



Universidad de Valladolid

FACULTAD DE CIENCIAS

GRADO EN FÍSICA

Trabajo de Fin de Grado

ANÁLISIS DE UN CICLÓN TROPICAL

Autor:

Pablo Martínez Latorre

Dirigido por:

Isidro A. Pérez

M^a Luisa Sánchez

Agradecimientos

A mis tutores por toda la ayuda recibida en la realización de este trabajo de fin de grado y a todas aquellas personas que me han apoyado durante el estudio del grado en Física.



Contents

Agradecimientos	I
Resumen	III
Introducción	1
1 Descripción Teórica	5
1.1 Análisis de la velocidad del viento	5
1.2 Parámetros estadísticos	6
1.3 Distribución de Laplace	8
1.4 Análisis de trayectorias	9
1.4.1 Modelo Cinemático	9
1.4.2 Factor de recirculación	10
2 Descripción Experimental	12
2.1 Descripción de la base de datos	12
2.2 Análisis de la base de datos	14
2.3 Proceso de selección del huracán	16
3 Análisis de la velocidad del viento	19
3.1 Mapa de trayectoria	19
3.2 Evolución temporal de los parámetros estadísticos	22
3.3 Distribución de Laplace	27
3.4 Superficies	29
3.4.1 Mapa de velocidades	29
3.4.2 Análisis de la velocidad en las superficies	32
4 Análisis de trayectorias	36
4.1 Recirculación centro del huracán	36
4.2 Recirculación a dos grados de latitud al sur del centro	42
Conclusiones	47
Bibliografía	48
Índice de Figuras	52

Resumen

Este estudio está centrado en la base de datos de huracanes del proyecto *H*Wind* de la NOAA. Esta base de datos comprende más de 200 huracanes observados desde 1993 hasta 2013. La mayor parte corresponden a la cuenca atlántica, aunque las cuencas del este y oeste del Pacífico también están presentes. En este periodo destacan los años 2004, 2005 y 2006, ya que el número de ficheros por huracán estuvo en 15 y 20 por año. Se analizó en más detalle el huracán Sandy debido a su impacto social, relevancia y número de ficheros disponibles.

Se calcularon distintos parámetros estadísticos. Este huracán se formó en el mar Caribe el 23 de octubre de 2012 y se movió paralelo a la costa americana, que alcanzó el 30 de octubre. La velocidad de viento mostró una transición abrupta el 25 de octubre y durante mucho tiempo su categoría fue 1.

Los estimadores robustos de dispersión y simetría presentaron cierta tendencia, positiva para el rango intercuartílico y negativa para el índice de Yule-Kendall, que mostró una tendencia a la simetría de la distribución de la velocidad del viento. La distribución de Laplace se usó con éxito para describir los campos de velocidad del viento. Asumiendo una forma circular, el radio del huracán para velocidades del viento superiores a las de una tormenta tropical creció linealmente desde 82 hasta 616 km.

Por último, se calculó el factor de recirculación en toda la troposfera revelando una capa casi uniforme por debajo de 1000 m. Además, las trayectorias del aire parecen espirales a 10 m. Sin embargo, son bucles a alturas mayores, debido a la composición de movimientos de traslación y rotación.

Abstract

This study is focused on the hurricane database of the *H*Wind* project, which was sponsored by the NOAA. The number of hurricanes comprised by this database exceeds 200 observed from 1993 to 2013. Most of them correspond to the Atlantic basin, although the East and West Pacific basins are also present. In this period, years 2004, 2005 and 2006 highlight, since the number of files per hurricane was between 15 and 20 each year. The hurricane Sandy was analysed with more detail due to its social impact, relevance, and number of files available.

Varied statistics were calculated. This hurricane was formed on the Caribbean Sea on the 23th October 2012 and moved north parallel to the American coast, which was reached on the 30th October. Wind speed showed a sharp transition on the 25th October and much of the time its category was 1.

Robust estimators of spread and symmetry presented some trend, positive for the interquartile range, revealing increasing spread, and negative for the Yule-Kendall index, the wind speed distribution showing tendency to symmetry. The Laplace distribution was successfully used to describe the wind speed fields. Assuming a circular shape, the hurricane radius for wind speeds higher than those of a tropical storm increased linearly from 82 to 616 km.

Finally, the recirculation factor was calculated in the whole troposphere revealing a nearly uniform layer below 1000 m. Moreover, air parcel trajectories look like spirals at 10 m. However, they are loops at greater heights, due to the composition of translation and rotation movements.

Introducción

Los ciclones tropicales hacen referencia a fenómenos meteorológicos que destacan en latitudes bajas, caracterizados por fuertes vientos que pueden llegar a alcanzar velocidades de más de 250 km/h y bajas presiones atmosféricas. Las consecuencias de un huracán para los seres humanos pueden llegar a ser desastrosas ya que a su paso por tierra provocan fuertes destrozos por sus vientos, así como inundaciones y corrimientos de tierra por las numerosas lluvias. Incluso aquellos huracanes de categoría baja pueden llegar a ocasionar numerosas pérdidas materiales y humanas a su paso, sobre todo en aquellos casos que afectan a zonas pobres y muy pobladas.

Los términos “ciclón tropical”, “tifón” o “huracán” se corresponden con diferencias geográficas, pero no con sus principios físicos. La palabra huracán es de origen taíno, un pueblo precolombino de las islas del Caribe, y significa “centro del viento”. Corresponde, por tanto, a ciclones tropicales en el océano Atlántico y en el noreste del océano Pacífico. En cuanto a la palabra ciclón, Henry Piddington la propuso en 1848 a partir de la palabra griega kukloma que significa serpiente en espiral. La palabra tifón tiene un origen más incierto, ya que parece que proviene de palabras empleadas en dialectos chinos para designar a un viento fuerte. Se utiliza para un ciclón tropical en el noroeste del océano Pacífico.

Los huracanes se forman debido a las aguas cálidas de las zonas tropicales que generan sistemas de bajas presiones y ondas tropicales. Estas ondas tropicales pueden llegar a intensificarse a su paso por las aguas cálidas si se dan las características apropiadas, produciendo vientos direccionales en torno a un ojo o centro del huracán. Estos vientos tienen una rotación en el sentido contrario al de las agujas del reloj en el hemisferio norte y en el sentido de las agujas del reloj en el hemisferio sur. Una vez tocan tierra, los ciclones tropicales pierden fuerza hasta acabar desapareciendo o, en algunos casos, volver a aguas cálidas e intensificarse de nuevo. Su diámetro es de unos cientos de kilómetros y, aunque pueden moverse en cualquier dirección, suelen hacerlo en principio hacia el oeste y el polo para, después, seguir hacia el polo y hacia el este [1]. Cuando el viento es de 62 km/h se denomina depresión tropical, si está comprendido entre 63 y 117 km/h es una tormenta tropical y cuando supera los 118 km/h se está ante un huracán.

En el Atlántico norte y en el océano Pacífico se producen entre junio y octubre; en el norte del océano Índico en abril, mayo, noviembre y diciembre; en el sur del océano Índico en diciembre y enero, y en el sur del Pacífico al este de Australia en noviembre, diciembre y enero, que son los meses de verano en el hemisferio sur. En su origen, parece que, necesariamente, debe haber temperaturas superficiales superiores a 27°C, una débil cizalla vertical de los vientos horizontales y algo de humedad en la troposfera media [2].

Los huracanes han adquirido recientemente gran notoriedad debido a la alta penetración en la sociedad a través de los medios de difusión de noticias. Sin embargo, existen registros de

su presencia en el pasado. Así, en el Archivo General de Indias se recogen datos de huracanes y tormentas en el Caribe entre los siglos dieciséis y diecinueve [3]. El hecho de que se estén investigando los huracanes ocurridos antes de disponer de mediciones precisas ha sugerido la conveniencia de introducir una clasificación objetiva de su intensidad [4].

La escala de Saffir-Simpson se utiliza típicamente para clasificar los huracanes y, a diferencia de la escala de Richter de los terremotos, está cuantificada [5]. En ella, cada categoría de huracán tiene un intervalo de presión, velocidad máxima y marea. Por lo que un pequeño cambio de estas variables puede implicar la alteración de la categoría del huracán. Este hecho puede entorpecer la toma de decisiones. En concreto, esta escala empezó a cuestionarse con el huracán Katrina, en 2005, clasificado como SS5 antes de llegar a tierra, pero como SS3 cuando alcanzó tierra. Con este dato, algunas personas consideraron que el riesgo de este huracán era similar o incluso inferior al del huracán Camille, que afectó a la zona en 1969 y fue clasificado como SS5. Sin embargo, los vientos de Katrina fueron mucho más fuertes que los de Camille.

Kantha [6][7] propuso una nueva escala basada en distintos índices: los de intensidad, riesgo y marea del huracán. Jordan II y Clayson [8] la han analizado y han concluido que ese índice de marea proporciona información destacada a la escala de Saffir-Simpson. Por otra parte, Powell y Reinhold [9] han considerado un indicador del potencial destructivo. Este trabajo ha sido comentado tanto por Kantha [6], quien insiste en su propia escala, como por Simpson y Saffir [10], quienes han argumentado que la escala de Powell y Reinhold puede ser útil en análisis posteriores de la distribución de viento del huracán. Asimismo, han insistido en que la escala inicial considera la presión central del huracán, que es una magnitud importante desde los puntos de vista termodinámico y dinámico, que cualquier nueva escala debería mantener para no “tirar al bebé con el agua del baño”. En cualquier caso el tema sigue abierto ante la evidencia de que la escala de Saffir-Simpson puede no ser consistente con el verdadero potencial destructivo de los huracanes, ya que dicha escala no considera la lluvia, cuya importancia es notable a la hora de evaluar los daños, por lo que Rezapour y Baldock [11] han propuesto un índice de riesgo que considera tanto el viento, como la lluvia torrencial y la marea estimada en tierra. Por último, puesto que la escala Saffir-Simpson es una de las diversas escalas basadas en la velocidad del viento, como lo son la Fujita, TORRO o Beaufort; Dotzek [12] ha sugerido una escala aplicable a vientos de cualquier intensidad.

Aunque el origen y desarrollo de los ciclones tropicales tiene lugar en el océano, sus efectos adversos se perciben cuando alcanzan el continente, lo que hace de las costas unos lugares especialmente sensibles a estos fenómenos [13]. Asimismo, el intenso impacto de los huracanes sobre los árboles ha hecho necesario el análisis de su influencia en los ecosistemas forestales [14]. Sin embargo, no todos los efectos del paso de un huracán tienen por qué ser negativos: por ejemplo, el paso del huracán Sandy no produjo efectos aparentes en la comunidad bentónica del fondo de la bahía de Barnegat, en Nueva Jersey, porque no se observaron cambios en la salinidad ni en la concentración del oxígeno disuelto [15]. Asimismo, tampoco se observaron efectos notables en los pantanos salados tanto de la bahía de Barnegat como del estuario de Delaware [16]. En cuanto a la incidencia de los huracanes en la migración de la población, un estudio reciente indica que su impacto es heterogéneo [17].

El análisis de los más destructivos huracanes de los últimos años ha llevado a pensar que el tamaño de los huracanes, que pueden alcanzar una expansión horizontal de más de 8 grados de latitud, unos 888 km, es importante, no solo su intensidad [18]. Un conocimiento preciso de la estructura del ciclón puede ser útil a la hora de saber la intensidad y distribución de los

procesos meteorológicos asociados. Moyer et al. [19] han analizado los radios de las tormentas por distintos procedimientos. Pese a su aparente estructura uniforme, un análisis detallado revela asimetría en la velocidad del viento [20][21]. Demaria et al. [22] proporcionaron unas expresiones en coordenadas polares para la velocidad de viento en función de los valores de la velocidad máxima, su distancia al centro, un factor de asimetría, un parámetro del tamaño del ciclón y una constante angular. En cuanto a los perfiles verticales del viento, Song et al. [23] los han estudiado en tifones de la costa del sur de China y han observado una desviación de la ley potencial en el perfil del viento fuerte.

Por lo que respecta al ojo del huracán, puede llegar a tener un tamaño de hasta 200 km de radio. La zona correspondiente al centro del huracán es más cálida que el resto de su superficie debido al calor latente de vaporización que asciende verticalmente en torno al ojo, en las denominadas paredes del ojo, y que provoca la condensación del vapor de agua en las denominadas bandas lluviosas. Esto se produce al llegar los vientos a las capas altas del huracán y alejarse de la zona central, empujando el aire frío fuera de estas baldas. Esta condensación provoca enormes nubes que pueden alcanzar una altitud de 15000 metros sobre el nivel del mar. Por norma general, la zona correspondiente al ojo del huracán se encuentra libre de nubes, y presenta las temperaturas mínimas del huracán en superficie y máximas en altura. Sin embargo, no todos los ciclones tropicales forman ojos. Se ha observado en el 60 % de los ciclones tropicales atlánticos y, además, se ha establecido una ventana temporal de unas 36 h en la que el ciclón puede formar un ojo [24]. El radio del ojo es importante porque permite estimar el radio del viento máximo en superficie en función del radio del ojo [25].

Las últimas investigaciones apuntan a una mejor comprensión de la relación entre el cambio climático y los ciclones tropicales. Aunque los modelos predicen un descenso del número global de ciclones tropicales en el futuro, también muestran aumentos de las intensidades de las tormentas más fuertes [26][27].

En cuanto a la península Ibérica, su ubicación la aleja del alcance de los huracanes. Sin embargo, sí se ha descrito algún caso aislado. Como por ejemplo el huracán Gordon, en agosto de 2012, cuyo origen se situó aproximadamente a los 55° W de longitud y 30° N de latitud, casi en medio del océano Atlántico, pero que evolucionó dirigiéndose hacia el este y ascendiendo de latitud hasta convertirse en una tormenta extratropical que llegó a aproximarse a la península Ibérica [28]. Además, también se han observado ciclones similares a los tropicales, pero en el Mediterráneo, son los “medicanos”, cuya detección es difícil [29][30]. Aunque son infrecuentes, sus efectos pueden ser tan devastadores como los de los ciclones tropicales [31]. Su actividad destaca principalmente en otoño e invierno, aunque también pueden observarse en primavera y son mínimos en verano [32][33].

El presente trabajo se ha dividido en cuatro capítulos, el primero de ellos dedicado a la parte teórica del estudio y los otros tres a la parte del análisis de resultados.

El primer capítulo es una descripción teórica en la que se introducen aquellos conceptos que van a ser tratados en los posteriores capítulos: los indicadores de posición, dispersión, simetría y aplanamiento, la distribución de Laplace y sus parámetros, el modelo cinético del movimiento de las parcelas de aire y el factor de recirculación.

El segundo se estudia la base de datos de huracanes de la NOAA, presentando un análisis del número de huracanes por año y cuenca, así como el número de ficheros disponibles en cada huracán para realizar un estudio detallado. Del total de la base de datos, se seleccionan aquellos

con suficientes archivos disponibles para poder realizar un estudio detallado y se procede a buscar cuál de todos ellos ha tenido una mayor relevancia.

Una vez seleccionado un huracán, en el tercer capítulo se realiza un análisis estadístico detallado de su velocidad del viento y de la trayectoria que recorrió su centro, mostrando la categoría que tuvo el huracán en cada momento y la superficie sobre la que transcurrió.

Por último, en el cuarto capítulo se estudia el factor de recirculación en el centro del huracán y a dos grados de latitud a diferentes alturas sobre el nivel del mar comprendidas entre 10 y 10000 m con el propósito de contrastar las trayectorias del aire que llega a dos puntos relativamente próximos.

Capítulo 1

Descripción Teórica

1.1 Análisis de la velocidad del viento

La **escala de huracanes de Saffir-Simpson** [10] es una escala que clasifica los huracanes en cinco tipos en función de la velocidad máxima de su viento. Fue desarrollada en 1969 por el ingeniero civil Hervert Saffir y el director del Centro Nacional de Huracanes de Estados Unidos Robert Simpson. Saffir desarrolló esta escala para clasificar los huracanes en función de los vientos, a semejanza de lo que se hacía con la escala Richter y los terremotos. Posteriormente, fue Simpson el que añadió otros parámetros como la marea y la presión. A esta escala de cinco niveles se le añaden dos más para clasificar los ciclones tropicales en su fase de formación: depresión tropical y tormenta tropical. Los datos correspondientes a estos siete niveles se muestran en el cuadro (1.1).

Categoría	Velocidad del viento		Marea (m)	Presión central (hPa)
	(m/s)	(km/h)		
DT	0-17	0-62	0	>980
TT	18-32	63-117	0-3	>980
1	33-42	119-153	1,2-1,5	980-994
2	43-49	154-177	1,8-2,4	965-979
3	50-58	178-209	2,7-3,7	945-964
4	59-69	210-249	4,0-5,5	920-944
5	≥ 70	≥ 250	$\geq 5,5$	<920

Cuadro 1.1: Escala de huracanes Saffir-Simpson

La categoría de un huracán definida por esta escala no tiene por qué estar directamente relacionada con los daños que provoca, ya que intervienen otros factores como las zonas de población a las que afecte, la preparación de esas zonas a los huracanes e inundaciones o la velocidad a la que se desplaza el huracán.

1.2 Parámetros estadísticos

En esta sección se va a proceder a explicar el significado de cada uno de los parámetros estadísticos empleados en nuestro estudio de un huracán. Hay cuatro tipos de parámetros en función del tipo de información que nos proporcionan.

Indicadores de posición

Los indicadores de posición nos facilitan información sobre la serie de datos que estamos analizando, proporcionándonos la ubicación de éstos dentro de un contexto de valores posibles.

- **Media:** la media aritmética de un conjunto de números finitos representa el promedio de todos los valores y se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1.1)$$

- **Cuartiles:** son los tres valores que dividen una serie de datos ordenados en cuatro partes iguales. Se les denomina respectivamente $q_{0,25}$, $q_{0,5}$, $q_{0,75}$.
- **Mediana:** representa el valor de la variable que ocupa la posición central de una serie de datos ordenados. La mediana es equivalente al segundo cuartil. En el caso de que la serie de datos tenga un número total par, la mediana representa el valor medio de los dos datos que ocupan la posición central.
- **Percentil:** son los 99 valores que dividen la serie de datos en 100 partes iguales.

Indicadores de dispersión

Los indicadores de dispersión son los parámetros estadísticos que determinan cuán cercanos o lejanos están los datos de un valor central, respecto a la media aritmética. También determinan el grado de variabilidad de los datos.

- **Desviación estándar:** o desviación típica se define como la raíz cuadrada de la varianza de la variable y representa el grado de dispersión de los datos con respecto al valor promedio. Matemáticamente se representa de la siguiente forma:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1.2)$$

- **Rango Intercuartílico:** es la diferencia entre el primer y el tercer cuartil. Es equivalente a la desviación estándar, pero siendo éste una medida más robusta ante la dispersión de los datos.

$$RIC = q_{0,75} - q_{0,25} \quad (1.3)$$

Indicadores de simetría

Los indicadores de simetría indican si los valores de una serie de datos se disponen simétricamente alrededor de la media o si bien lo hacen de forma asimétrica hacia los extremos sin necesidad de realizar una representación gráfica de los mismos.

- **Sesgo:** es una medida de la asimetría de una distribución de datos calculado mediante la siguiente expresión:

$$\gamma = \frac{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{s^3} \quad (1.4)$$

Es adimensional y su valor es cero en distribuciones normales, menor que cero si es asimétrica hacia la izquierda y mayor si la asimetría es hacia la derecha; como se puede ver en la figura (1.1).

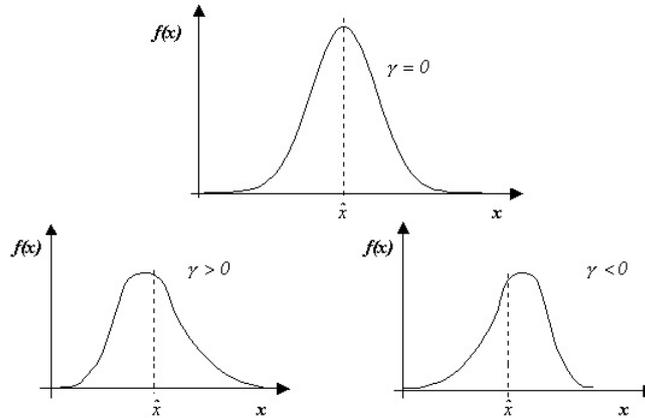


Figura 1.1: Sesgo de una distribución de datos.

- **Índice de Yule-Kendall:** este índice es similar al sesgo, pero siendo una variable robusta con un rango comprendido entre -1 y +1.

$$\gamma_{YK} = \frac{q_{0,25} - 2q_{0,5} + q_{0,75}}{RIC} \quad (1.5)$$

Indicadores de aplanamiento

Los indicadores de aplanamiento son una medida del grado de concentración que presentan los valores de una distribución numérica en torno a la zona central.

- **Curtosis:** la curtosis, que es un coeficiente que indica la cantidad de datos que hay cercanos a la media, de manera que a mayor curtosis, más escarpada será la forma de la curva, y a menor curtosis será más aplanada.

$$C = \frac{n(n+1) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{(n-1)(n-2)(n-3)s^4} - \frac{3(n-1)^2}{(n-2)(n-3)} \quad (1.6)$$

Podemos ver cómo afecta el valor de la curtosis a una distribución de datos en la figura (1.2).

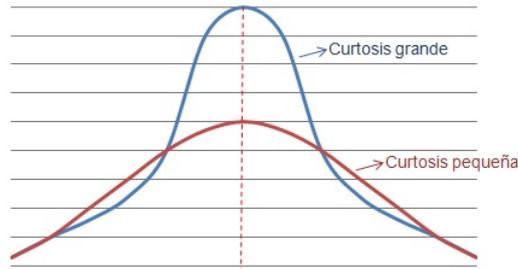


Figura 1.2: Curtosis de una distribución de datos.

- **Curtosis robusta:** es similar a la curtosis, pero en forma de indicador robusto. Su fórmula viene dada por (1.7), donde $dz_{0,9}$ y $dz_{0,1}$ son el noveno y el primer decil respectivamente.

$$C_R = \frac{q_{0,75} - q_{0,25}}{2(dz_{0,9} - dz_{0,1})} \quad (1.7)$$

Ambas medidas son adimensionales.

1.3 Distribución de Laplace

La distribución de Laplace, o distribución de doble exponencial, es una densidad de probabilidad continua determinada por dos parámetros, uno de situación (μ) y otro de escala (b). Esta función de densidad es simétrica, y su parámetro de situación determina el eje de simetría, ya que es el punto donde la función alcanza su punto máximo en forma de pico afilado. Una peculiaridad de esta distribución es que independientemente del valor de los parámetros, su función de densidad es más apuntada que la función de densidad de la distribución normal. Esta distribución tiene la siguiente expresión matemática [34]:

$$f(x, \mu, b) = \frac{1}{2b} \exp\left(-\frac{|x - \mu|}{b}\right) \quad (1.8)$$

donde:

$$\begin{cases} \mu = \text{mediana} \\ b = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n |x_i - \mu| \end{cases} \quad (1.9)$$

Un ejemplo de esta distribución para distintos valores de los dos parámetros lo podemos encontrar en la figura (1.3).

En nuestro caso, la variable empleada será la velocidad escalar del viento dada por $\sqrt{u^2 + v^2}$, donde u y v son las componentes zonal y meridiana del viento respectivamente.

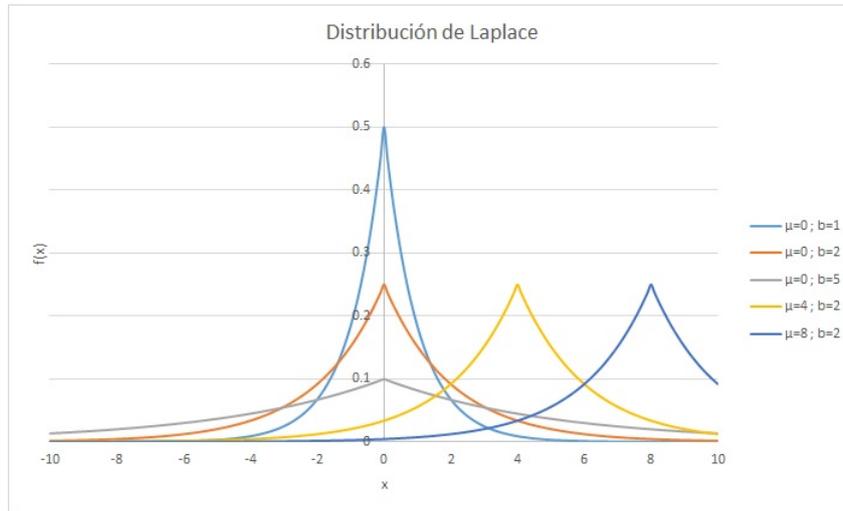


Figura 1.3: Distribución de Laplace para cinco combinaciones de valores de μ y b .

1.4 Análisis de trayectorias

Para el cálculo de las trayectorias del aire de los vientos del huracán se han utilizado los datos proporcionados por *Centre for Global Environmental Research* (CGER) mediante su aplicación de exploración de datos meteorológicos (METEX) [35]. Desde esta aplicación se obtiene la trayectoria que ha realizado el aire para ir de un punto a otro, así como la altura sobre el nivel del mar y la fecha y hora en la que estuvo en ese punto. Antes de describir teóricamente la recirculación, es necesario explicar el modelo seguido desde esta aplicación en el cálculo de las trayectorias de parcelas de aire.

1.4.1 Modelo Cinemático

El modelo utilizado por METEX es el método de Petterssen para el cálculo del movimiento de una parcela de aire de una posición $L(t)$ a otra $L(t + \Delta t)$ haciendo la siguiente estimación:

$$L'(t + \Delta t) = L(t) + \Gamma(L, t) \cdot \Delta t \quad (1.10)$$

donde $\Gamma(L, t)$ es el vector de velocidad, y por tanto:

$$L(t + \Delta t) = L(t) + \frac{1}{2} \cdot \Delta t \cdot (\Gamma(L, t) + \Gamma(L', t + \Delta t)) \quad (1.11)$$

Δt se calculará teniendo en cuenta la velocidad horizontal del viento:

$$\Delta t = \frac{\Delta D}{CFL \cdot \sqrt{u^2 + v^2}} \quad (1.12)$$

donde ΔD es la distancia entre dos cuadrículas laterales adyacentes y CFL es el número de Courant-Friedrich-Levy que se define como el cociente entre el intervalo de tiempo y el tiempo de residencia de un volumen finito aplicado a la resolución de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales.

Los datos meteorológicos discretos se interpolan en el espacio y el tiempo para los cálculos. La interpolación espacial dependerá de los supuestos del modelo que se utilice, en nuestro caso

el modelo cinemático, el cual asume que la trayectoria de una parcela de aire es dominada por las componentes u y v de la velocidad del viento y por la velocidad de presión vertical ω , que se define como la tasa de cambio de la presión con el tiempo.

En la interpolación espacial, una variable se interpola primero a lo largo de las cuadrículas verticales hasta la posición vertical especificada, que se representa mediante la altura geopotencial, la presión o cualquier coordenada híbrida; y luego se interpola lateralmente a una latitud y longitud especificadas. La hipótesis de la interpolación vertical es que las variables varían linealmente con la altura, y la suposición para la interpolación lateral es que las variables varían linealmente con la latitud y la longitud.

1.4.2 Factor de recirculación

El factor de recirculación es una medida de cuánto se desvía la trayectoria del aire entre dos puntos en comparación con la trayectoria mínima entre esos dos puntos. Se puede ver cómo influye este factor en la trayectoria en la figura (1.4).

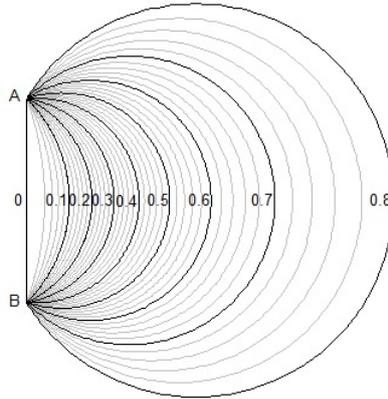


Figura 1.4: Factor de recirculación.

Matemáticamente, la expresión de este factor es [37]:

$$R = 1 - \frac{L}{S} \quad (1.13)$$

con $(0 \leq R \leq 1)$. En esta expresión anterior faltaría definir L y S . L es la distancia de transporte, si tomamos como referencia la figura (1.4), sería la distancia mínima que une los puntos A y B , mientras que S es la distancia total recorrida por el aire entre esos dos mismos puntos. Cuando R es cero, no se produce recirculación alguna, mientras que cuando toma un valor de 1 se produce una recirculación completa, es decir, la parcela de aire considerada vuelve a su origen. El valor de S es una medida de la inactividad del aire ya que un valor suyo igual a 0 representa que no hay viento, y por lo tanto, tampoco transporte.

Para los cálculos a realizar del factor de recirculación, tomamos datos de las trayectorias del aire durante las 24 horas anteriores a llegar a un punto. En la figura (1.5) se muestra un ejemplo. En ella, el aire en el punto B , de longitud λ_1 y latitud ϕ_1 se aproxima al punto $A(\lambda_0, \phi_0)$. El cálculo del factor de recirculación se realizará con la Ec. (1.13) donde S es la suma de las distancias S_i recorridas en intervalos de una hora. Tanto L como S_i son arcos sobre la

superficie de la Tierra que se calculan mediante la ecuación de Sinnott [36] que, para los puntos A y B viene dada como:

$$\sin(L/2) = \sqrt{\sin^2((\phi_1 - \phi_0)/2) + \cos \phi_1 \cos \phi_0 \sin^2((\lambda_0 - \lambda_1)/2)} \quad (1.14)$$

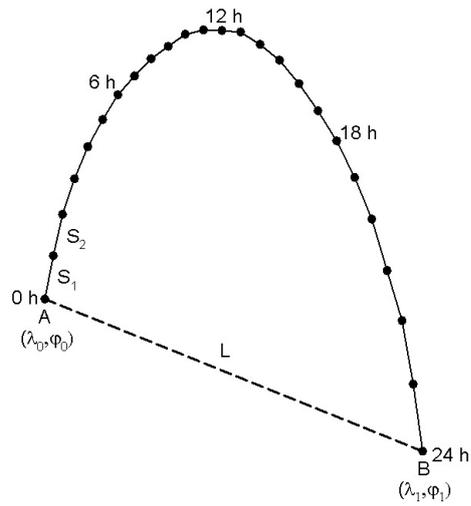


Figura 1.5: Factor de recirculación.

Capítulo 2

Descripción Experimental

2.1 Descripción de la base de datos

Los datos son obtenidos de la división de investigación de huracanes de la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) [38] como parte de su proyecto H*Wind, un innovador programa de análisis del viento en tiempo real e histórico de huracanes. La base de datos de este proyecto [39] está formada por más de 200 huracanes desde 1994 hasta 2013, de las cuencas atlántica, pacífica este y pacífica oeste, así como algunos huracanes históricos anteriores a 1994. La distribución de los huracanes en la web sigue el modelo de la figura (2.1).



Figura 2.1: Distribución de los huracanes dentro de la base de datos.

Dentro de los archivos de cada huracán, podemos encontrar la siguiente información:

- Datos que reflejan las observaciones obtenidas en tiempo real a medida que la tormenta evolucionó, y los eventos posteriores a dicho acontecimiento.
- Mapas con imágenes del tamaño e intensidad del campo eólico durante un tiempo determinado.
- Gráficos de cobertura de datos: son imágenes que muestran las fuentes de datos utilizadas para informar a los archivos.
- *GriddedData*: archivo que representa las velocidades del viento sobre distintos puntos de una superficie centrada en el centro del huracán.

Un ejemplo de cómo están distribuidos estos datos dentro de cada huracán se puede ver en la figura (2.2), donde se muestran tres archivos de datos para tres horas distintas del mismo día de uno de los huracanes de la base de datos. No todos los huracanes tienen todos los tipos de archivos aquí descritos.

10/30/2012

0730 Z

2° map	4° map	8° map
Data Coverage	Data Coverage	Data Coverage
02° MetaData	04° MetaData	08° MetaData
GriddedData	MarineGriddedData	Shapefiles

0430 Z

2° map	4° map	8° map
Data Coverage	Data Coverage	Data Coverage
02° MetaData	04° MetaData	08° MetaData
GriddedData	MarineGriddedData	Shapefiles

0130 Z

2° map	4° map	8° map
Data Coverage	Data Coverage	Data Coverage
02° MetaData	04° MetaData	08° MetaData
GriddedData	MarineGriddedData	Shapefiles

Figura 2.2: Distribución de los archivos correspondientes a cada huracán.

Los archivos más interesantes para nuestro estudio son aquellos que nos dan la información de las velocidades del viento en distintos puntos del huracán, es decir, los archivos denominados *GriddedData*. Estos archivos tienen la siguiente estructura:

- En primer lugar algunas líneas que dan el espaciado de la cuadrícula en kilómetros y la latitud y longitud del centro del huracán, correspondiente a las coordenadas cartesianas $(x, y) = (0, 0)$.

- Agrupados ya en tabla, se da el número total de entradas del archivo seguido de las coordenadas cartesianas en kilómetros distribuidas en orden creciente de la coordenada x de oeste a este y posteriormente en orden creciente de la coordenada y de sur a norte.
- Posteriormente, se presentan las coordenadas de longitud este y de latitud norte para cada punto (x,y) dado anteriormente.
- Finalmente, se dan las componentes zonal y meridiana (u,v) de la velocidad del viento en cada punto (x,y) del huracán en m/s, seguidas de su módulo y dirección.

Un ejemplo de cómo son estos ficheros se ve en la figura (2.3), donde se muestran los primeros datos de la tabla descrita anteriormente.

```

index,merc_x,merc_y,lat(deg),lon(deg),U Comp,V Comp,ws(m/s),wd(deg)
0,-476.212,-476.212,36.1966,-81.0544,7.59386,-1.32810,7.70912,279.9202
1,-470.184,-476.212,36.1966,-81.0002,7.59526,-1.27653,7.70179,279.5405
2,-464.156,-476.212,36.1966,-80.9459,7.59342,-1.22214,7.69114,279.1432
3,-458.128,-476.212,36.1966,-80.8916,7.58803,-1.16491,7.67693,278.7279
4,-452.100,-476.212,36.1966,-80.8374,7.57892,-1.10481,7.65902,278.2938
5,-446.072,-476.212,36.1966,-80.7831,7.56598,-1.04176,7.63736,277.8398
6,-440.044,-476.212,36.1966,-80.7288,7.54896,-0.975698,7.61175,277.3646
7,-434.016,-476.212,36.1966,-80.6746,7.52761,-0.906522,7.582,276.8668
8,-427.988,-476.212,36.1966,-80.6203,7.50197,-0.834237,7.54821,276.3454
9,-421.960,-476.212,36.1966,-80.5660,7.47219,-0.758756,7.51061,275.7982
10,-415.932,-476.212,36.1966,-80.5117,7.43833,-0.680073,7.46935,275.2239
11,-409.904,-476.212,36.1966,-80.4575,7.40046,-0.598154,7.42459,274.621
12,-403.876,-476.212,36.1966,-80.4032,7.35881,-0.513042,7.37667,273.9881
13,-397.848,-476.212,36.1966,-80.3489,7.31363,-0.424775,7.32596,273.324
14,-391.820,-476.212,36.1966,-80.2946,7.26522,-0.333419,7.27287,272.6276
15,-385.792,-476.212,36.1966,-80.2404,7.21391,-0.239024,7.21787,271.8977
16,-379.764,-476.212,36.1966,-80.1861,7.16002,-0.141773,7.16142,271.1343
17,-373.736,-476.212,36.1966,-80.1318,7.10419,-0.0417953,7.10431,270.3371
18,-367.708,-476.212,36.1966,-80.0775,7.04634,0.0607746,7.0466,269.5058
19,-361.680,-476.212,36.1966,-80.0232,6.98661,0.165756,6.98858,268.6409
20,-355.652,-476.212,36.1966,-79.9689,6.92526,0.272958,6.93064,267.7429
21,-349.624,-476.212,36.1966,-79.9146,6.86235,0.382115,6.87298,266.8129
22,-343.596,-476.212,36.1966,-79.8603,6.79806,0.492999,6.81591,265.8521
23,-337.568,-476.212,36.1966,-79.8060,6.73250,0.605352,6.75966,264.8621
24,-331.540,-476.212,36.1966,-79.7517,6.66575,0.718859,6.7044,263.8448
25,-325.512,-476.212,36.1966,-79.6974,6.59785,0.833183,6.65025,262.8027
26,-319.484,-476.212,36.1966,-79.6431,6.52908,0.948021,6.59755,261.7384
27,-313.456,-476.212,36.1966,-79.5888,6.45952,1.06304,6.54641,260.6546

```

Figura 2.3: Ejemplo de fichero *GriddenData*.

2.2 Análisis de la base de datos

A continuación, se va a proceder a realizar un estudio de todos los huracanes de la base de datos, excluyendo los siete huracanes históricos anteriores a 1994. Se muestra en la figura (2.4) el total de huracanes que proporciona nuestra base de datos, 241, separados en función de la cuenca a la que corresponden. Sin contar 1994 debido a que sólo hay un huracán, entre 1995 y 2013 se obtiene una media de 12.63 huracanes/año. Como ya hemos dicho, tenemos datos de huracanes de tres cuencas distintas. La mayoría de ellos pertenecen a la cuenca atlántica debido a que la NOAA forma parte de los *Laboratorios de Oceanografía y Meteorología del Atlántico*, en

Miami, Florida; no obstante, también hay datos de huracanes de las otras dos cuencas. Por ello, se ha desglosado en esta figura los huracanes que hubo en cada cuenca. De los 241 huracanes totales, 203 pertenecen a la cuenca atlántica (es decir el 84,23%), 34 a la cuenca pacífica este (el 14,11%) y 4 a la cuenca pacífica oeste (el 1,66%).

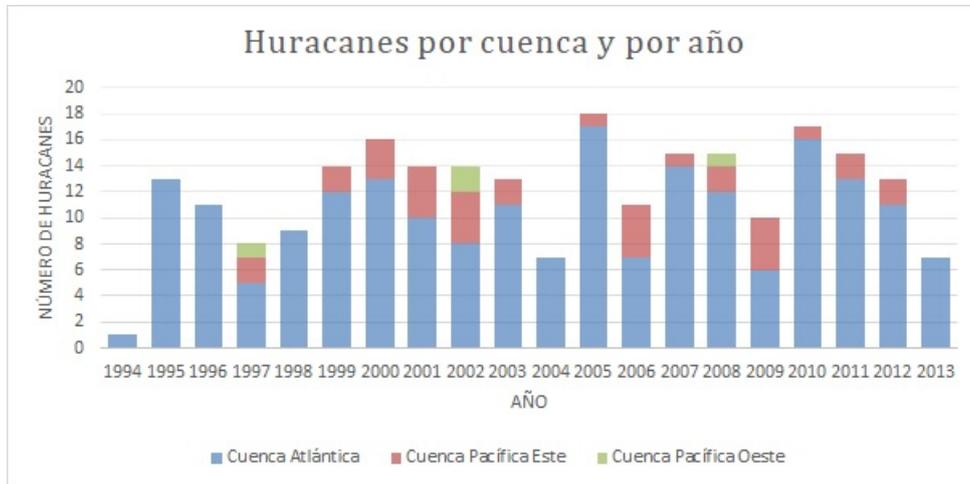


Figura 2.4: Número de huracanes en la base de datos entre 1994 y 2013 separados en función de la cuenca a la que pertenecen.

Otra forma interesante en la que se pueden agrupar estos huracanes es en función del mes en el que tuvieron su inicio, como puede verse en la figura (2.5). En esta figura queda claro que las temporadas de huracanes tienen su punto álgido en los meses de agosto y septiembre.

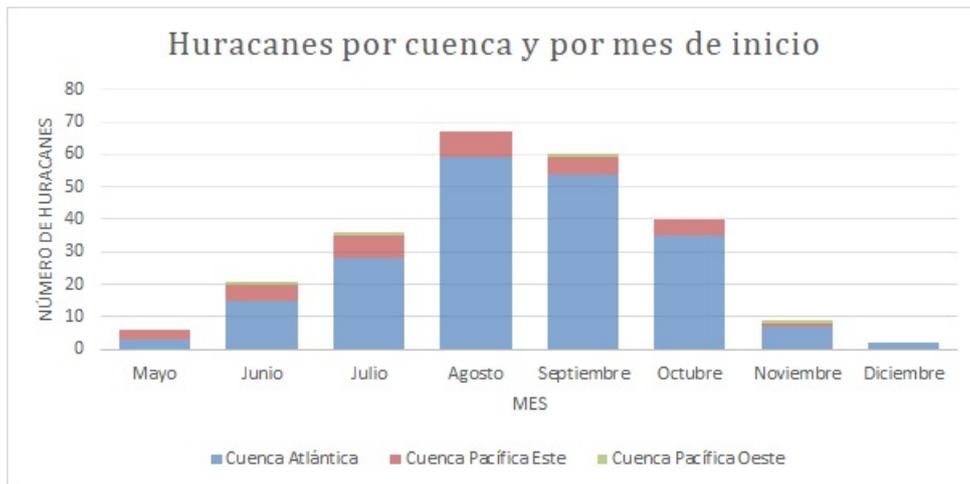


Figura 2.5: Número de huracanes en la base de datos entre 1994 y 2013 separados en función de su mes de inicio.

Una vez vista la distribución temporal de los huracanes de los que disponemos en la base de datos, el estudio se centrará en ver cuáles tienen datos útiles para nuestro análisis, es decir, estudiar cuántos huracanes tienen archivos *GriddedData*, y el número de este tipo de archivos que tiene cada huracán. Los huracanes más antiguos de la base de datos no disponen de este

tipo de archivos, es a partir de 1998 cuando la mayoría de huracanes empiezan a tenerlos. De los que disponen de archivos, los hay desde sólo 1 archivo hasta otros con 60 archivos de distintas horas y días. En este periodo se da una media de 9,71 ficheros por huracán. En las figuras (2.6) y (2.7) se muestra un análisis del número total de ficheros y el promedio de éstos en función del número total de huracanes.

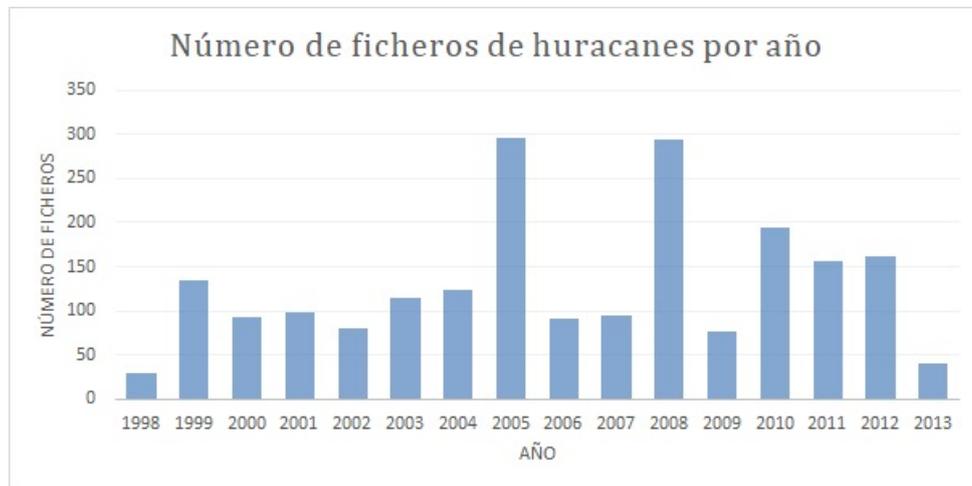


Figura 2.6: Número de ficheros *GriddenData* en la base de datos en cada temporada de huracanes.

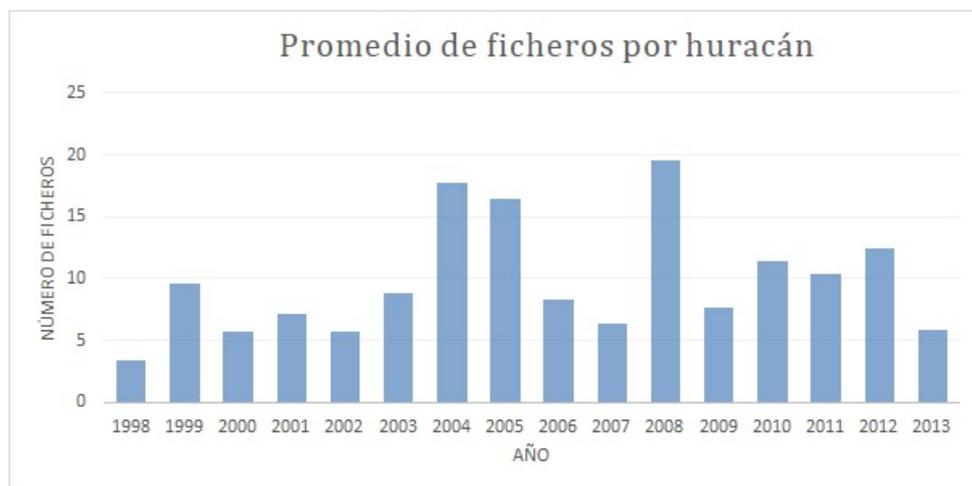


Figura 2.7: Promedio de ficheros *GriddenData* por huracán y por año.

En la figura (2.6) destacan los años 2005 y 2008 como aquellos con mayor número de ficheros, teniendo ambos casi 300. Sin embargo, la figura (2.7) muestra los años 2004, 2005 y 2008 como aquellos con un mayor número promedio de ficheros por huracán, entre 15 y 20.

2.3 Proceso de selección del huracán

Visto el análisis de la base de datos, se va a proceder a seleccionar un huracán para nuestro estudio. Las premisas de las que partimos son que dicho huracán debe tener suficientes archivos

como para poder hacer un seguimiento adecuado de sus parámetros estadísticos y que debe ser un huracán con relevancia en la actualidad. Por ello, realizamos una primera selección con todos aquellos posteriores a 2005 con al menos 20 archivos, y, como modo de ver la relevancia que tuvieron, utilizamos Google como motor de búsqueda para ver cuántos resultados web existen de cada uno de ellos siguiendo el patrón de búsqueda “Hurricane NOMBRE AÑO”.

En la figura (2.8) se pueden ver los resultados web de cada huracán a 27 de febrero de 2017, mientras que en el cuadro (2.1) también se muestra el número de archivos de cada huracán y la categoría máxima que alcanzó.

Nombre	Año	Número de ficheros	Resultados web (aproximados)	Categoría Máxima
Wilma	2005	32	428.000	5
Rita	2005	40	307.000	5
Ophelia	2005	60	328.000	1
Katrina	2005	39	1.810.000	5
Emily	2005	39	196.000	5
Dennis	2005	30	514.000	4
Ernesto	2006	30	349.000	1
Dean	2007	22	434.000	5
Paloma	2008	27	497.000	4
Ike	2008	58	453.000	4
Hanna	2008	42	401.000	1
Gustav	2008	60	249.000	5
Fay	2008	40	181.000	TT
Dolly	2008	24	445.000	2
Bill	2009	25	823.000	4
Tomas	2010	25	459.000	2
Igor	2010	23	403.000	4
Earl	2010	41	571.000	4
Alex	2010	25	271.000	2
Rina	2011	20	482.000	3
Irene	2011	42	438.000	3
Sandy	2012	48	14.700.000	3
Isac	2012	47	579.000	1
Ernesto	2012	22	431.000	2

Cuadro 2.1: Tabla de los huracanes seleccionados con su número de archivos, su resultado web y su categoría máxima.



Figura 2.8: Resultados web a 27 de febrero de 2017 de cada huracán.

De entre todos destacan dos de ellos, el huracán Sandy de 2012 y el huracán Katrina de 2005. Debido a que el huracán Sandy dispone de un mayor número de archivos que analizar y es actual, se va a proceder a realizar su estudio.

Capítulo 3

Análisis de la velocidad del viento

Se va a proceder a presentar los resultados estadísticos obtenidos para el huracán Sandy de 2012 según lo visto en el capítulo 1, así como la trayectoria por la que transcurrió. Para este análisis se dispone de un total de 48 archivos comprendidos entre el día 23 de octubre de 2012 a las 13:30 (tomando como referencia el huso horario centrado sobre el meridiano de Greenwich) y el día 30 de octubre a las 07:30. Cada uno de estos archivos está formado por más de 20.000 datos de la velocidad del viento, en distintos puntos de una superficie de tamaño aproximado de entre 1000x1000 y 2000x2000 km centrada en el centro del huracán.

3.1 Mapa de trayectoria

En esta sección se va a proceder a analizar en primer lugar el avance del centro del huracán Sandy viendo las coordenadas geográficas por las que transcurre para después analizar por qué lugares geográficos y países avanzó nuestro huracán. Esto se muestra en la figura (3.1) y en la figura (3.2), que es una versión ampliada para apreciar mejor los países por los que transcurrió el centro del huracán y la categoría que alcanzó en cada momento, siendo el azul Tormenta Tropical, el amarillo categoría 1 y el amarillo oscuro categoría 2.

El huracán comienza con coordenadas -77.762° Este, 13.576° Norte el día 23 a las 13:30 y avanza dirección noreste hasta el día 25 a las 19:30 con coordenadas -75.336° Este, 23.976° Norte donde se produce un giro dirección oeste durante 24 horas, para volver a girar dirección noreste. El huracán sigue avanzando durante tres días más en esta dirección hasta el día 29 a las 07:30 que alcanza su punto más al Este con coordenadas -70.531° Este, 35.571° . Tras este punto, el huracán realiza su último cambio de dirección hacia el Oeste, alcanzando el último punto del que disponemos de datos con coordenadas -76.764° Este, 40.4871° Norte el 30 de octubre de 2012 a las 07:30. Estos cambios de dirección se han marcado en la figura (3.1).

Una vez vistas las coordenadas geográficas y el avance del huracán, se procede a mostrar los lugares geográficos por los que transcurre. Los primeros datos que disponemos del huracán son del día 23 de octubre cuando se encontraba en el mar Caribe y se había convertido por primera vez en tormenta tropical. Esta tormenta tropical creció a su paso por el Caribe hasta convertirse en huracán de categoría 1 y tocar tierra por primera vez el día 24 de octubre a las 19:00 en Jamaica [40]. El huracán atravesó la isla sin perder fuerza y siguió creciendo a su paso por las fosas de las Caimán hasta alcanzar su categoría máxima poco tiempo antes de su llegada a Cuba. Aunque el centro del huracán Sandy no llegó a pasar por la Española, su

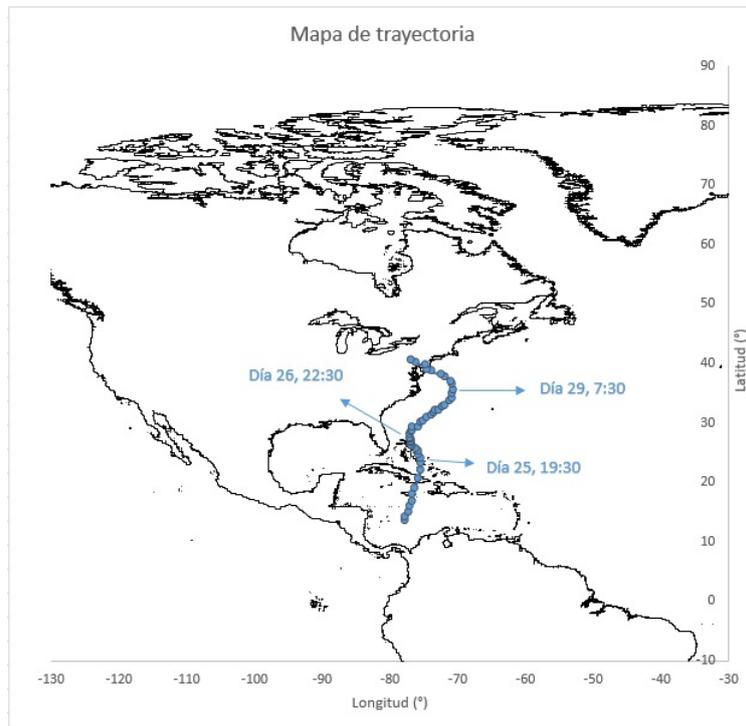


Figura 3.1: Trayectoria del huracán Sandy

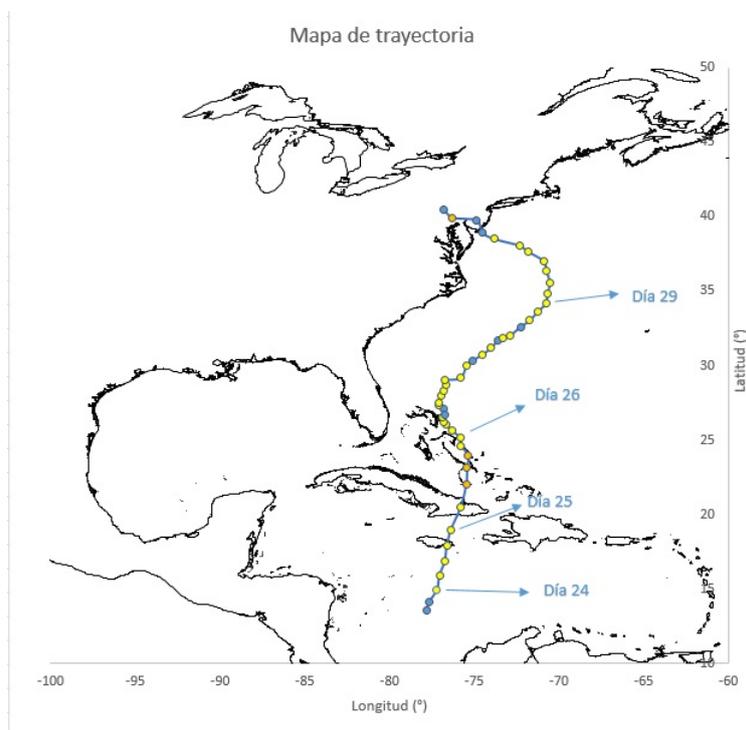


Figura 3.2: Trayectoria ampliada del huracán Sandy

superficie sí atravesó esta isla causando numerosos daños en Haití. El 25 de octubre a las 05:25 Sandy tocó tierra en el este de Cuba y avanzó durante cinco horas por la isla hasta alcanzar el

Océano Atlántico.

En el Océano Atlántico Sandy fue perdiendo fuerza a su paso por las Bahamas, tocando tierra al norte de éstas en las Islas Ábaco a finales del 26 de octubre. A pesar de perder la categoría de huracán, tras pasar Bahamas en dirección noreste el radio del huracán aumentó considerablemente, doblándose con respecto al que tenía a su paso por Cuba.

Los vientos del huracán volvieron a aumentar, haciendo que Sandy recuperase la categoría de huracán el día 27 a las 12:00 mientras avanzaba paralelamente a la costa de Estados Unidos. Finalmente este huracán cambió de dirección hacia el Oeste el día 29 de octubre para tocar tierra en New Jersey, Estados Unidos, con categoría de tormenta tropical a las 23:30. Por último, el huracán siguió avanzando dirección noroeste por Estados Unidos y Canadá hasta acabar desapareciendo.

3.2 Evolución temporal de los parámetros estadísticos

Indicadores de posición

Vamos a comenzar con las gráficas correspondientes a la media (3.3), a la mediana (3.4), y a los percentiles 90, 95, 99 y 100 (velocidad máxima) (3.5).

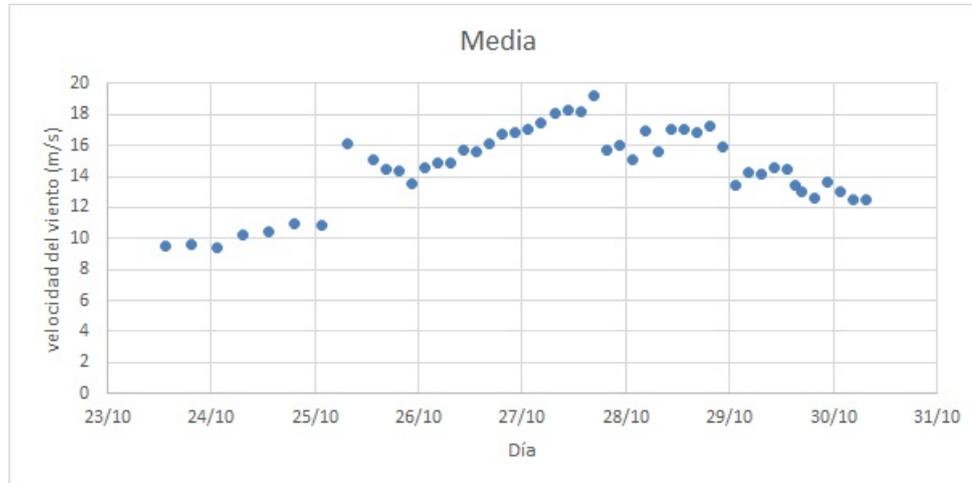


Figura 3.3: Media de la velocidad del viento del huracán Sandy

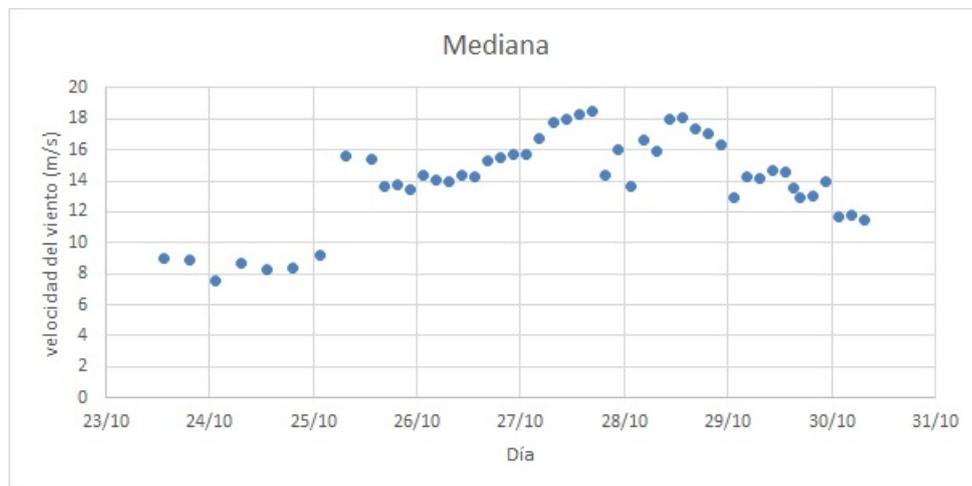


Figura 3.4: Mediana de la velocidad del viento del huracán Sandy

Con la media y la mediana podemos apreciar en torno a qué velocidades se movían los vientos en la correspondiente superficie del huracán. También nos muestran cómo este huracán sufrió dos periodos de formación, el primero con velocidades medias comprendidas entre 9 y 11 m/s seguido por un salto brusco el día 25 de octubre en el que las velocidades medias llegan a 16 m/s, para a continuación debilitarse tras el primer paso por tierra y volver a aumentar de velocidades en un segundo periodo de crecimiento en el que llega a alcanzar una media máxima de 19.22 m/s. Tras alcanzar esta media máxima el día 27 fue decreciendo conforme avanza el tiempo hasta los 12.5 m/s del último día del que disponemos datos. En cuanto a la mediana

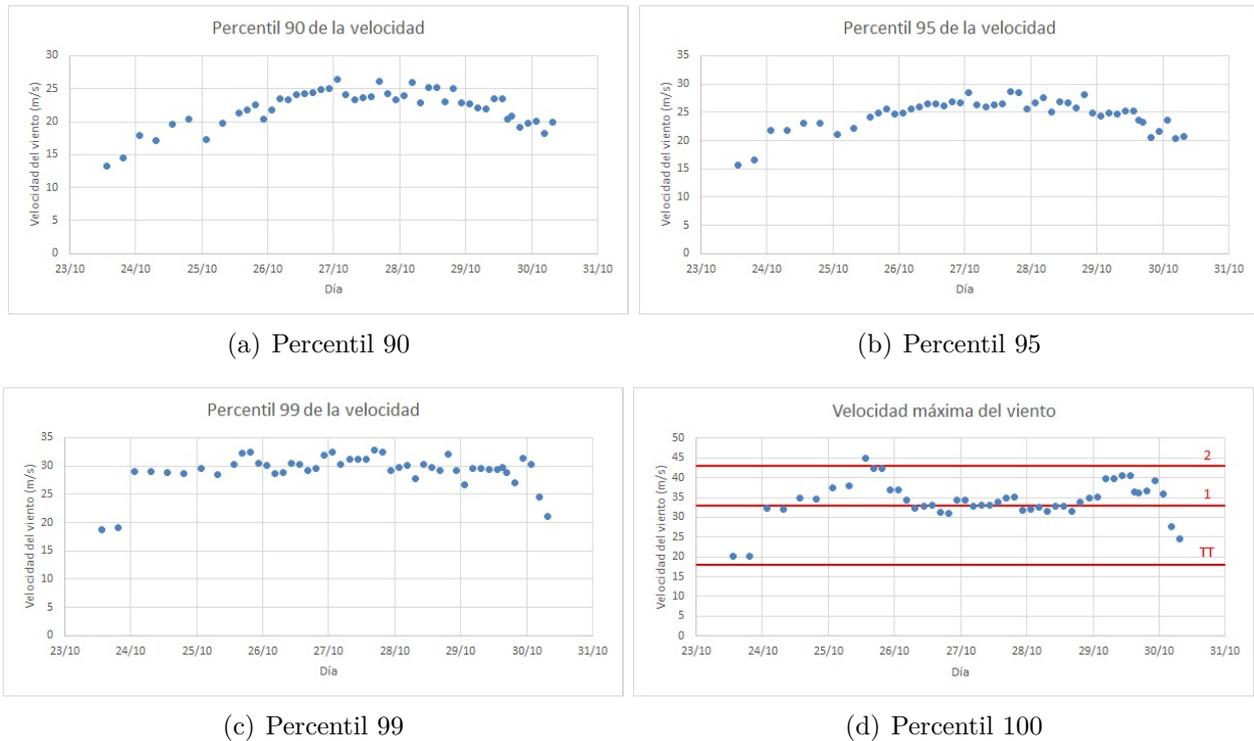


Figura 3.5: Percentiles 90, 95, 99, 100 de la velocidad del viento del huracán Sandy

el análisis es similar, se aprecia incluso mejor el primer periodo de crecimiento del día 25 y la máximas de 18,55 m/s del día 27. Posteriormente en esta sección se verán las superficies en las que se encuentra centrado el huracán y se podrá apreciar mejor cómo están distribuidas las velocidades de las que se hacen la media y la mediana.

En cuanto a la velocidad máxima, podemos ver cómo este huracán pasó la mayoría del tiempo siendo tormenta tropical y huracán de categoría 1, con picos de velocidad máxima de 44.89 m/s el día 25 de octubre de 2012 con vientos de categoría igual o superior a la categoría 2¹, seguido de velocidades estables entre 30 y 35 m/s para pasar a tener un segundo pico de 40.51 m/s el día 29 de octubre en su segundo periodo de crecimiento. Los percentiles 90 y 95 vemos que se mantienen prácticamente constantes con valores comprendidos entre 20 y 25 m/s y 25 y 30 m/s respectivamente a excepción de los dos primeros días, que como ya hemos visto son los días anteriores al primer periodo de crecimiento, y a las últimas 24 horas dónde ya se aprecia que el huracán empieza a debilitarse en su último paso por tierra. Por último, el percentil 99 tiene un valor aproximado de 30 m/s desde el día 24 al 29, con valores considerablemente más pequeños los días 23 y 30.

Indicadores de dispersión

Vamos a pasar a hablar de la desviación estándar (3.6) y del rango intercuartílico (3.7). Ambas medidas son una muestra del grado de dispersión de los datos con respecto a un valor central. En comparación con las gráficas de la media y de la velocidad máxima del apartado anterior,

¹En nuestros datos la categoría máxima alcanzada es la categoría 2, no obstante, en los datos oficiales del huracán durante algunos minutos alcanzó la categoría 3 a su paso por Cuba [40].

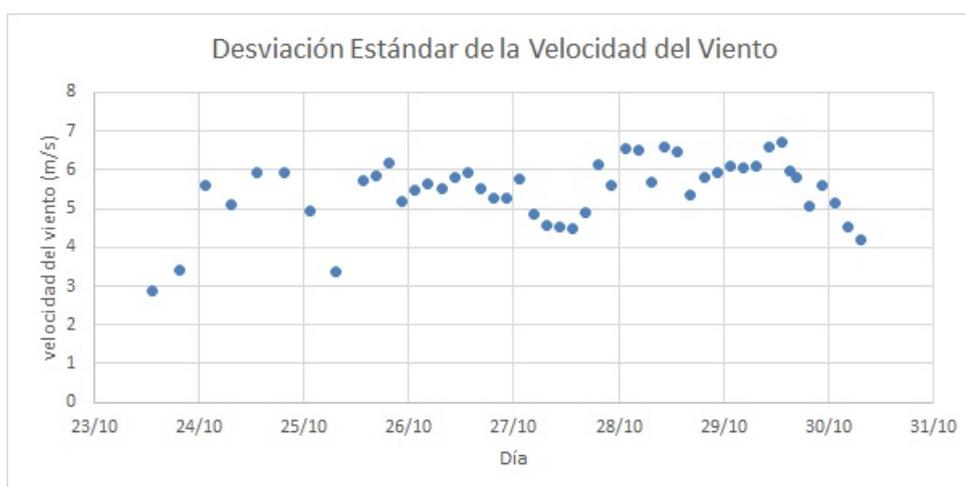


Figura 3.6: Desviación estándar de la velocidad del viento del huracán Sandy

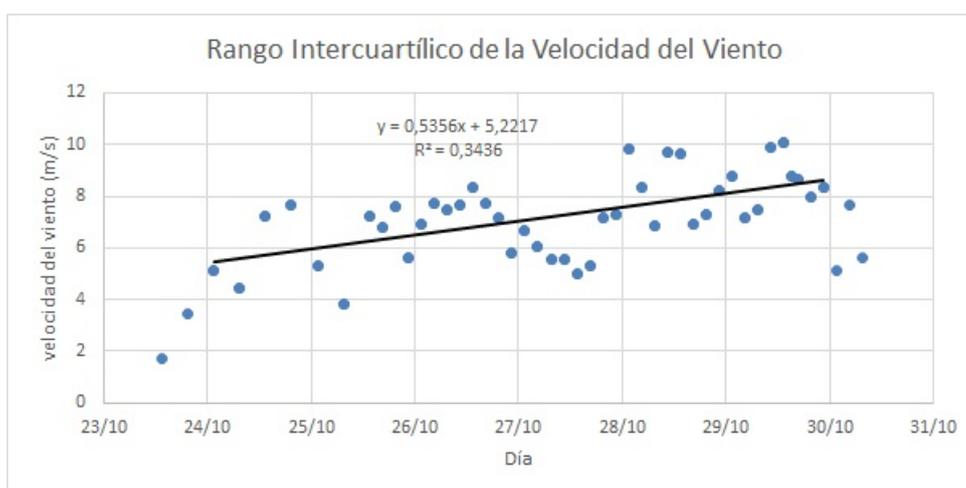


Figura 3.7: Rango intercuartílico de la velocidad del viento del huracán Sandy

se aprecia cómo estos dos indicadores toman valores más pequeños cuando la media es menor, como era de esperar, mientras que a velocidades mayores la dispersión producida es mayor.

La desviación estándar se mantiene constante con valores entre 4 y 6.5 m/s, con una máxima el día 29 de 6.70 m/s y una mínima de 2.89 m/s el primer día cuando las velocidades de los vientos eran menores. A diferencia de la desviación estándar, en el rango intercuartílico sí se aprecia una mayor heterogeneidad de los datos con una mínima de 1.72 m/s el primer día, seguido de datos que oscilan entre los 4 y los 10 m/s, produciéndose el máximo rango de 10.06 m/s el día 29, coincidiendo con el segundo periodo de crecimiento. Además también se aprecia un cierto crecimiento lineal desde el día 24 hasta el 29, aumentando una media de 0.54 m/s al día.

Lo que básicamente podemos obtener con estos datos, es que cuanto mayor sea su valor, habrá zonas dentro del huracán en las que las velocidades sean muy altas con respecto al resto de zonas, mientras que a menor valor, estas zonas seguirían existiendo, pero con menor diferencia de velocidades con respecto a su alrededor.

Indicadores de simetría

Vamos a analizar a continuación el sesgo (3.8) y el índice de Yule-Kendall (3.9) de nuestro huracán Sandy.

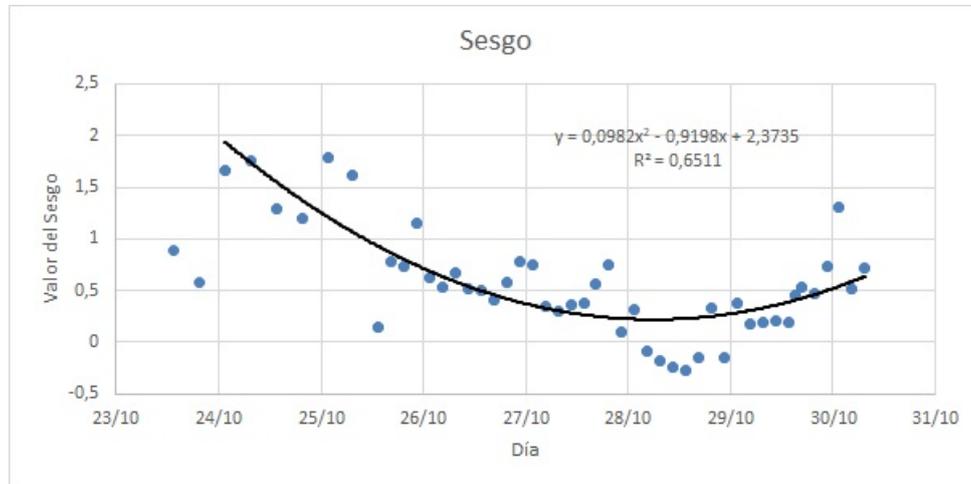


Figura 3.8: Sesgo de la velocidad del viento del huracán Sandy

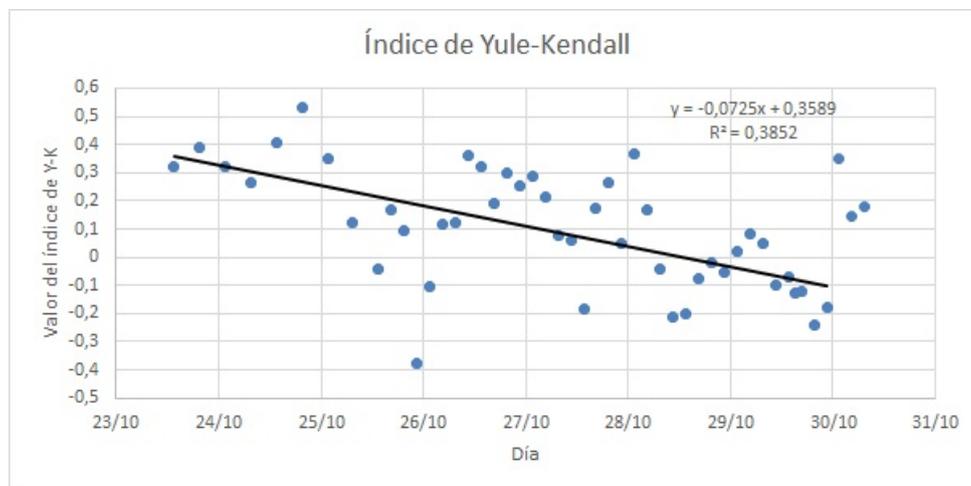


Figura 3.9: Índice de Yule-Kendall de la velocidad del viento del huracán Sandy

Básicamente, estos dos indicadores nos muestran que en la mayoría de los puntos analizados la distribución de velocidades es asimétrica hacia la derecha, ya que la mayoría de valores que tenemos son mayores que cero. No obstante, la asimetría de la distribución de velocidades decrece según pasan los días, con valores más próximos a cero en los días 27, 28 y 29 y valores máximos los primeros días del huracán y el último. Esto queda bien reflejado en el ajuste polinómico de orden dos que se ha hecho en el sesgo, cuya distribución de valores se asemeja a una parábola. Por su parte, en el índice de Yule-Kendall se aprecia una tendencia descendente de forma lineal entre el primer día y el penúltimo.

Indicadores de aplanamiento

Por último, nos queda hablar de la curtosis (3.10) y de la curtosis robusta (3.11).

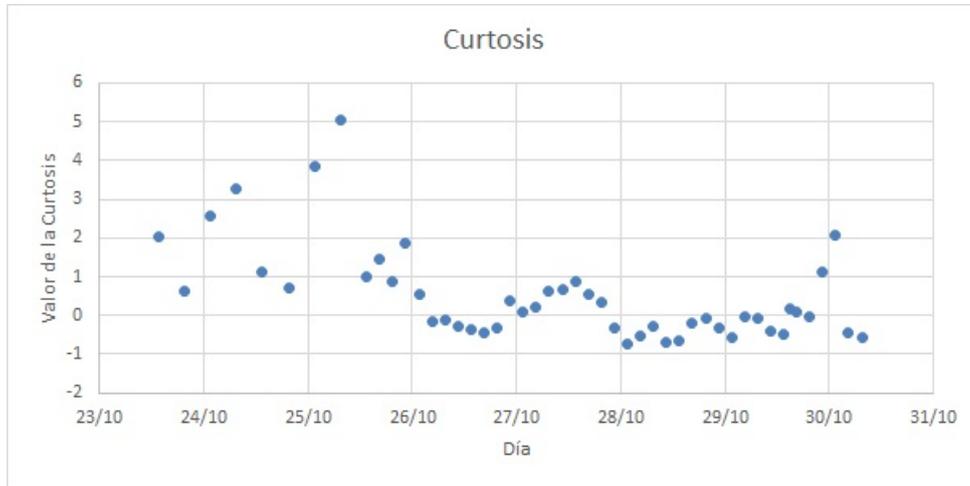


Figura 3.10: Curtosis de la velocidad del viento del huracán Sandy

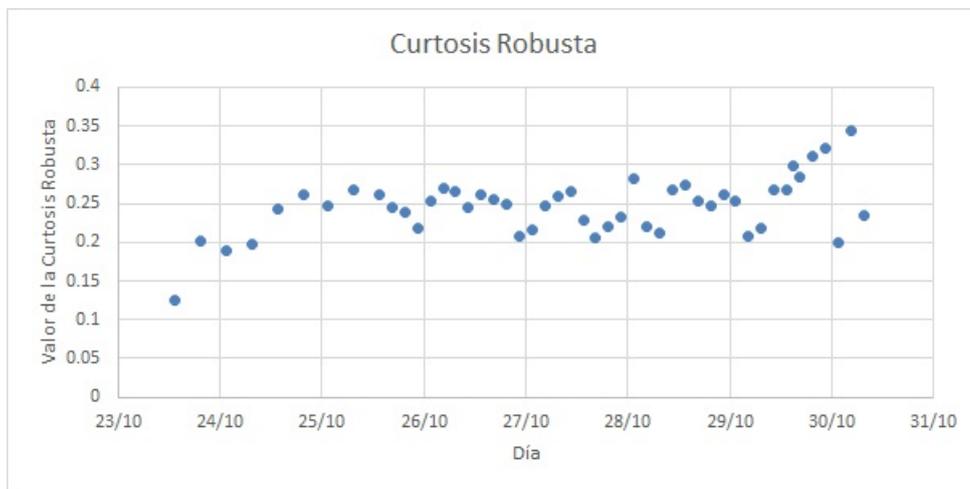


Figura 3.11: Curtosis robusta de la velocidad del viento del huracán Sandy

Se aprecia en estas imágenes que la mayoría de datos tienen un valor pequeño, en torno a 0 de la curtosis y de entre 0.2 y 0.25 de la curtosis robusta, lo que nos indica que son por tanto distribuciones de velocidades normales que tienden a ser gaussianas, ya que la curtosis robusta de una distribución normal es 0.262. No obstante, se aprecian picos de curtosis alta en los datos en los que hemos visto anteriormente que había velocidades máximas y medias de velocidades más altas, siendo en estos casos una distribución de datos más escarpada, teniendo por tanto muchos más valores en torno al valor medio que en una distribución normal. Los valores más altos de curtosis se alcanzan el día 25 con valores de 5.03 y 3.87 y de curtosis robusta el día 30 con un valor de 0.34, por tanto los días 23, 24, 25 y 30 han sido los días con distribuciones de velocidad más leptocúrticas, mientras que el resto de días han sido más normales.

3.3 Distribución de Laplace

Se va a proceder a mostrar la distribución de Laplace vista en (1.8) para distintos datos cada 12 horas. Antes de pasar a la representación de datos conviene mostrar el valor de sus parámetros b y μ . El parámetro μ ya habíamos comentado que coincide con la mediana (ver (3.4)), mientras que b viene dada por la ecuación (1.9). Aunque sólo se va a proceder a representar esta distribución para datos cada 12 horas, se muestra en la figura (3.12) los datos de todos los valores de b para los distintos días.

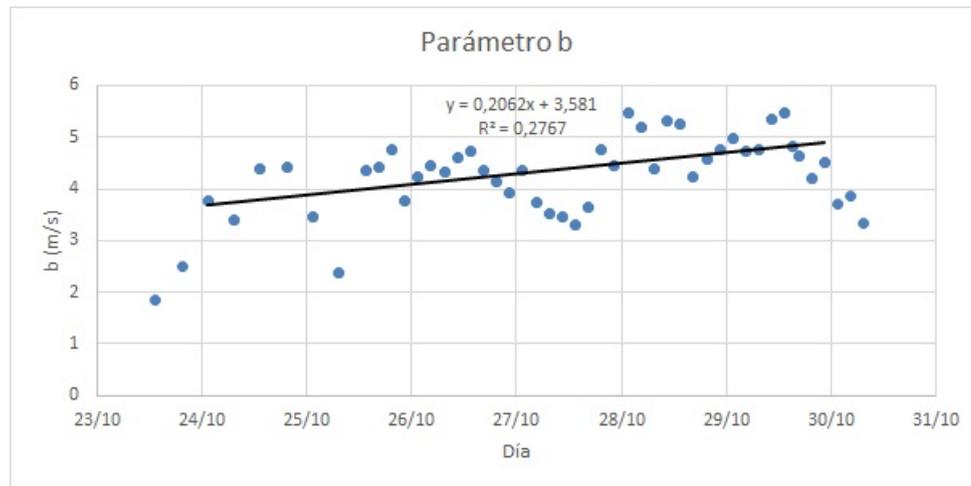


Figura 3.12: Parámetro b de la distribución de Laplace de la velocidad del viento del huracán Sandy

Este parámetro b lo que nos indica es que cuanto menor sea, más valores de la distribución habrá en torno a la mediana, es decir, cuando este parámetro es pequeño la distribución de Laplace tendrá un pico muy estrecho en torno a la mediana, mientras que a valores grandes dicho pico será mucho más ancho. En nuestro caso aparece un crecimiento intenso el primer día, y mucho más lento a partir de ahí, aumentando de forma lineal en torno a un valor de 0.21 m/s al día, alcanzando sus máximos los días 28 y 29 con varios valores aproximados de 5.5 m/s. Los mínimos se ven los días 23, 24 y 25 con algún valor aproximado de 2 m/s. El resto de días oscila en torno a un valor de 4 m/s.

Antes de ver las distintas distribuciones, se va a mostrar el histograma de la velocidad del viento de los días 24 y 27 de octubre a las 13:30 junto a su correspondiente distribución de Laplace para que se aprecie cómo se ajusta a nuestros datos y el porqué de la elección de esta distribución frente a otras que se probaron. En la figura (3.13) se ha procedido a realizar un histograma con clases de dos m/s para los dos días mencionados y se aprecia cómo la distribución de Laplace se ajusta realmente bien a nuestros datos.

Una vez visto el valor de sus parámetros y cómo ajusta a los valores, ya se puede proceder a representarla. Se comienza tomando como primer dato el correspondiente al 23 de octubre de 2012 a las 13:30, y se toman datos cada 12 horas, a excepción del último dato que es cada 6 ya que coincide con el último archivo del que tenemos datos.

Las distintas distribuciones se muestran en la figura (3.14). En estas gráficas se aprecian las distintas medianas de los datos seleccionados, y cómo se distribuyen las velocidades en

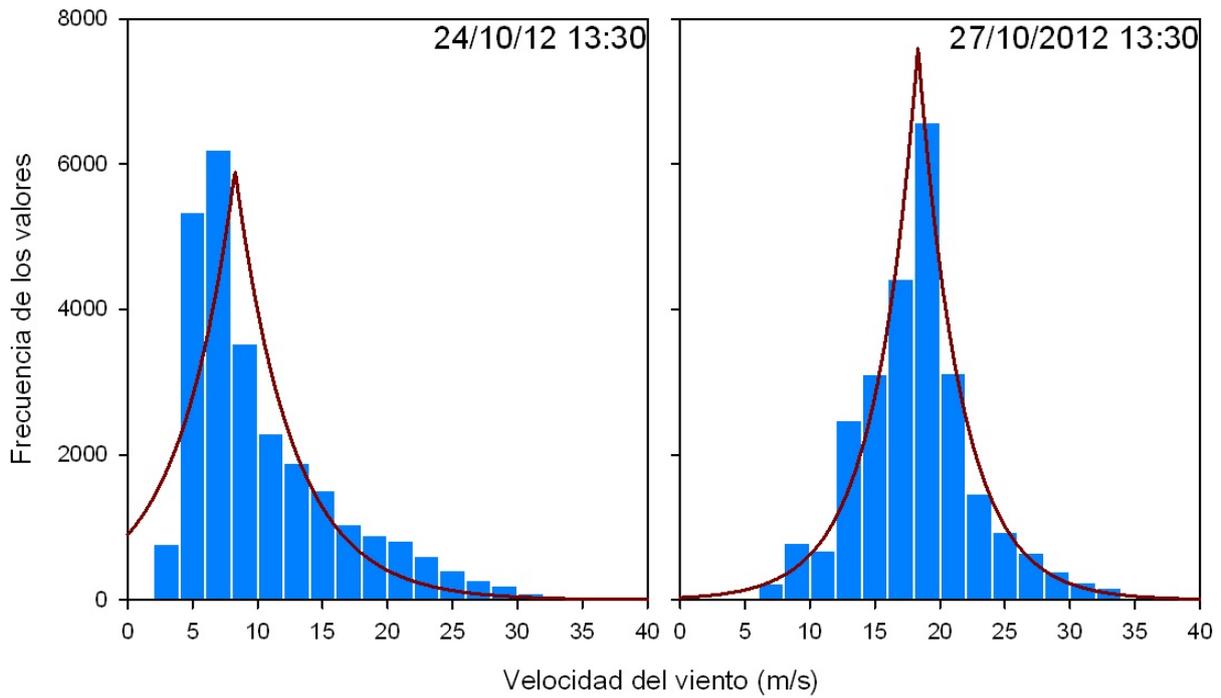


Figura 3.13: Histograma y distribución de Laplace de la velocidad del viento del huracán Sandy los días 24 y 27 de octubre de 2012 a las 13:30

torno a ellas, siendo la distribución con el pico más estrecho la de menor b , en este caso la correspondiente al día 23 a las 13:30, y la más ancha la del día 29 a las 13:30. También se puede ver cómo varía la mediana los distintos días, como ya se había comentado anteriormente.

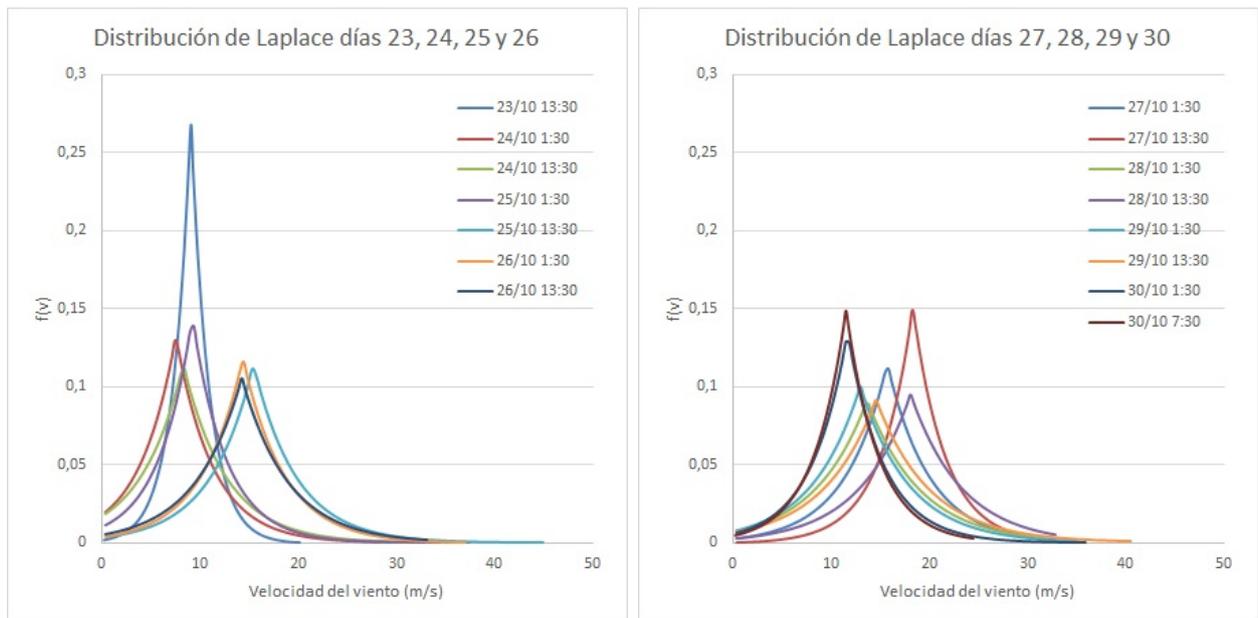


Figura 3.14: Distribución de Laplace de la velocidad del viento del huracán Sandy

3.4 Superficies

En esta sección se va a proceder a hacer un estudio de la velocidad del viento en toda la superficie de la que tenemos datos en la que está centrado el huracán Sandy, mostrando en primer lugar el mapa de las isolíneas de la velocidad y posteriormente se mostrará qué parte de cada superficie se encuentra en cada una de las categorías de la escala de huracanes de Saffir-Simpson.

3.4.1 Mapa de velocidades

Se va a proceder a mostrar el mapa de velocidades de nuestro huracán siguiendo las representaciones hechas en la distribución de Laplace, es decir, un dato cada 12 horas comenzando por el primero de todos, el 23 de octubre de 2012 a las 13:30. La representación de este estudio se encuentra en las figuras (3.15), (3.16) y (3.17).

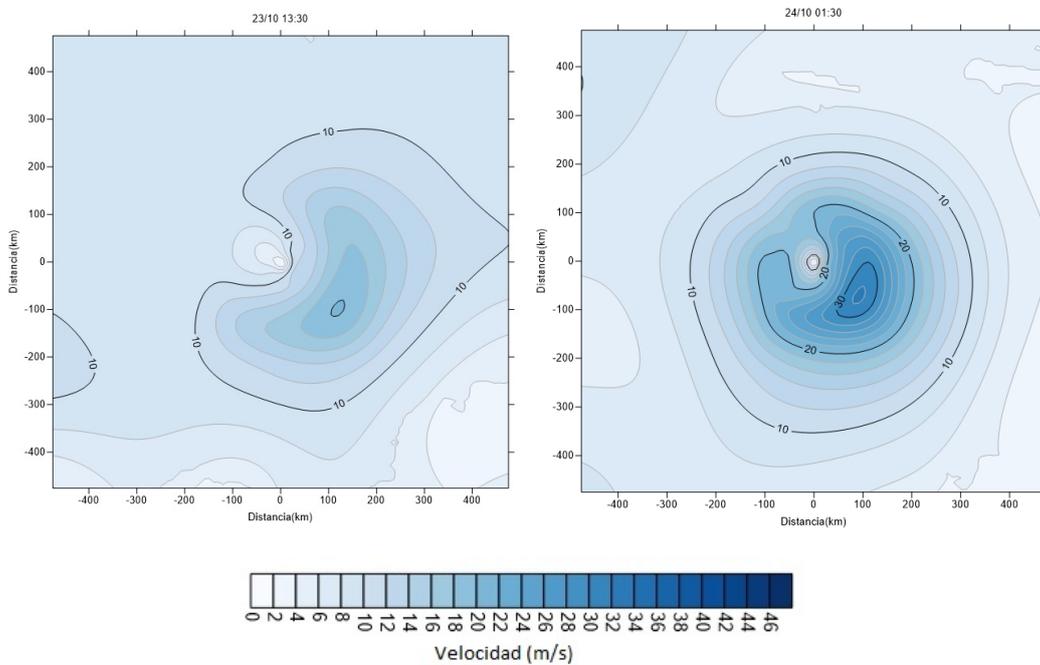


Figura 3.15: Mapas de velocidades del huracán Sandy

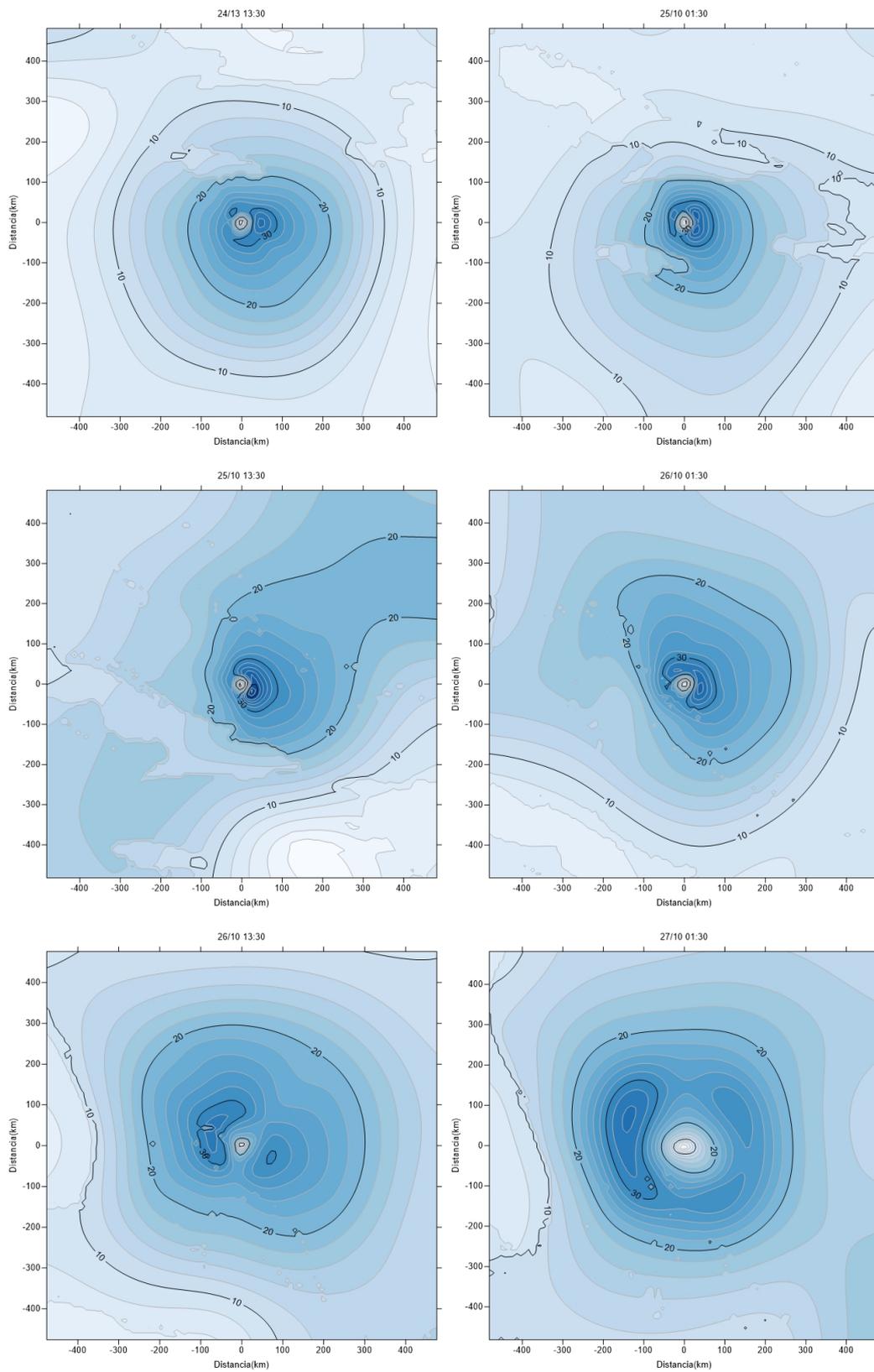


Figura 3.16: Mapas de velocidades del huracán Sandy

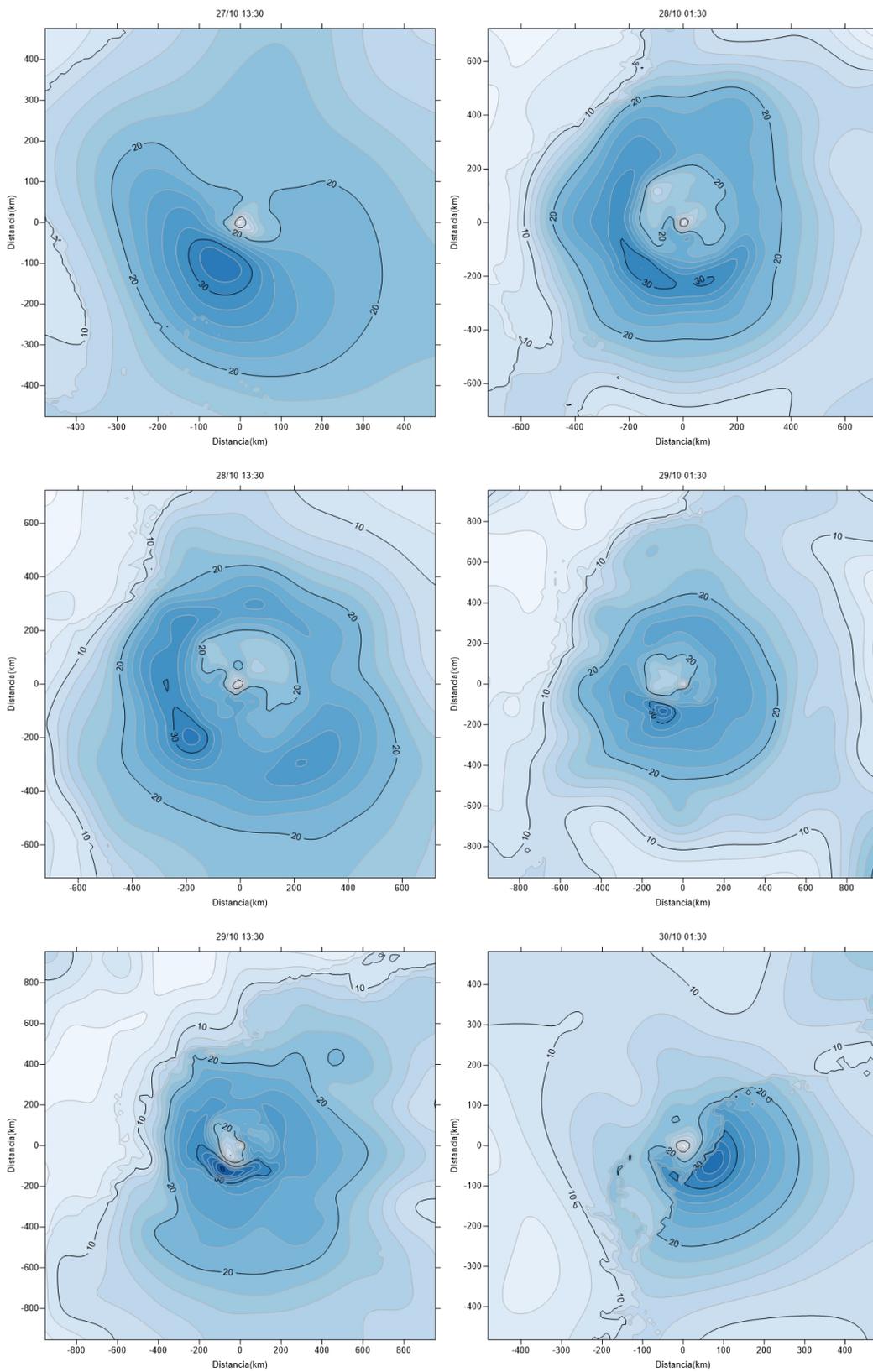


Figura 3.17: Mapas de velocidades del huracán Sandy

Con estas representaciones se puede apreciar claramente cómo fue la distribución de las

velocidades según iba avanzando el huracán. Se puede ver cómo en todas ellas las velocidades mínimas se encuentran en el centro del huracán, es decir en la zona de calma donde no hay vientos, mientras que las velocidades máximas se concentran en una superficie pequeña cercana a dicho centro. Algo que también se puede ver en estas figuras es cómo, según avanzó el huracán Sandy, fue creciendo su radio ya que cada vez es mayor la superficie que rodea al centro con vientos a velocidades altas, alcanzándose el día 29 el mayor radio que tuvo el huracán. También se aprecia la pérdida de intensidad que sufre Sandy el día 30 tras su último paso por tierra si se compara con las gráficas del día anterior.

3.4.2 Análisis de la velocidad en las superficies

Para este estudio se va a proceder a convertir las figuras (3.15), (3.16) y (3.17) en mapas de colores en los cuales cada color representa una categoría de la escala Saffir-Simpson² siguiendo el ejemplo de la figura (3.18), siendo el color azul oscuro depresión tropical, el azul claro tormenta tropical, el verde categoría 1 y el amarillo categoría 2.

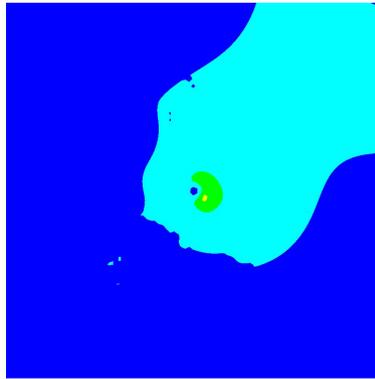


Figura 3.18: Mapa de colores en función de la escala Saffir-Simpson

En este estudio vamos a mostrar en primer lugar las superficies correspondientes a las categorías Tormenta Tropical³, 1 y 2. Se muestran en las figuras (3.19), (3.20) y (3.21).

En la primera gráfica se ve cómo crece la superficie del huracán con vientos de categoría tormenta tropical desde apenas 22000 km² el primer día hasta alcanzar una máxima de casi 1.2 millones de km² el día 29, reduciéndose considerablemente el día 30 hasta 150000 km². En cuanto a la superficie con categoría 1, varios días tenemos datos sin ningún km² con esta categoría, manteniéndose casi en todo momento por debajo de los 6000 km², a excepción del día 27 que se alcanzan 8500 km² y el día 29 que se llega a una máxima de 17200 km². Con categoría 2 sólo disponemos de un dato distinto de cero correspondiente al día 25 a las 13:30 con un área de 151 km².

Es interesante también mostrar la superficie con categoría igual o mayor que Tormenta Tropical (figura 3.22) y con categoría igual o mayor que 1 (figura 3.23).

²Esta escala es ambigua a la hora de clasificar los puntos que se encuentran entre dos categorías distintas, por ello para realizar este estudio hemos tomado el punto intermedio entre el final de una y el comienzo de la siguiente como punto de separación.

³Se han eliminado los puntos correspondientes a los días 25 a las 13:30, 27 a las 13:30 y 28 a las 13:30 debido a que la superficie con vientos de esta categoría es superior a la superficie de estudio.

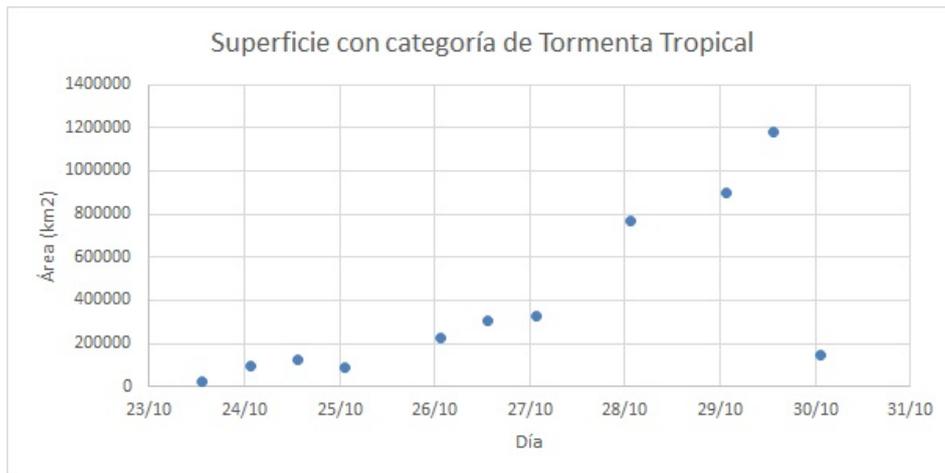


Figura 3.19: Superficie del huracán Sandy con categoría Tormenta Tropical



Figura 3.20: Superficie del huracán Sandy con categoría 1



Figura 3.21: Superficie del huracán Sandy con categoría 2

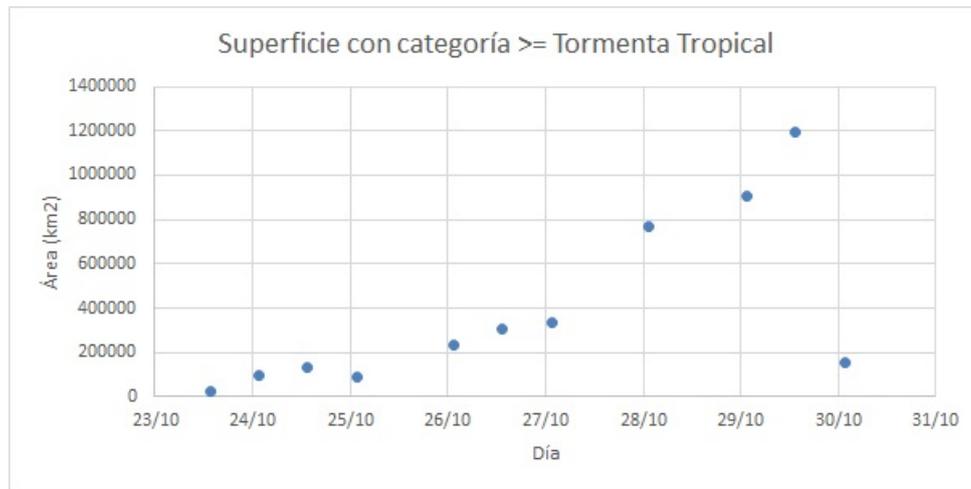


Figura 3.22: Superficie del huracán Sandy con categoría igual o mayor que Tormenta Tropical



Figura 3.23: Superficie del huracán Sandy con categoría igual o mayor que 1

El análisis de estas dos gráficas es muy similar al realizado anteriormente con las gráficas de categoría tormenta tropical y 1, con máximas en los mismos puntos mencionados anteriormente, destacando el obtenido el día 29, casi al final de su vida.

Para concluir con el análisis de las superficies, es interesante usar la superficie del huracán con vientos de categoría igual o superior a tormenta tropical mostrados en la figura (3.19) tomando dicha superficie como circular y de ella sacar el radio. Esto se muestra en la figura (3.24), donde se puede ver cómo este radio fue creciendo linealmente a razón de 3.59 km cada hora desde el día de su formación con un radio de 82 km hasta el día 29 que alcanzó un radio de 616 km, para decaer el día 30 en su último paso por tierra.

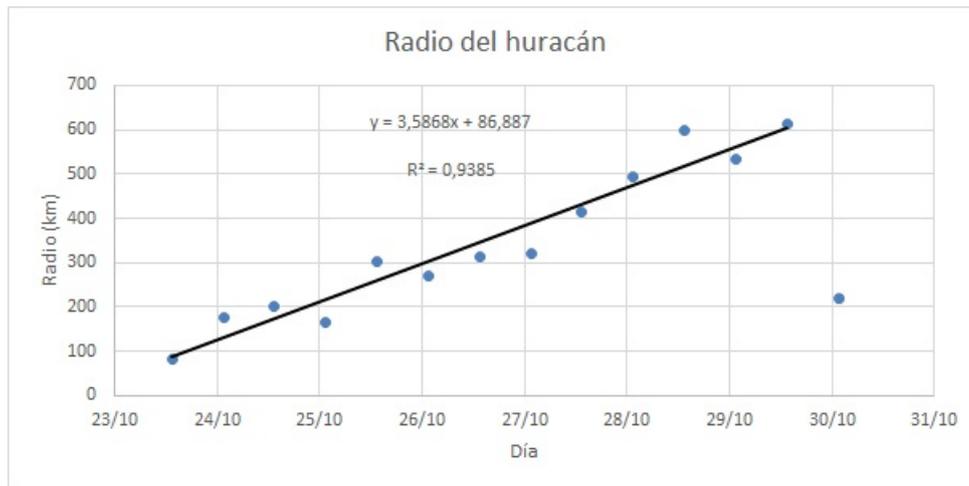


Figura 3.24: Radio del huracán Sandy

Para concluir esta sección, recordar que aunque sea pequeña la superficie de un huracán con vientos de velocidades correspondientes a una determinada categoría en comparación con la superficie total, el huracán es caracterizado por la velocidad máxima que se da en esa superficie.

Capítulo 4

Análisis de trayectorias

Una vez vista la evolución estadística del huracán Sandy, presentaremos el estudio del factor de recirculación de las masas de aire de este huracán a distintas alturas sobre el nivel del mar para puntos en el centro del huracán y a dos grados de latitud de dicho centro. Se ha tomado este segundo punto para observar su incidencia sobre las trayectorias.

4.1 Recirculación centro del huracán

Se van a presentar en primer lugar los valores de la recirculación tomando como referencia un punto en el centro del huracán y la trayectoria que siguieron las masas de aire hasta llegar a dicho punto durante las 24 horas anteriores, tomando datos cada hora. Se calcula el factor de recirculación para 15 alturas distintas sobre el nivel del mar para cada uno de los ocho días. Los resultados se muestran en la figura (4.1).

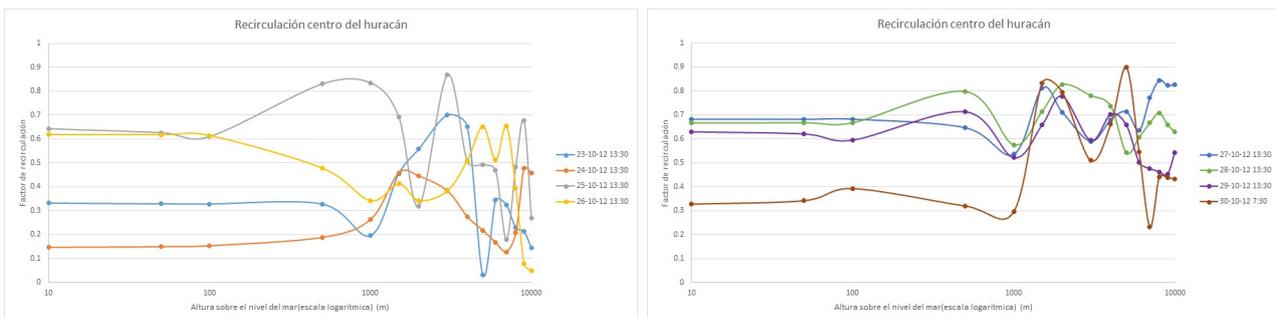


Figura 4.1: Factor de recirculación para distintas alturas sobre el nivel del mar de un punto situado en el centro del huracán Sandy

Observamos cómo en los primeros 1000 m el factor de recirculación es prácticamente constante, a excepción de los días 25 y 26 que se empiezan a notar variaciones a partir de los 500 m de altura. El valor máximo del factor de recirculación lo encontramos el día 30 a 5000 m de altura con un valor de 0.9, mientras que el mínimo se encuentra el día 23 a 5000 m también con un valor de 0.03. Ambas medidas se representarán más adelante y ahí se verá mejor cómo la trayectoria del valor mínimo ha seguido prácticamente una línea recta, mientras que la trayectoria del máximo es muy grande en comparación a la distancia que se ha desplazado.

El valor de este factor es muy irregular y no sigue ningún orden en función de la altura, aunque sí se aprecia que los días en los que el huracán tuvo mayores velocidades se alcanzan valores más grandes de este factor. Otra cosa a remarcar es que los puntos de alto factor de recirculación muestran que la trayectoria de las masas de aire a esas alturas fue muy errática y con bucles, como se verá más adelante cuando se representen.

Vamos a ver en primer lugar en la figura (4.2) cómo varía el factor de recirculación a 10, 50 y 100 m sobre el nivel del mar. Como habíamos mencionado anteriormente, estas tres gráficas son prácticamente similares ya que no hay apenas variación en la recirculación en estas alturas. Además se aprecia cómo los días del 25 al 29 el valor de la recirculación es casi constante con valores entre 0.6 y 0.7, mientras que el día 24 se alcanzan los mínimos de aproximadamente 0.15.

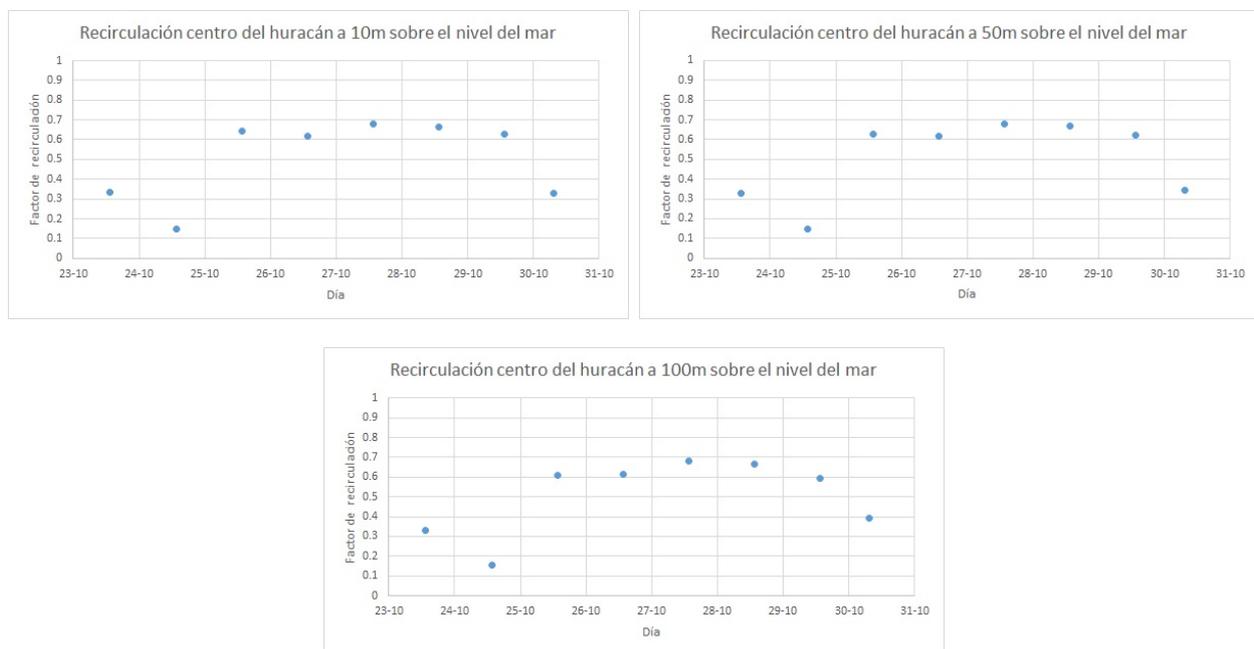


Figura 4.2: Factor de recirculación del huracán Sandy a 10, 50 y 100 m sobre el nivel del mar

Podemos ver ahora el factor de recirculación a 500, 1000, 1500 y 2000 m de altura en la figura (4.3). A 500 y 1000 m se empiezan a notar más variaciones entre días y valores más extremos de 0.83 el día 25. Otra cosa a destacar es cómo es mayor la recirculación los días 26, 27, 28 y 29 a 500 m respecto a 1000 m, mientras que los demás días tienen valores muy similares. En la gráfica de 1500 m se empiezan a ver valores más altos los primeros días del huracán, mayores de 0.4, con un pico de 0.7 el día 25, mientras que los últimos cuatro días se tienen valores mayores de 0.65 con un máximo de 0.83 el día 30. En cuanto a 2000 m, empieza con un valor de 0.56 el día 23, para ir decreciendo los siguientes tres días, y acabar con valores entre 0.7 y 0.8 los últimos cuatro.

Analicemos a continuación la recirculación a 3000, 4000, 5000 y 6000 m sobre el nivel del mar que se muestran en la figura (4.4). A 3000 m hay mucha diferencia entre días, y no hay valores similares varios días seguidos como sí ocurría a otras alturas, aunque sí tiene también su máximo, en este caso de 0.86, el día 25. También es de destacar que a esta altura se alcanza el mayor factor de recirculación del día 23, con un valor de 0.7. A 4000 m el factor de recirculación

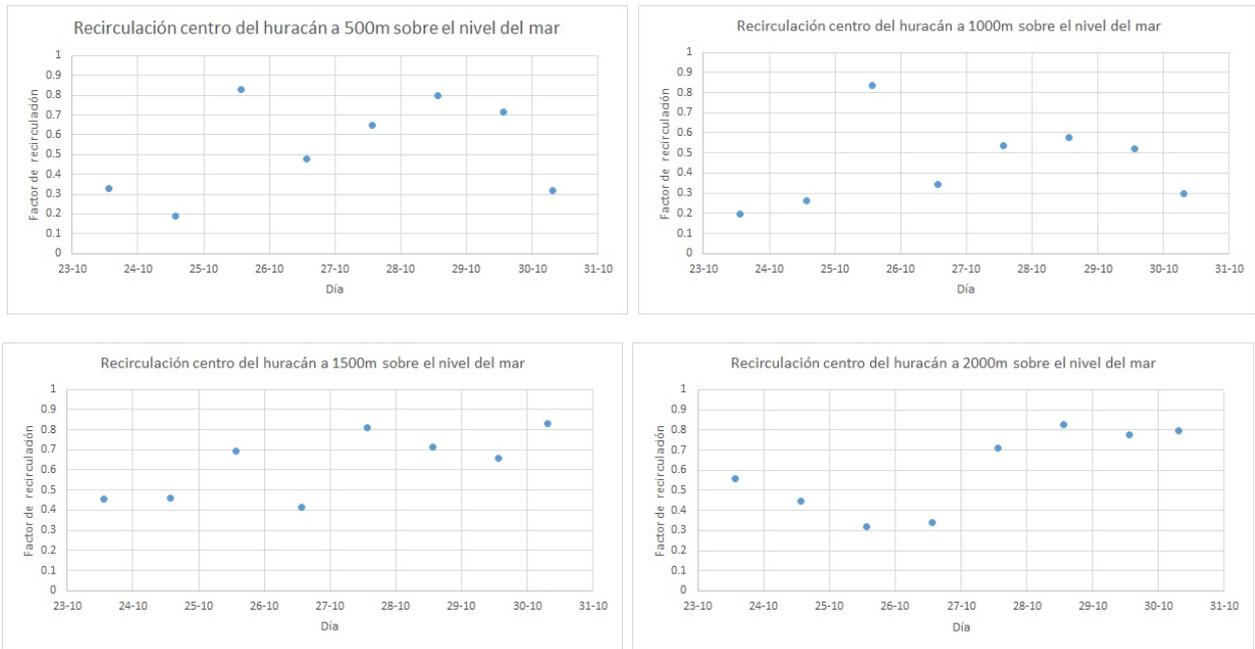


Figura 4.3: Factor de recirculación del huracán Sandy a 500, 1000, 1500 y 2000 m sobre el nivel del mar

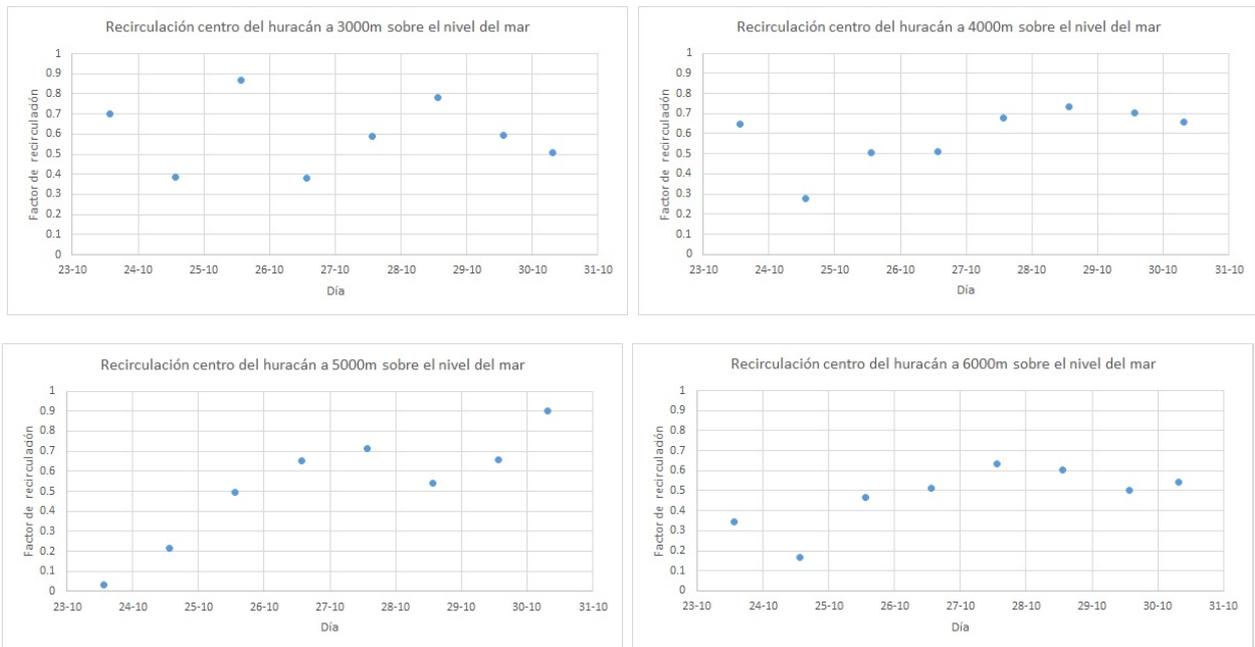


Figura 4.4: Factor de recirculación del huracán Sandy a 3000, 4000, 5000 y 6000 m sobre el nivel del mar

se mantiene aproximadamente con un valor de 0.7 los últimos 4 días, de 0.5 los días 25 y 26, un mínimo de 0.24 el día 24 y un valor muy similar al de 3000 m el día 23. A 5000 m de altitud el factor de recirculación va aumentando su valor conforme avanzan los días desde 0.03 el día 23 hasta 0.71 el día 27, sufre un ligero descenso el día 28, y vuelve a aumentar hasta 0.90 el día

30. Como ya se había comentado anteriormente a esta altura se alcanza el mínimo y máximo de todos los valores del factor de recirculación que se han calculado. A 6000 m se aprecia poca variación entre días, con valores aproximados entre 0.5 y 0.6 entre el día 25 y el 30, con valores más pequeños los dos primeros días.

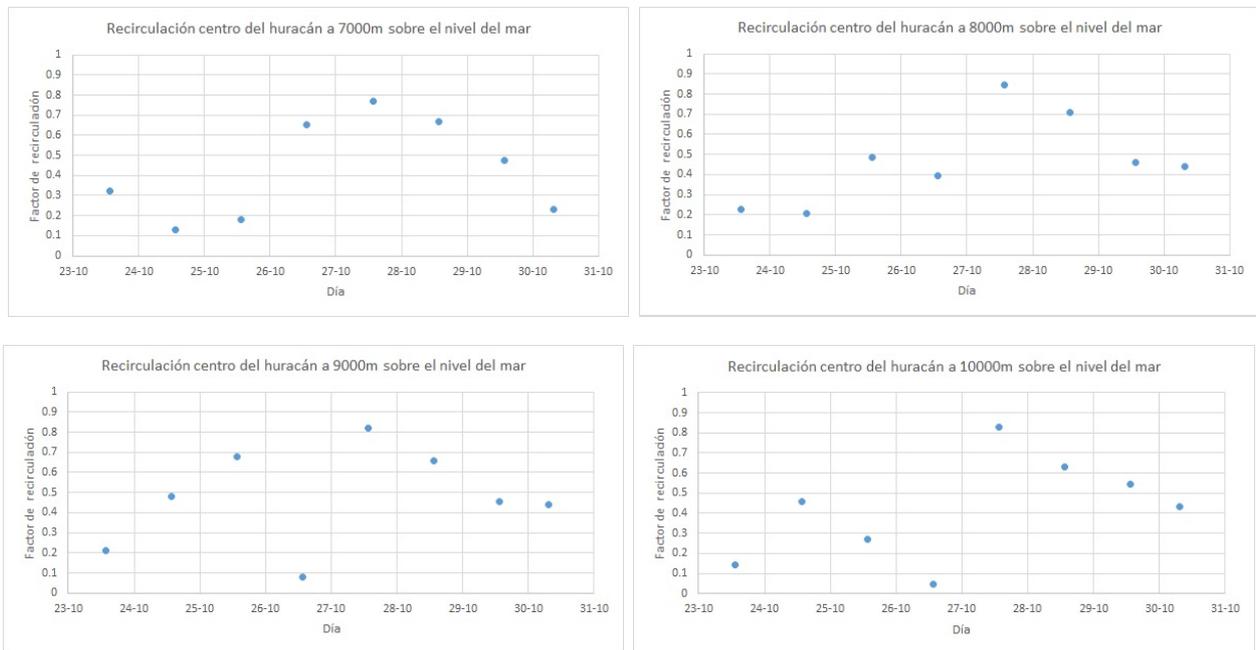


Figura 4.5: Factor de recirculación del huracán Sandy a 7000, 8000, 9000 y 10000 m sobre el nivel del mar

Por último se analizará el factor de recirculación a alturas de 7000, 8000, 9000 y 10000 m, correspondiente a la figura (4.5). Estas cuatro alturas tienen en común que se alcanzó el factor de recirculación máximo el día 27 y que va descendiendo según avanzan los días. También destacan los mínimos que se aprecian a 9000 y 10000 m el día 26 de 0.08 y 0.05 respectivamente que se producen justo el día anterior de alcanzarse el máximo.

Para acabar con el estudio del factor de recirculación en un punto del centro del huracán Sandy, se va a proceder a representar la trayectoria seguida por las masas de aire que se encontraban en el centro del huracán a 10, 1000 y 5000 m en las 24 horas anteriores a encontrarse en dicho punto. Los primeros 4 días se representan en la figura (4.6).

El día 23, aparte de ser el día con menor distancia recorrida por las masas de aire, presenta el mínimo de factor de recirculación mencionado anteriormente. Lo vemos en la trayectoria correspondiente a 5000 m, donde se puede ver cómo la trayectoria recorrida ha sido prácticamente recta, de ahí que el factor de recirculación haya sido tan bajo. El día 24 ya se aprecian mayores distancias de desplazamientos a 10 y 1000 m, aunque no obstante el factor de recirculación no es muy alto ya que la trayectoria es ligeramente curvada con un pequeño giro al final. A 5000 m ya se ve una trayectoria un tanto irregular aunque pudiese ser aproximada por una recta. El día 25 presenta un factor de recirculación de 0.84 a 1000 m de altura, y, como se puede ver en dicha gráfica, la distancia desplazada ha sido muy pequeña si se compara con toda la trayectoria seguida por los vientos. Algo similar ha ocurrido a 10 m aunque la distancia desplazada ha

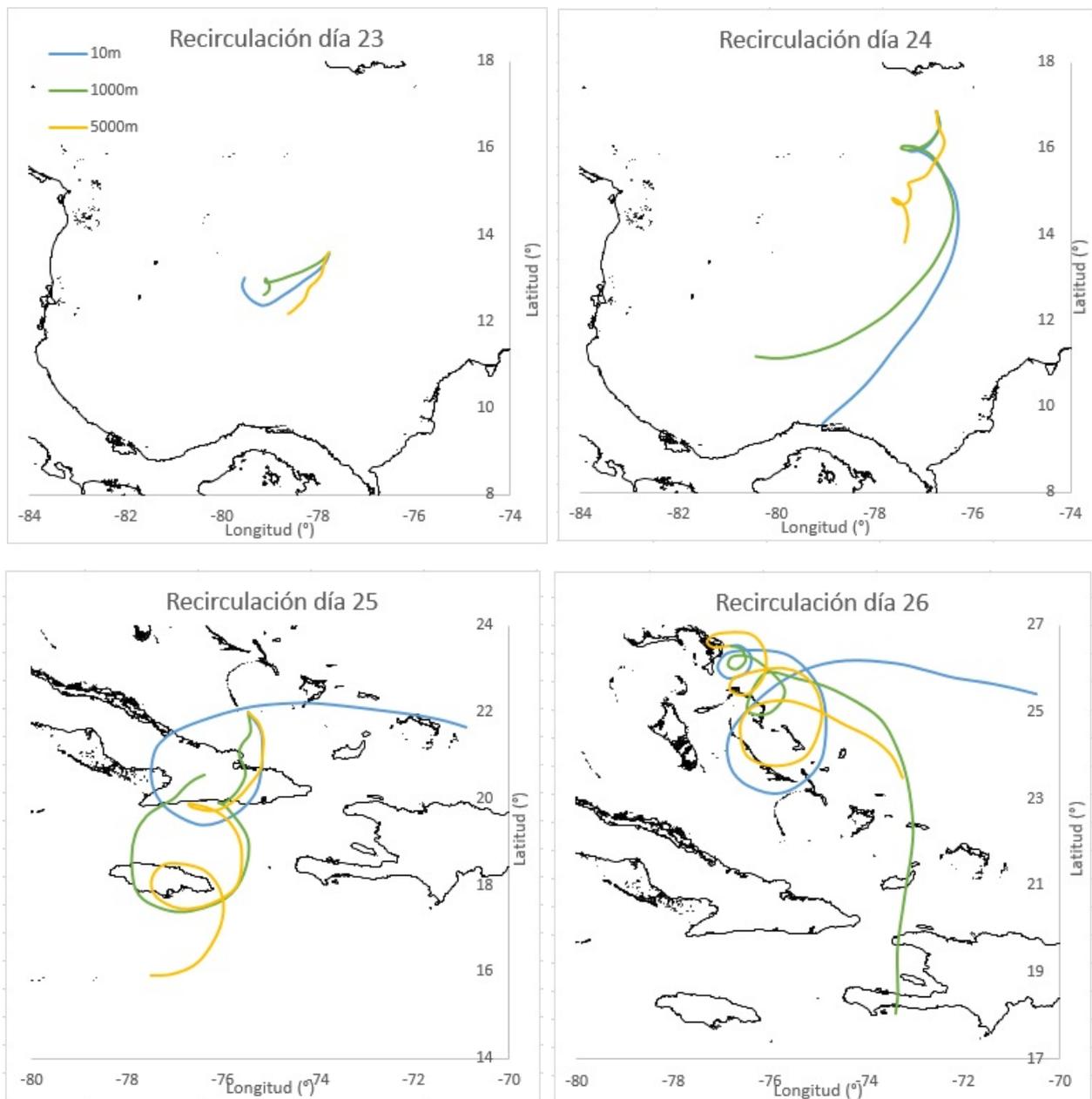


Figura 4.6: Recirculación a 10, 1000 y 5000 m sobre el nivel del mar los días 23, 24, 25 y 26

lado mayor, mientras que a 5000 m se muestra una trayectoria muy irregular con varios giros, aunque de menor factor de recirculación. Trayectorias muy similares a esta última mencionada son las tres del día 26, también muy irregulares y con varios bucles.

Las gráficas correspondientes a los otros cuatro días de huracán se encuentran en la figura (4.7). En estas cuatro gráficas se aprecian detalles muy similares, como las trayectorias a 5000 m en las que aparecen muchos giros dando lugar a factores de recirculación elevados, sobre todo el correspondiente al día 30, ya comentado anteriormente. En cuanto a las trayectorias a 10 y 1000 m, tienen una forma muy parecida, sobre todo el día 30 que son casi idénticas, aunque a 1000 m se aprecian más giros y tienen una forma menos curvada en algunos puntos.

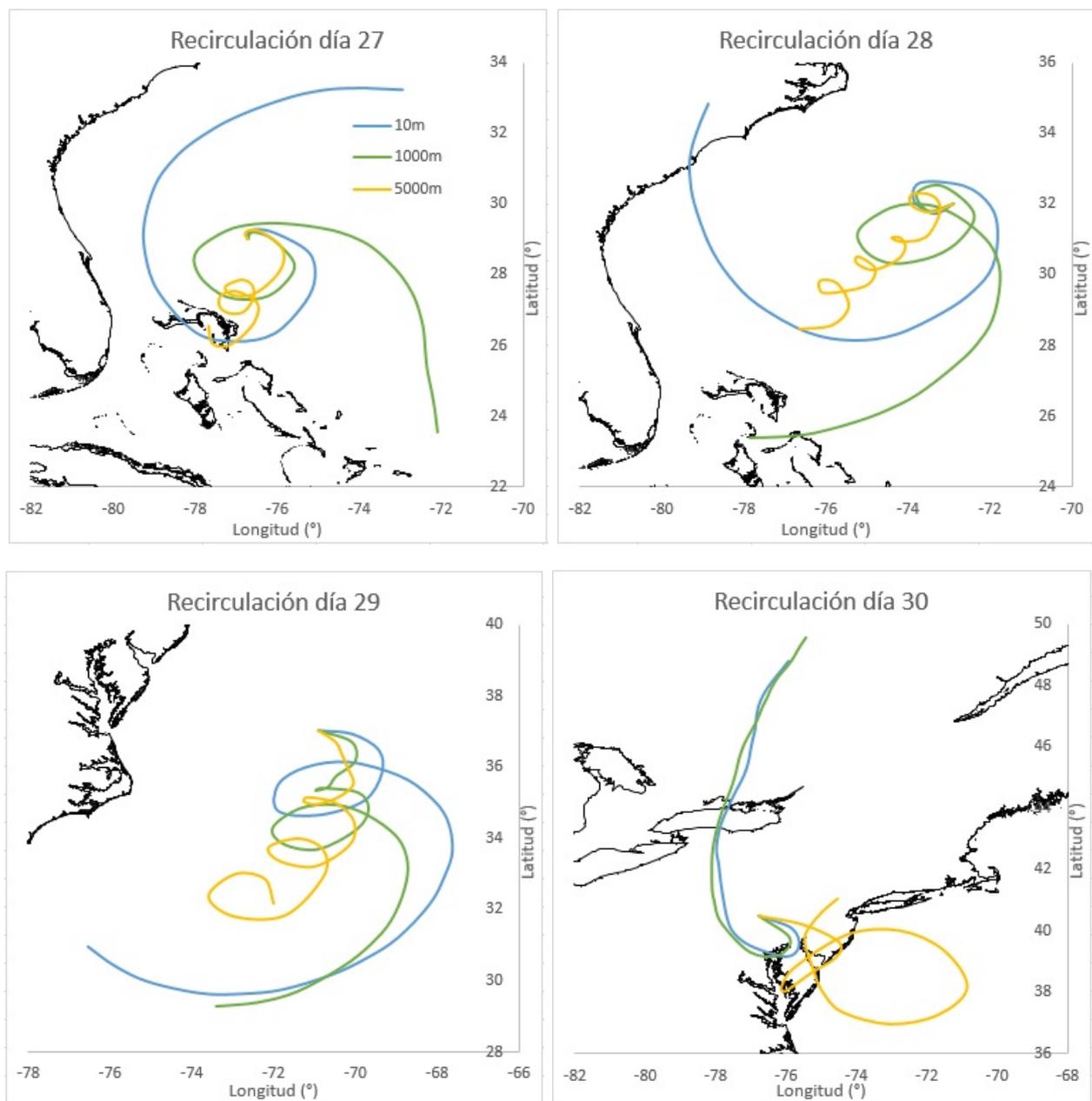


Figura 4.7: Recirculación a 10, 1000 y 5000 m sobre el nivel del mar los días 27, 28, 29 y 30

La conclusión que podemos sacar de esta sección es que hemos visto que el movimiento de las masas de aire situadas en el centro de un huracán es en espiral en alturas bajas por el rozamiento con el suelo, mientras que a altitudes mayores se da lugar a mayores factores de recirculación, trayectorias más irregulares y, como consecuencia de la composición de movimientos de traslación y rotación, la aparición de bucles.

4.2 Recirculación a dos grados de latitud al sur del centro del huracán

Con el propósito de investigar cómo cambian las trayectorias en otro punto del huracán, y si estas trayectorias se simplifican, se procede a realizar el mismo estudio anterior pero esta vez referido a un punto situado a dos grados menos de latitud que el centro del huracán. Los resultados para este punto del factor de recirculación a las distintas alturas estudiadas anteriormente se muestran en la figura (4.8).

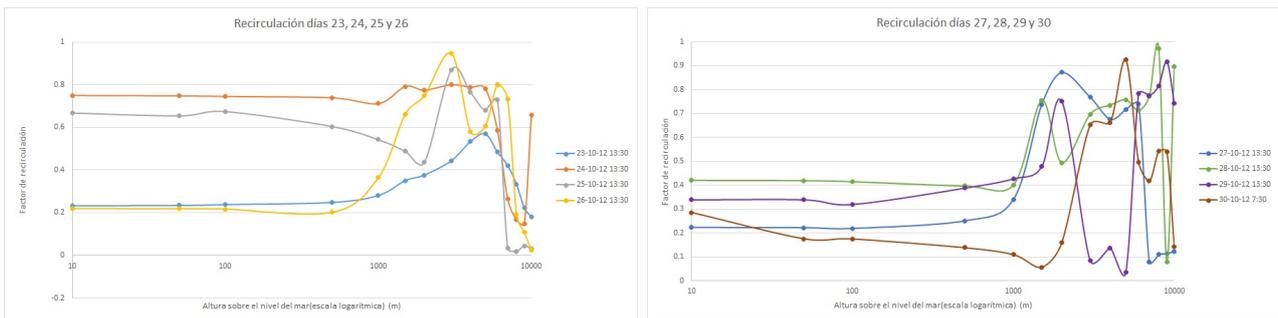


Figura 4.8: Factor de recirculación para distintas alturas sobre el nivel del mar de un punto situado a 2 grados de latitud del centro del huracán Sandy

Estas gráficas son muy similares a las del punto en el centro del huracán, presentando un factor de recirculación casi constante en los primeros 1000 m, en este caso con un máximo de 0,97 a 8000 m de altitud el día 27 y con un mínimo de 0.03 a 3000 m el día 29.

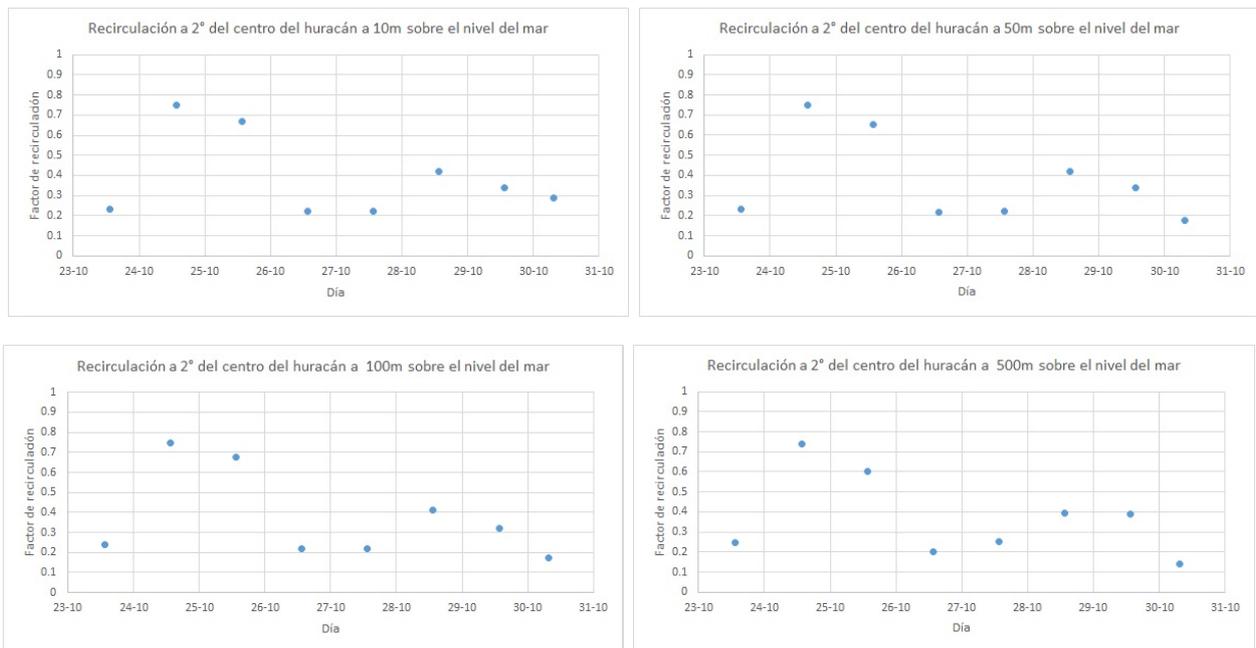


Figura 4.9: Factor de recirculación de un punto situado a 2 grados de latitud del centro del huracán Sandy a 10, 50, 100 y 500 m sobre el nivel del mar

Al igual que se hizo anteriormente, desglosamos esta gráfica en función de las distintas alturas. Comenzamos con la figura (4.9) correspondiente a las alturas sobre el nivel del mar de 10, 50, 100 y 500 m. Estas cuatro gráficas son muy similares, con valores muy bajos del factor de recirculación por debajo de 0.4 todos los días a excepción del día 24 donde se alcanzan las máximas y el día 25.

En la figura (4.10) vemos las alturas a 1000, 1500, 2000 y 3000 m sobre el nivel del mar. A 1000 m la gráfica es similar a las cuatro anteriores, ya que tiene valores muy similares. En las otras tres alturas ya se empiezan a dar valores más altos del factor de recirculación, en especial a 3000 m, ya que en seis de los ocho días se dan valores mayores de 0.6, y se alcanza un máximo de 0.95 el día 26.

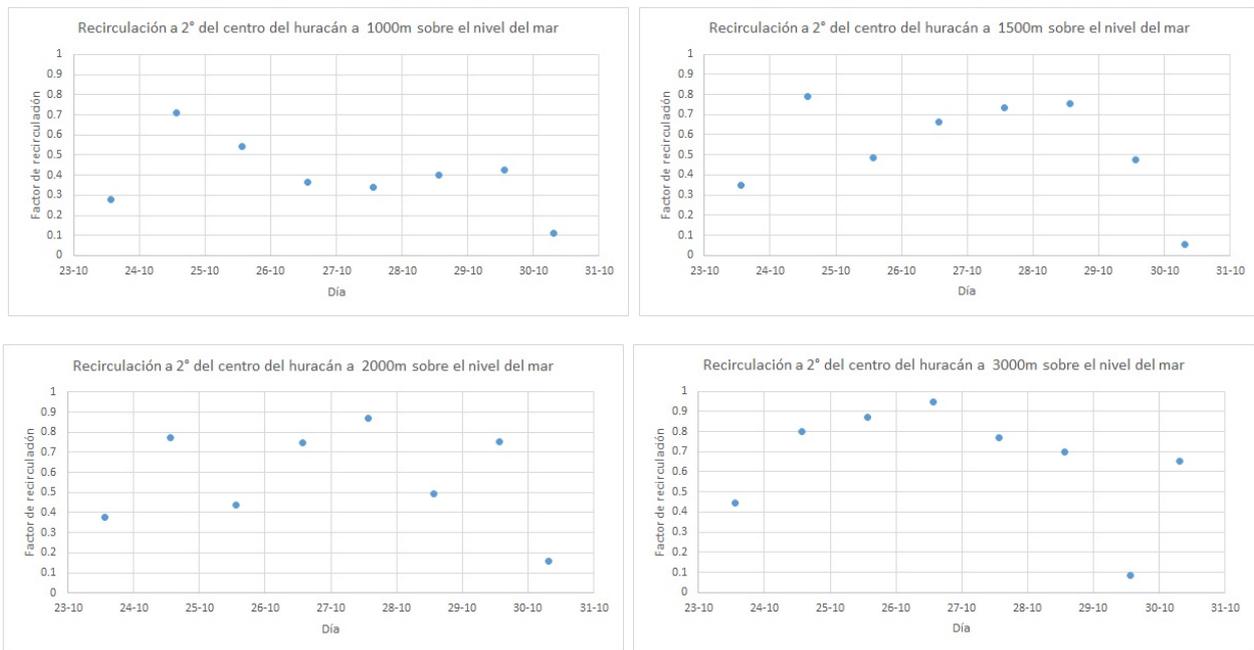


Figura 4.10: Factor de recirculación de un punto situado a 2 grados de latitud del centro del huracán Sandy a 1000, 1500, 2000 y 3000 m sobre el nivel del mar

Las altitudes de 3000, 4000, 5000 y 6000 m las vemos en la figura (4.11). Las correspondientes a altitud 4000 y 5000 m presentan un aspecto muy similar a la gráfica de 3000 m, con valores superiores a 0.5 a excepción del día 29 donde se aprecia un mínimo que ronda un factor de recirculación de 0.1. A 6000 m se tienen todos los días valores comprendidos entre 0.5 y 0.8, mientras que a 7000 m hay valores mucho más pequeños, quitando los días 26, 28 y 29 que se dan valores de aproximadamente 0.75.

Por último, comentaremos las alturas de 8000, 9000 y 10000 m correspondientes a la figura (4.12). A estas altitudes se dan en general valores más pequeños que en las altitudes anteriormente comentadas, la mayoría de días por debajo de 0.3, a excepción de los últimos tres días donde se aprecian valores mayores, destacando especialmente el valor de 0.97 a 8000 m de altitud el día 28.

Al igual que se hizo anteriormente con el factor de recirculación en el centro del huracán, se va a representar la trayectoria sufrida por las masas de aire a alturas de 10, 1000 y 5000

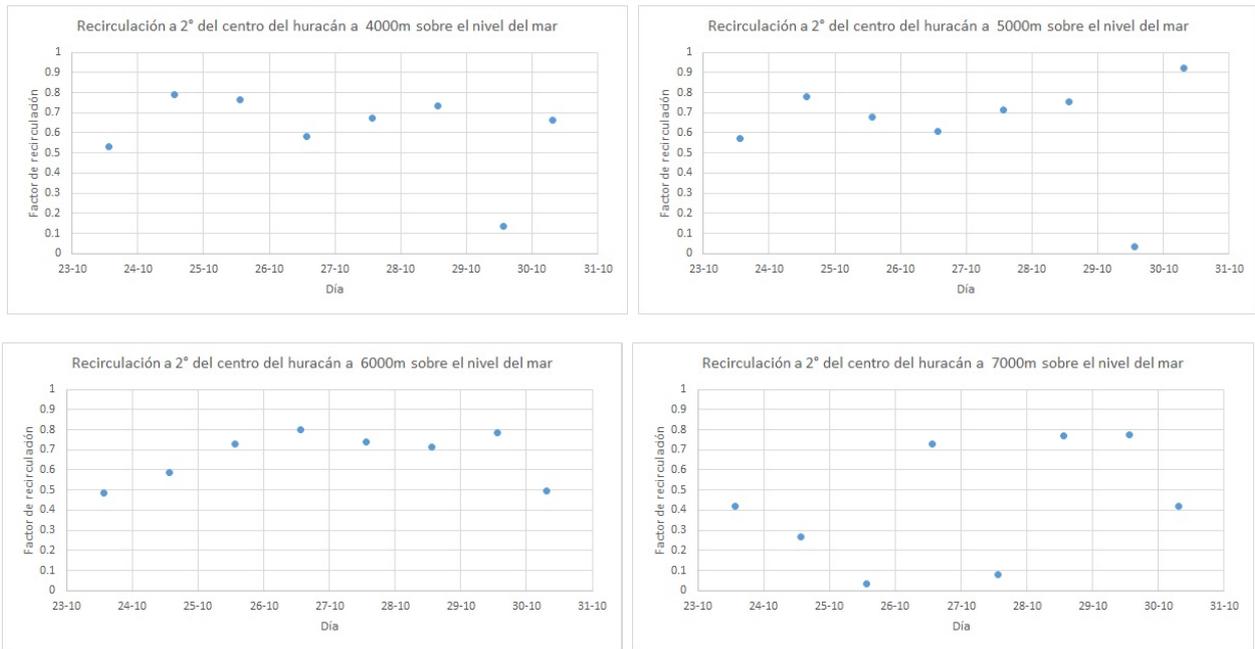


Figura 4.11: Factor de recirculación de un punto situado a 2 grados de latitud del centro del huracán Sandy a 4000, 5000, 6000 y 7000 m sobre el nivel del mar

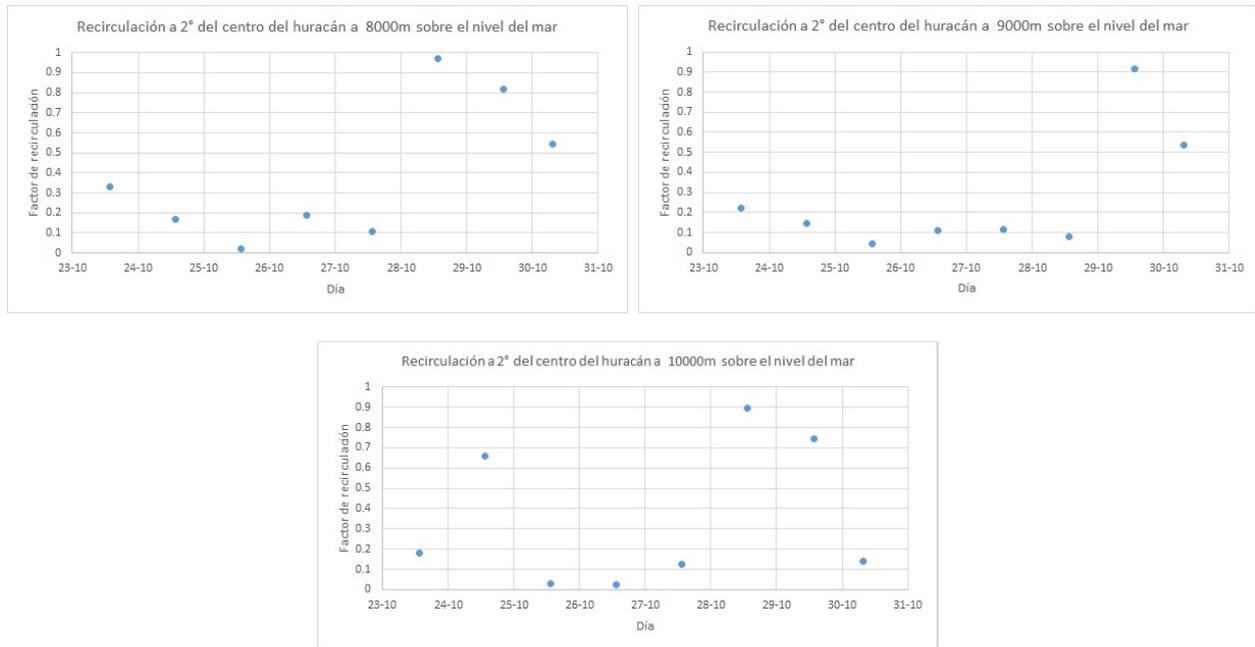


Figura 4.12: Factor de recirculación de un punto situado a 2 grados de latitud del centro del huracán Sandy a 8000, 9000 y 10000 m sobre el nivel del mar

m sobre el nivel del mar. Los primeros cuatro días se representan en la figura (4.13) y los últimos cuatro en (4.14). En el primer día se ven factores de recirculación muy pequeños de aproximadamente 0.25 en las dos primeras alturas y de 0.5 a 5000 m. Este factor aumenta hasta 0.75 el día siguiente en las tres altitudes, que presentan trayectorias muy similares. A 5000 m

el día 25 se empieza a ver una trayectoria con varios giros, mientras que a las otras dos alturas no se produce giro alguno. El día 26 presenta trayectorias muy similares a los anteriores días a 10 y 1000 m, mientras que a 5000 m tiene una trayectoria muy irregular en las últimas horas de desplazamiento.

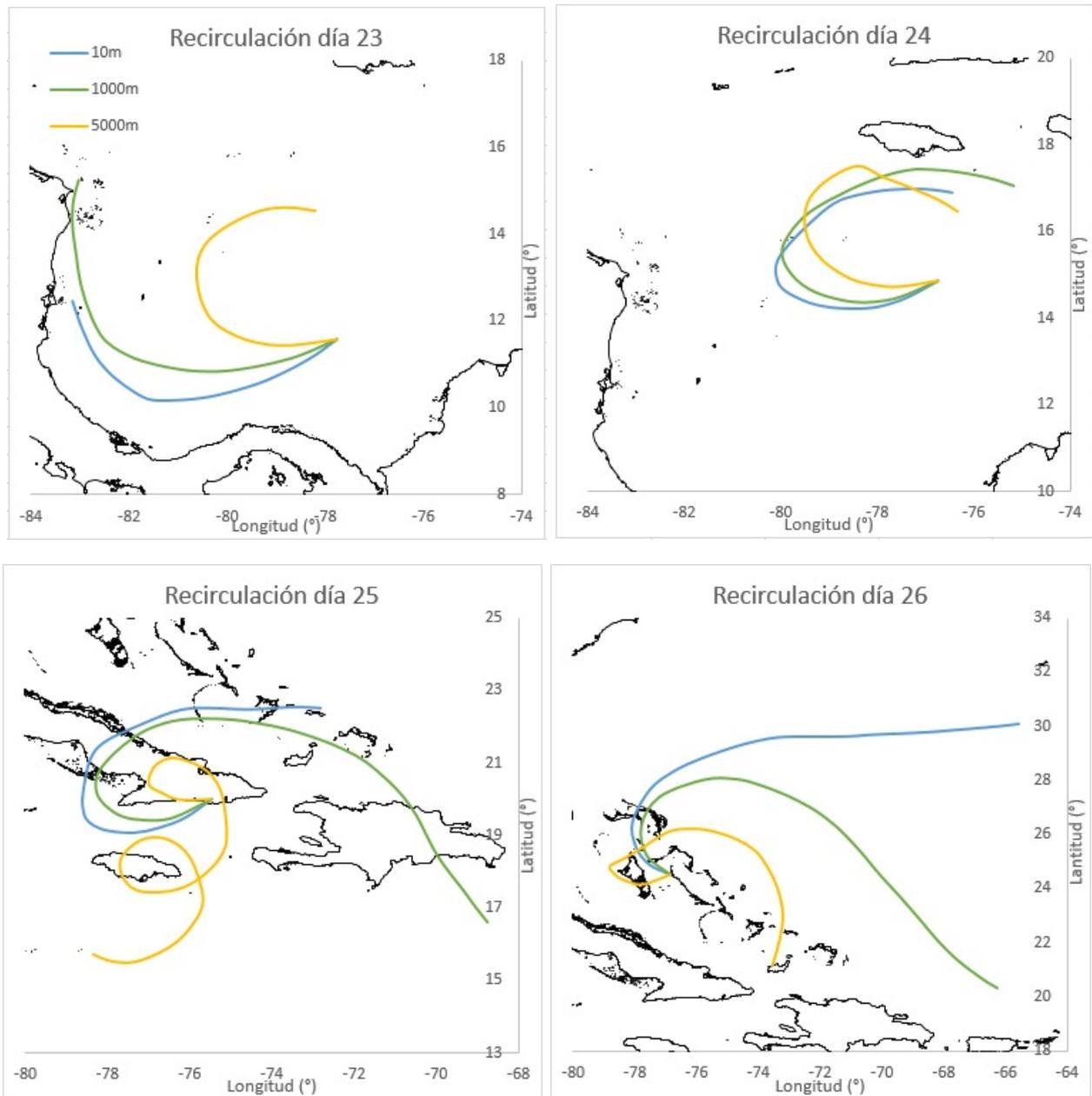


Figura 4.13: Recirculación a 10, 1000 y 5000 m sobre el nivel de un punto situado a 2 grados de latitud del centro del huracán Sandy del mar los días 23, 24, 25 y 26

La gráfica del día 27 presenta un aspecto muy similar a la del día anterior, con valores pequeños del factor de recirculación a 10 y 1000 m y un valor de 0.7 a 5000 m. En el día 28 se mantiene esta tendencia de valores pequeños en las dos primeras alturas y valor grande en la última con factores de recirculación de 0.4 y 0.75 respectivamente. Esta tendencia se invierte

el día siguiente, donde se ve una trayectoria casi recta a 5000 m correspondiente a un valor de 0.03, un valor muy alejado del que se alcanza el último día del huracán a esa altitud de de 0.92.

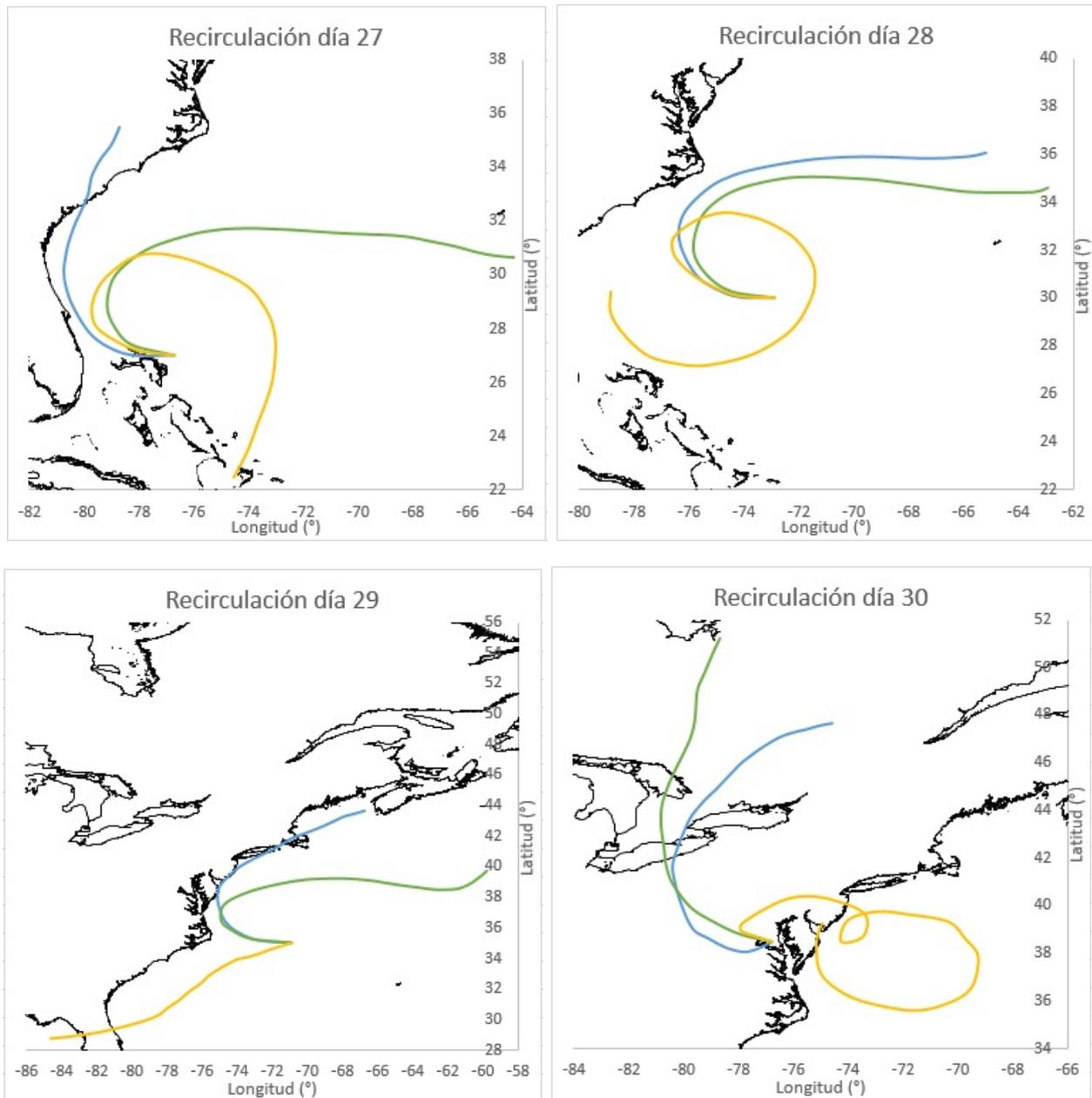


Figura 4.14: Recirculación a 10, 1000 y 5000 m sobre el nivel del mar de un punto situado a 2 grados de latitud del centro del huracán Sandy los días 27, 28, 29 y 30

La conclusión obtenida en esta sección es similar a la obtenida en el centro, ya que se siguen viendo trayectorias más irregulares y de factores de recirculación más extremos a alturas grandes que en las más próximas al mar. Sin embargo, en esta zona se han obtenido trayectorias más sencillas, en especial en la representación a 10 y 1000 m, debido a que, en general, la velocidad del viento es menor a medida que nos alejamos del centro del huracán.

Conclusiones

Se ha analizado la base de datos de *National Oceanic and Atmospheric Administration* estudiando la distribución temporal y geográfica de más de 200 huracanes entre 1994 y 2013. Esta base de datos se centra en la cuenca atlántica y la mayor parte de los huracanes se producen en los meses de agosto y septiembre. Además la base de datos permite un análisis detallado durante los años 2004, 2005 y 2008. Se seleccionaron 24 huracanes con datos suficientes como para realizar un análisis exhaustivo de su velocidad, superficie y trayectoria. De dicho grupo de huracanes, el huracán Sandy de 2012 fue el que suscitó un mayor interés.

De este huracán se ha estudiado en un primer lugar su trayectoria y los países por los que transcurrió. Las velocidades media y mediana han reflejado dos etapas en la vida del huracán, la primera los días 23 y 24 en la que se comienza a formar el huracán y la segunda a partir del día 25 con la media y la mediana aumentando en 5 m/s. El análisis estadístico de la velocidad reveló una evolución débilmente lineal de los indicadores robustos de dispersión, hacia valores mayores, y de simetría, hacia distribuciones más simétricas.

Las velocidades se describieron mediante la distribución de Laplace, cuyo máximo fue especialmente marcado los días 23 (al inicio), 27 (durante su evolución) y 30 (próximo a su fin), lo que indica una evolución fluctuante.

Además, se ha estudiado el mapa de velocidades de sus vientos, mostrando la superficie que ocupa cada categoría de la escala Saffir-Simpson. El radio del huracán aumentó linealmente hasta que decreció de forma brusca al final.

Por último se calculó el factor de recirculación a distintas alturas sobre el nivel del mar de entre 10 y 10000 m en un punto situado en el centro del huracán y otro a 2 grados de latitud para estudiar cómo evolucionaron las trayectorias del aire. También se representaron las trayectorias del aire para llegar al punto de estudio para 10, 1000 y 5000 m sobre el nivel del mar. Los factores de recirculación son similares por debajo de los 1000 m de altura y las trayectorias del aire son espirales en las menores alturas mientras que en la troposfera media se convierten en bucles por la composición de la traslación de huracán y la rotación en torno a su centro.

Bibliografía

- [1] GORDON, A., GRACE, W., SCHWERDTFEGER, P. AND BYRON-SCOTT, R., *Dynamic Meteorology-A Basic Course*, Arnold, London, 325 p, 1998.
- [2] KRISHNAMURTI, T.N., STEFANOVA, L. AND MISRA, V., *Tropical Meteorology: An Introduction*, Springer, New York, 423 p., 2013.
- [3] GARCÍA-HERRERA, R., GIMENO, L., RIBERA, P., HERNÁNDEZ, E., *New records of Atlantic hurricanes from Spanish documentary sources*, Journal of Geophysical Research D: Atmospheres, 110 (3), pp. 1-7, 2005.
- [4] CHENOWETH, M., *Objective classification of historical tropical cyclone intensity*, Journal of Geophysical Research Atmospheres, 112 (5), art. no. D05101, 2007.
- [5] SIMPSON, R., *The hurricane disaster potential scale*, Weatherwise, 27, 169-186, 1974.
- [6] KANTHA, L., *Tropical cyclone destructive potential by integrated kinetic energy*, Bulletin of the American Meteorological Society, 89 (2), pp. 219-221, 2008.
- [7] KANTHA, L., *Time to replace the Saffir-Simpson Hurricane Scale?*, Eos, 87 (1), pp. 5-6, 2006.
- [8] JORDAN II, M.R. AND CLAYSON, C.A., *Evaluating the usefulness of a new set of hurricane classification indices*, Monthly Weather Review, 136 (12), pp. 5234-5238, 2008.
- [9] POWELL, M.D. AND REINHOLD, T.A., *Tropical Cyclone Destructive Potencial by Integrated Kinetic Energy*, American Meteorological Society, pp. 513-526 , 2007.
- [10] SIMPSON, R. AND SAFFIR, H. , *Tropical Cyclone Destructive Potencial by Integrated Kinetic Energy*, Bulletin of the American Meteorological Society, 88 (11), pp. 1799-1800, 2007.
- [11] REZAPOUR, M. AND BALDOCK, T.E, *Classification of hurricane hazards: The importance of rainfall*, Weather and Forecasting, 29 (6), pp. 1319-1331, 2014.
- [12] DOTZEK, N., *Derivation of physically motivated wind speed scales*, Atmospheric Research, 93 (1-3), pp. 564-574.1, 2009.
- [13] KRON, W., *Coasts: The high-risk areas of the world*, Natural Hazards, 66 (3), pp. 1363-1382, 2013.

- [14] NEGRÓN-JUÁREZ, R., BAKER, D.B., ZENG, H., HENKEL, T.K. AND CHAMBERS, J.Q., *Assessing hurricane-induced tree mortality in U.S. Gulf Coast forest ecosystems*, Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 115 (4), art. no. G04030, 2010.
- [15] TAGHON, G.L., RAMEY, P.A., FULLER, C.M., PETRECCA, R.F. AND GRASSLE, J.P., *Benthic Community Structure and Sediment Properties in Barnegat Bay, New Jersey, Before and After Hurricane Sandy*, Estuaries and Coasts, 40 (1), pp. 160-172, 2017.
- [16] ELSEY-QUIRK, T., *Impact of Hurricane Sandy on salt marshes of New jersey*, Estuarine, Coastal and Shelf Science, 183, pp. 235-248, 2016.
- [17] FUSSELL, E., CURRAN, S.R., DUNBAR, M.D., BABB, M.A., THOMPSON, L. AND MEIJER-IRONS, J., *Weather-Related Hazards and Population Change: A Study of Hurricanes and Tropical Storms in the United States, 1980–2012*, Annals of the American Academy of Political and Social Science, 669 (1), pp. 146-167, 2017.
- [18] KANTHA, L., *Classification of hurricanes: Lessons from Katrina, Ike, Irene, Isaac and Sandy*, Ocean Engineering, 70, pp. 124-128, 2013.
- [19] MOYER, A.C., EVANS, J.L. AND POWELL, M., *Comparison of observed gale radius statistics*, Meteorology and Atmospheric Physics, 97 (1-4), pp. 41-55, 2007.
- [20] CHEN, Y. AND YAU, M.K., *Asymmetric structures in a simulated landfalling hurricane*, Journal of the Atmospheric Sciences, 60 (18), pp. 2294-2312, 2003.
- [21] PERSING, J., MONTGOMERY, M.T., MCWILLIAMS, J.C. AND SMITH, R.K., *Asymmetric and axisymmetric dynamics of tropical cyclones*, Atmospheric Chemistry and Physics, 13 (24), pp. 12299-12341, 2013.
- [22] DEMARIA, M., KNAFF, J.A., KNABB, R., LAUER, C., SAMPSON, C.R. AND DEMARIA, R.T., *A new method for estimating tropical cyclone wind speed probabilities*, Weather and Forecasting, 24 (6), pp. 1573-1591, 2009.
- [23] SONG, L., CHEN, W., WANG, B., ZHI, S. AND LIU, A., *Characteristics of wind profiles in the landfalling typhoon boundary layer*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 149, pp. 77-88, 2016.
- [24] VIGH, J.L., KNAFF, J.A. AND SCHUBERT, W.H., *A climatology of hurricane eye formation*, Monthly Weather Review, 140 (5), pp. 1405-1426, 2012.
- [25] KOSSIN, J.P., KNAFF, J.A., BERGER, H.I., HERNDON, D.C., CRAM, T.A., VELDEN, C.S., MURNANE, R.J. AND HAWKINS, J.D., *Estimating hurricane wind structure in the absence of aircraft reconnaissance*, Weather and Forecasting, 22 (1), pp. 89-101, 2007.
- [26] EMANUEL, K., SUNDARARAJAN, R., AND WILLIAMS, J., *Hurricanes and global warming: Results from Downscaling IPCC AR4 Simulations*, Cambridge, Massachusetts, 2007.
- [27] WALSH, K.J.E., MCBRIDE, J.L., KLOTZBACH, P.J., BALACHANDRAN, S., CAMARGO, S.J., HOLLAND, G., KNUTSON, T.R., KOSSIN, J.P., LEE, T.-CHEUNG., SOBEL, A. AND SUGI, M., *Tropical cyclones and climate change*, Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 7 (1), pp. 65-89, 2016.

- [28] DÍAZ-HERNÁNDEZ, G., MENDEZ, F.J. AND MÍNGUEZ, R., *Numerical analysis and diagnosis of the hydrodynamic effects produced by Hurricane Gordon along the coast of Spain*, Weather and Forecasting, 29 (3), pp. 666-683, 2014.
- [29] TOUS, M. AND ROMERO, R., *Medicane: cataloguing criteria and exploration of meteorological environments*, Tethys 8, 53-61, 2011.
- [30] TOUS, M. AND ROMERO, R., *Meteorological environments associated with medicane development*, International Journal of Climatology, 33 (1), pp. 1-14, 2013.
- [31] SIRDAS, S.A., TUNCAY ÖZDEMİR, E., SEZEN, İ., EFE, B. AND KUMAR, V., *Devastating extreme Mediterranean cyclone's impacts in Turkey*, Natural Hazards, 87 (1), pp. 255-286, 2017.
- [32] NASTOS, P.T., KARAVANA PAPADIMOU, K. AND MATSANGOURAS, I.T., *Mediterranean tropical-like cyclones: Impacts and composite daily means and anomalies of synoptic patterns*, Atmospheric Research, 208, pp. 156-166, 2018.
- [33] PYTHAROULIS, I., *Analysis of a Mediterranean tropical-like cyclone and its sensitivity to the sea surface temperatures*, Atmospheric Research, 208, pp. 167-179, 2018.
- [34] JAKŠIĆ, N., *Basic properties and parameter estimation of three parameter probability distributions of the Laplace and Cauchy type*, Kolektor Etra, Ljubljana - Črnuče, 2014.
- [35] CENTRE FOR GLOBAL ENVIRONMENTAL RESEARCH, Meteorological Data Explorer: <http://db.cger.nies.go.jp/metex/index.html>
- [36] SNYDER, J.P., *Map projections: A working manual*, U.S. Geological Survey Professional Paper 1395, 1987.
- [37] ALLWINE, K.J. AND WHITEMAN, C.D., *Single-Station Integral Measures of Atmospheric Stagnation, Recirculation and Ventilation*, Pacific Northwest Laboratory, Richland, Washington, 1993.
- [38] NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION, <http://www.noaa.gov/>
- [39] NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION: RMS Hwind Legacy Archive, <http://www.rms.com/models/hwind/legacy-archive>
- [40] BLAKE, E.S., KIMBERLAIN, T.B., BERG, R.J., CANGIALOSI, J.P. AND BEVEN II, J.L., *Tropical Cyclone Report Hurricane Sandy 22-29 October 2012*, National Hurricane Center, 2013 .

Índice de figuras

1.1	Sesgo de una distribución de datos.	7
1.2	Curtosis de una distribución de datos.	8
1.3	Distribución de Laplace para cinco combinaciones de valores de μ y b	9
1.4	Factor de recirculación.	10
1.5	Factor de recirculación.	11
2.1	Distribución de los huracanes dentro de la base de datos.	12
2.2	Distribución de los archivos correspondientes a cada huracán.	13
2.3	Ejemplo de fichero <i>GriddenData</i>	14
2.4	Número de huracanes en la base de datos entre 1994 y 2013 separados en función de la cuenca a la que pertenecen.	15
2.5	Número de huracanes en la base de datos entre 1994 y 2013 separados en función de su mes de inicio.	15
2.6	Número de ficheros <i>GriddenData</i> en la base de datos en cada temporada de huracanes.	16
2.7	Promedio de ficheros <i>GriddenData</i> por huracán y por año.	16
2.8	Resultados web a 27 de febrero de 2017 de cada huracán.	18
3.1	Trayectoria del huracán Sandy	20
3.2	Trayectoria ampliada del huracán Sandy	20
3.3	Media de la velocidad del viento del huracán Sandy	22
3.4	Mediana de la velocidad del viento del huracán Sandy	22
3.5	Percentiles 90, 95, 99, 100 de la velocidad del viento del huracán Sandy	23
3.6	Desviación estándar de la velocidad del viento del huracán Sandy	24
3.7	Rango intercuartílico de la velocidad del viento del huracán Sandy	24
3.8	Sesgo de la velocidad del viento del huracán Sandy	25
3.9	Índice de Yule-Kendall de la velocidad del viento del huracán Sandy	25
3.10	Curtosis de la velocidad del viento del huracán Sandy	26
3.11	Curtosis robusta de la velocidad del viento del huracán Sandy	26
3.12	Parámetro b de la distribución de Laplace de la velocidad del viento del huracán Sandy	27
3.13	Histograma y distribución de Laplace de la velocidad del viento del huracán Sandy los días 24 y 27 de octubre de 2012 a las 13:30	28
3.14	Distribución de Laplace de la velocidad del viento del huracán Sandy	28
3.15	Mapas de velocidades del huracán Sandy	29
3.16	Mapas de velocidades del huracán Sandy	30

3.17	Mapas de velocidades del huracán Sandy	31
3.18	Mapa de colores en función de la escala Saffir-Simpson	32
3.19	Superficie del huracán Sandy con categoría Tormenta Tropical	33
3.20	Superficie del huracán Sandy con categoría 1	33
3.21	Superficie del huracán Sandy con categoría 2	33
3.22	Superficie del huracán Sandy con categoría igual o mayor que Tormenta Tropical	34
3.23	Superficie del huracán Sandy con categoría igual o mayor que 1	34
3.24	Radio del huracán Sandy	35
4.1	Factor de recirculación para distintas alturas sobre el nivel del mar de un punto situado en el centro del huracán Sandy	36
4.2	Factor de recirculación del huracán Sandy a 10, 50 y 100 m sobre el nivel del mar	37
4.3	Factor de recirculación del huracán Sandy a 500, 1000, 1500 y 2000 m sobre el nivel del mar	38
4.4	Factor de recirculación del huracán Sandy a 3000, 4000, 5000 y 6000 m sobre el nivel del mar	38
4.5	Factor de recirculación del huracán Sandy a 7000, 8000, 9000 y 10000 m sobre el nivel del mar	39
4.6	Recirculación a 10, 1000 y 5000 m sobre el nivel del mar los días 23, 24, 25 y 26	40
4.7	Recirculación a 10, 1000 y 5000 m sobre el nivel del mar los días 27, 28, 29 y 30	41
4.8	Factor de recirculación para distintas alturas sobre el nivel del mar de un punto situado a 2 grados de latitud del centro del huracán Sandy	42
4.9	Factor de recirculación de un punto situado a 2 grados de latitud del centro del huracán Sandy a 10, 50, 100 y 500 m sobre el nivel del mar	42
4.10	Factor de recirculación de un punto situado a 2 grados de latitud del centro del huracán Sandy a 1000, 1500, 2000 y 3000 m sobre el nivel del mar	43
4.11	Factor de recirculación de un punto situado a 2 grados de latitud del centro del huracán Sandy a 4000, 5000, 6000 y 7000 m sobre el nivel del mar	44
4.12	Factor de recirculación de un punto situado a 2 grados de latitud del centro del huracán Sandy a 8000, 9000 y 10000 m sobre el nivel del mar	44
4.13	Recirculación a 10, 1000 y 5000 m sobre el nivel de un punto situado a 2 grados de latitud del centro del huracán Sandy del mar los días 23, 24, 25 y 26	45
4.14	Recirculación a 10, 1000 y 5000 m sobre el nivel del mar de un punto situado a 2 grados de latitud del centro del huracán Sandy los días 27, 28, 29 y 30	46