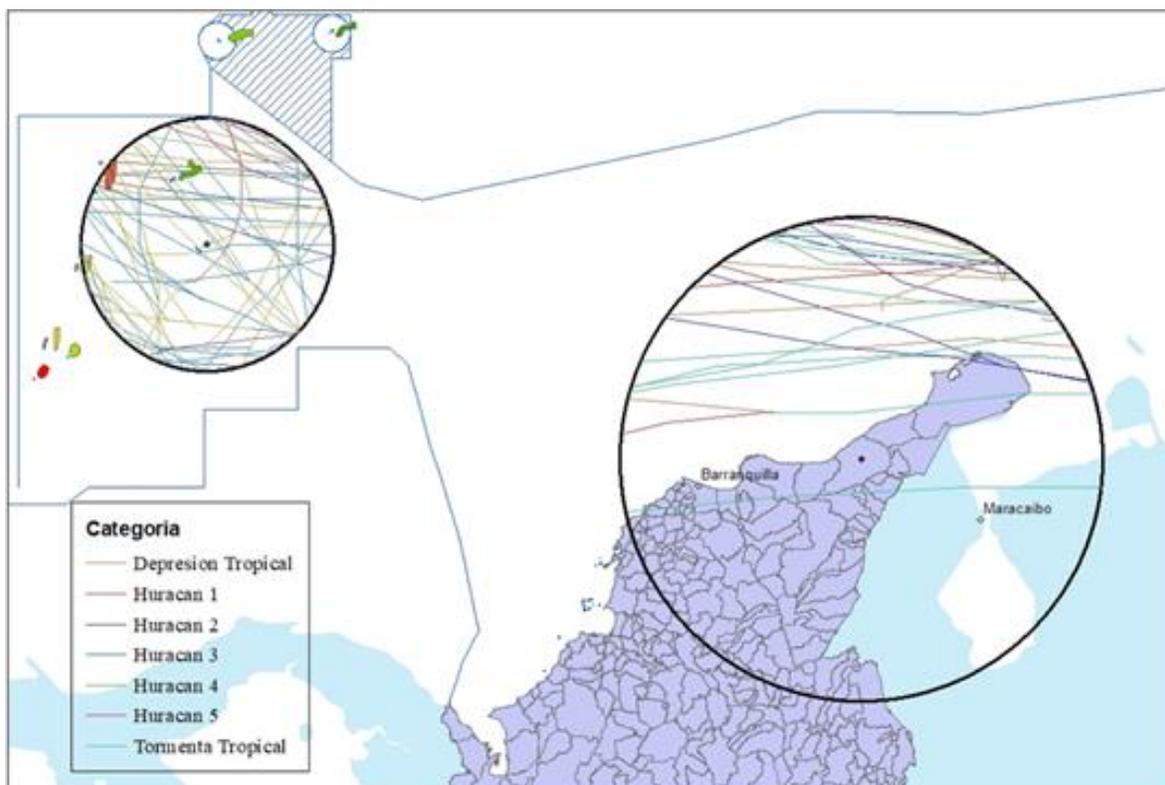


Figura 9: Trayectorias de sistemas ciclónicos entre 1851 a 2016, entre un buffer de 290 km con punto epicentrito el municipio de Ríohacha (zona continental) y buffer de 150 km con epicentro la Isla Roncador (zona insular). Elaboración Propia, según base de datos HURDAT2-IBTrACS

Modelo de viento

El modelo presentado aquí para calcular el campo de viento de los ciclones tropicales se basa en un modelo básico de viento/presión como el que se usa a menudo en los estudios de huracanes (Harper, 2002, Holland 2008).

$$v_m = a\Delta p^x \quad (1)$$

Donde a y x son constantes empíricas, v_m es la velocidad máxima del viento Figura 10, Δp es la caída de presión a partir de una presión externa definida hasta la presión central (p_n -

p_c). La mayoría de las técnicas con enfoques empíricos de presión-viento han ajustado los parámetros de la ecuación (1).

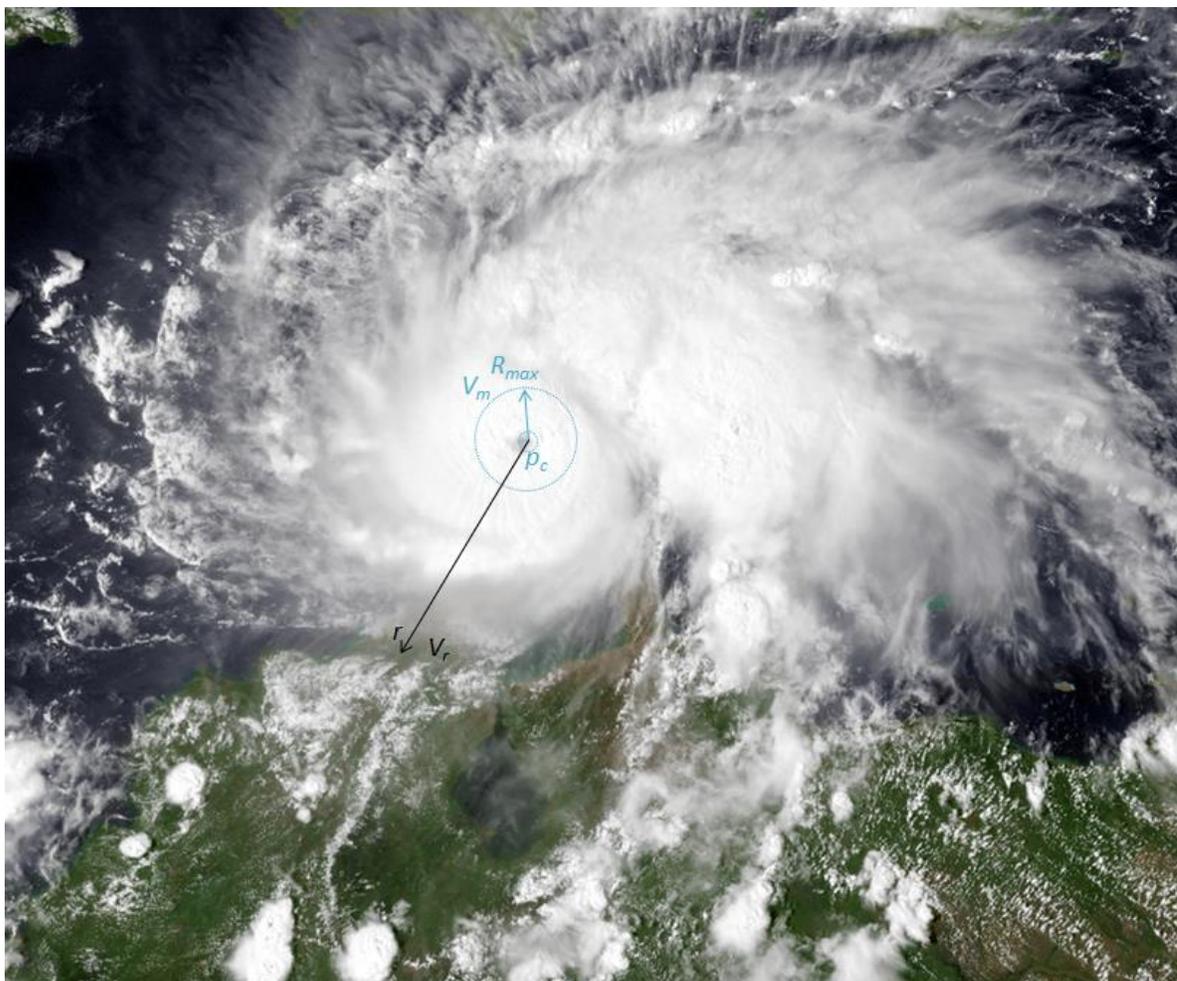


Figura 10: Variables del modelo de viento del ciclón tropical. Imagen satelital del Huracán Matthew del 30 de septiembre de 2016 a las 18:20 UTC. (Fuente: NASA SNPP/VIIRS)

El parámetro a es definido como una constante empírica, y x como un exponente empírico, notando que $x = 0.5$ representa el equilibrio ciclo trófico. La presión externa es definida como una constante de $p_n = 1010$ para el Atlántico Norte (Holland, 2008). El exponente x tiene a menudo un valor típico de aproximadamente 0.7 para los vientos promediados en un minuto a 10 m de altura (Blanchard, 2005)] y se calcula de la siguiente manera (Holland, 2008):

$$x = 0.6 \left(1 - \frac{\Delta p}{215} \right)_{(2)}$$

Aunque V_m está disponible a partir del conjunto de datos para cada huracán, V_m puede ser recalculado utilizando el modelo ajustado de viento a presión. Esto se hace para probar el rendimiento del modelo. El modelo toma la siguiente ecuación (Holland, 2008):

$$V_m = \left(\frac{b_s \Delta p}{\rho e} \right)^{0.5} \quad (3)$$

donde ρ es la densidad del aire, e es la base del logaritmo natural y b_s es una función de la latitud del ojo de huracán y el déficit de presión actual, calculado de la siguiente manera:

$$b_s = -4.4 * 10^{-5} \Delta p^2 + 0.01 \Delta p + 0.03 \frac{\delta p_c}{\delta t} - 0.014 \sigma + 0.15 v_i^x + 1.0 \quad (4)$$

donde p_c es la presión central observada y $\frac{\delta p_c}{\delta t}$, es el cambio de la intensidad con el tiempo (hPa h^{-1}).

Para describir la intensidad de la velocidad del viento y el tamaño del huracán, se calcula la velocidad del viento V_m (en la pared del ojo) y los radios de acción de los vientos máximos R_{max} (Holland, 2008, Harper, 2002, Wang Y, 2012). Para calcular el viento gradiente desde el centro de huracanes hasta la zona periférica de cada huracán, el diámetro del ojo del huracán (ED) se calcula de la siguiente manera:

$$ED = 46.29 \text{Exp}(-0.0153Z + 0.0166\sigma)_{(5)}$$

donde σ es el valor absoluto de la latitud y Z es la velocidad del viento observada. El diámetro del ojo se usa para calcular la velocidad radial del viento tangencial para R_{max} , V_r de la siguiente manera:

$$V_r = V_m \left(\frac{R_{max}}{r} \right)^x \quad (6)$$

donde r es la distancia y R_{\max} es el radio de velocidad máxima del viento calculado de la siguiente manera:

$$R_{\max} = \left(\frac{ED}{2}\right) + 8 \quad (7)$$

Probabilidad de presentación de ciclones tropicales

Para determinar cuál es la probabilidad de que un ciclón tropical afecte un lugar de Colombia durante la temporada ciclónica, se establece en primer lugar la cantidad de todos los eventos que han transitado en un radio de 290 km para zonas costeras e interiores, mientras que para las zonas insulares se toma un radio es de 150 km. La frecuencia de eventos es utilizada para el cálculo de probabilidad de ocurrencia de ciclones tropicales mediante la distribución de Poisson, método empleado por diferentes instituciones (USACE, 2002). En teoría de probabilidad y estadística, esta distribución de probabilidad discreta expresa la probabilidad de que ocurra un determinado número de eventos durante cierto período de tiempo, a partir de una frecuencia de ocurrencia media. En particular, se usa para obtener la probabilidad de ocurrencia de sucesos con probabilidades muy pequeñas, o sucesos "raros".

La función de masa o probabilidad de la distribución de Poisson está dada por

$$f(k, \lambda) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^k}{k!} \quad (8)$$

donde:

k es el número de ocurrencias del evento o fenómeno (la función nos da la probabilidad de que el evento suceda precisamente k veces).

λ es un parámetro positivo que representa el número de veces que se espera que ocurra el fenómeno durante un intervalo dado.

Para el cálculo de probabilidad de la ocurrencia de por lo menos un ciclón tropical al año, usando la ecuación (8), se calcula con base a los eventos del periodo 1851-2016.

Probabilidad y periodo de retorno de la intensidad de ciclones tropicales

Se realizan diferentes análisis estadísticos, para determinar la probabilidad y periodos de retorno de la intensidad de los ciclones tropicales, en especial se obtiene la estadística de la cantidad de excedencia anual clasificados por su intensidad (Fuentes Mariles, 2006).

A partir del número de eventos de intensidad i máxima alcanzada por un evento, para este caso es la velocidad máxima sostenida (VMS) como la media de un minuto a 10 metros de altura de cada categoría, se calcula la tasa de excedencia de intensidad $u(i)$, la cual registra todos los niveles de intensidad i excedidos durante un evento, es decir, si se llegó a un VMS de intensidad i (M_i), se registran los niveles de intensidad menores rebasados durante el mismo evento.

Para obtener la tasa de excedencia, se usa la siguiente expresión:

$$v(i) = \begin{cases} \sum_{j=0}^{N-i} (M_{N-j}) \\ 0 \text{ otro caso} \end{cases} \quad (9)$$

Donde N es nivel máximo de intensidad i que se puede alcanzar.

Los escenarios de amenaza de ciclones tropicales, para cada una de las 7 categorías se calcula considerando la densidad de probabilidades de las intensidades, $p(i)$, que puede obtenerse derivando $u(i)$ de derecha a izquierda y normalizando posteriormente:

$$p(i) = -k \frac{dv(i)}{di} \quad (10)$$

Donde la constante k es tal que $p(i)$ integra 1. Nótese que $du(i)/di$ es proporcional al número de eventos con intensidad igual a i o, más rigurosamente, con intensidad entre i e $i+di$.

De la expresión (9) resulta que:

$$\begin{aligned}
 p(i) &= -k \frac{dv(i)}{di} \\
 \int_{-\infty}^{\infty} p(i) di &= -k \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dv(i)}{di} di \\
 1 &= -k \int_i^{v_i} \frac{dv(i)}{di} di
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

En general, se tiene que:

$$k = \frac{1}{v(1)} \tag{12}$$

La función de peligro queda de la siguiente forma:

$$p(i) = - \frac{1}{v(1)} \frac{dv(i)}{di} \tag{13}$$

La probabilidad de que se presente un evento que exceda la intensidad i , sin que avance al siguiente nivel está dado por:

$$P(i) = - \frac{1}{v(1)} \int_i^{i+1} \frac{dv(i)}{di} \tag{14}$$

Para el cálculo de un solo índice de amenazas por ciclones tropicales se utiliza el IPTC (Jiménez, 2012) la siguiente expresión:

$$IPCT = \sum_{i=1}^7 v(i) * i \tag{15}$$

Donde, *IPCT* es el Índice de amenazas por ciclones tropicales, $v(i)$ es la Tasa de excedencia para la intensidad i . Con esta metodología se construye el mapa de amenaza por ciclones tropicales.

El periodo de retorno se define como el promedio de tiempo en que vuelve a ocurrir la excedencia de cierta intensidad i . Se obtiene este promedio a través del cálculo del recíproco de la tasa de excedencia, entonces:

$$Tr(i) = \frac{1}{v(i)} \quad (16)$$

Mapas de amenaza por ciclones tropicales

Se calculan de manera independiente los mapas de amenaza por frecuencia de trayectorias de ciclones tropicales y por intensidad de vientos para depresiones tropicales, tormentas tropicales y huracanes según las categorías estimadas.

Dada la importancia geoestratégica de la zona insular del Caribe colombiano y en consideración a la población que allí habita y los diversos elementos expuestos en sus islas y cayos, se tomarán como unidades de análisis las islas de San Andrés y Providencia y los cayos de Serranilla, Serrana, Roncador, Quitasueño, Cayo Bajo Nuevo, Albuquerque y Sureste. Para la zona continental la unidad de análisis será la escala municipal, tomando aquellos municipios costeros y de zonas interiores, aproximadamente hasta una latitud de 8°N, debido al radio de influencia de 290 km, utilizado para el análisis de estas zonas y teniendo en cuenta la trayectoria más meridional ocurrida, correspondiente a la tormenta tropical Bret, de agosto de 1993, que transitó cerca de los 11°N.

BIBLIOGRAFÍA

- Blanchard, B. H. (2005). On the radial variation of the tangential wind speed outside the radius of maximum wind during hurricane Wilma (2005). *Louisiana: Coastal Studies Institute, Louisiana State University. 1–11.*
- Darling, R. (1991). Estimating probabilities of hurricane wind speeds using a large-scale empirical model. *J. Climate, 4*, 1035-1046.
- DeMaria, M. e. (2009). A new method for estimating tropical cyclone wind speed probabilities. . *Wea. Forecasting, 1573–1591.*
- Emanuel, K. (1988). The maximum intensity of hurricanes. *J. Atmos. Sci., 45*, 1143–1155.
- Emanuel, K. (2003). Tropical cyclones. *Annu.Rev. Earth Planet. Sci., 31*:75-104.
- ERN. (2018). *Metodología de modelación probabilista de riesgos naturales. Informe técnico ERN-CAPRA-T1-1 Componentes principales del análisis de riesgo.*
- Fuentes Mariles, Ó. A. (2006). *Elaboración de mapas de riesgo por inundaciones costeras por marea de tormenta [Book Section] // Guía básica para la elaboración de atlas estatales y municipales de peligros y riesgos. Fenómenos hidrometeorológicos.[s.l.] : CENAPRED - Primera edición.*
- Hagen, A. B. (2012). A reanalysis of the 1944–53 Atlantic hurricane seasons—The first decade of aircraft reconnaissance. *J. Climate, 25*, 4441–4460.
- Harper, B. (2002). *Estimación de parámetros de ciclones tropicales en la región australiana: relaciones viento-presión y cuestiones relacionadas para la planificación y el diseño de ingeniería. Bridgeman Downs, Australia: Systems Engineering Australia Pty Lt.*
- Ho, F. P. (1987). *Hurricane climatology for the Atlantic and Gulf Coasts of the United States. NOAA Tech. Rep. NWS 38, U.S. Department of Commerce, Washington, DC, 195 pp.*
- Holland, G. (1980). An analytic model of the wind and pressure profiles in hurricanes. *Mon. Wea. Rev., 108*, 1212-1218.

- Holland, G. (2008). A Revised Hurricane Pressure-Wind Model. *Mon Wea Rev* 136, 3432–3445.
- HRD. (2004). *Tropical Cyclone FAQ - NOAA/AOML*.
- Jagger, T. e. (2001). A dynamic probability model of hurricane winds in coastal counties of the united states. . *J. Appl. Meteor.*, 40, 853-863.
- Jarvinen, B. R. (1984). A tropical cyclone data tape for the North Atlantic Basin, 1886–1983: Contents, limitations, and uses. *NOAA Tech. Memo. NWS NHC 22, Coral Gables, FL.* , 24.
- Jiménez, M. e. (2012). *Mapas de índices de riesgo a escala municipal por fenómenos hidrometeorológicos. CENAPRED*.
- Katz, R. W. (2002). Stochastic modeling of hurricane damage. *J. Appl. Meteor.*, 41(7), 754-762.
- Knapp, K. R. (2010). The International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS): Unifying tropical cyclone data. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 91, 363–376.
- Kruk, M. C. (2010). A technique for merging global tropical cyclone best track data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 27, 680-692.
- Laing, A. J. (2016). *Introducción a la Meteorología Tropical. Versión 4.0*. The COMET Program and National Center for Atmospheric Research.
- Landsea, C. W. (2013). Atlantic hurricane database uncertainty and presentation of a new database format. *Mon. Wea. Rev.*, 141, 3576-3592.
- León, G. (2007). *Ciclones tropicales en Colombia y tendencia de la frecuencia durante el último siglo. IDEAM–METEO/005-07*.
- Levinson, D. H. (2010). Toward a homogenous global tropical cyclone best track dataset. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91 , 377-380.
- Marks, D. (1992). "The beta and advection model for hurricane track forecasting" . *NOAA Tech. Memo. NWS NMC 70, Natl. Meteorological Center; Camp Springs, Maryland,* , 89.

- Meehl, G. e. (2007). *Global Climate Projections, in Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Murnane, R. e. (2000). Model Estimates Hurricane Wind Speed Probabilities. *Eos, Transactions, American Geophysical Union. Vol. 81, No. 38,, Pages 433-438*.
- Neumann, C. (1972). An alternate to the hurran (hurrican analog) tropical cyclone forecast system. *NOAA Tech. Memo., NWS SR-62, 22*.
- Neumann, C. (1987). The national hurricane center risk analysis program (hurisk) (reprinted with corrections 1991. *NOAA Tech. Memo., NWS NHC-38, 57*.
- NHC. (2017). *Tropical ciclone report. Hurricane Matthew (AL142016)*.
- NHC. (2018). *Tropical ciclone report. Hurricane Harvey (AL092017)*.
- Powell, M. a. (1996). "Hurricane Andrew's wind field at landfall in South Florida. Part II: Applications to real -time analysis and preliminary damage assessment". *Wea. Forecasting, 11, pp.329-349*.
- Powell, M. e. (2009). Estimating maximum surface winds from hurricane reconnaissance measurements. *Weather and Forecasting, 24, 868–882*.
- Schwerdt, R. W. (1979). *Metorological criteria for standard project hurricane and probable maximum hurricane wind fields, Gulf and East Coasts of the United States. NOAA Tech. Rep. NWS 23, U.S. Department of Commerce, Washington, DC, 317 pp*.
- UNGRD. (2016). *Caracterización Escenario – Ciclones Tropicales*.
- USACE. (2002). *Coastal Engineering Manual (CEM)*. Washington: U. S. Army Corps of Engineers.
- Vickery, P. J. (2000). Simulation of hurricane risk in the united states using an empirical storm track modeling technique. *Journal of structural engineering, 126, 1222-1237*.
- Vivant, E. (2003). Statistical hurricane tracks simulation methods as applied to the atlantic hurricane database. *Master's thesis, MIT. Rapport de stage de fin de scolarite a l'Ecole Polytechnique*.

Wang Y, R. D. (2012). Joint distribution model for prediction of hurricane wind speed and size. *Struct Saf* 35, 40–51.

Wang, C. &. (1998). Modeling return periods of tropical cyclones intensities in the vicinity of hawaii. *J. Appl. Meteor.*, 37, 951-960.

WMO. (2017). *Global Guide to Tropical Cyclone Forecasting*. WMO-No. 1194. Geneva, Switzerland.



UNIDAD NACIONAL PARA LA GESTIÓN DE RIESGO DE DESASTRES

Avenida calle 26 # 92 + 32, piso 2 – Edificio Gold 4

PBX: + 57(1) 552 9696 – 01 8000 11 32 00

www.gestiondelriesgo.gov.co