

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN  
CIENCIA Y TECNOLOGÍA ESPACIAL**

**TRABAJO FIN DE MÁSTER**

***EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LAS ONDAS  
CIRCUMPOLARES DE JÚPITER CON  
IMÁGENES DEL TELESCOPIO ESPACIAL  
HUBBLE***

**Estudiante**  
**Director/Directora**  
**Departamento**  
**Curso académico**

*Ruiz, Gordón, Amaia María*  
*Barrado, Izagirre, Naiara*  
**Física Aplicada I**  
*2019-2020*

*Bilbao, 15, Septiembre, 2020*



# Resumen

Júpiter tiene en sus zonas polares una capa de nieblas visibles en las longitudes de onda del ultravioleta y de absorción del metano, confinadas por un patrón ondulatorio que es más definido en las observaciones del metano. A este conjunto de ondas se las conoce como ondas circumpolares por su disposición alrededor de los polos del planeta, y han sido estudiados previamente por [Sánchez-Lavega et al. \(1998\)](#), [Vincent et al. \(2000\)](#) y [Barrado-Izagirre et al. \(2008\)](#). En este trabajo hemos ampliado estos estudios midiendo las características de las ondas en años posteriores y estudiando la evolución en el tiempo de las mismas. Además, se ha realizado una interpretación en términos de onda de Rossby de la onda del hemisferio sur observada en el filtro de absorción del metano. Las imágenes que se han usado para el estudio fueron capturadas por la cámara Wide Field Camera 3 del Telescopio Espacial Hubble.

Jupiter's polar zones have a cloud layer visible in the ultraviolet wavelengths and methane absorption, confined by a wave pattern that is more defined in the methane observations. This ensemble waves is known as circumpolar waves due to arrangement around the planet's poles, and it had previously been studied by [Sánchez-Lavega et al. \(1998\)](#), [Vincent et al. \(2000\)](#) and [Barrado-Izagirre et al. \(2008\)](#). In this research, we have expanded these studies by measuring the characteristics of waves in later years and examining their temporal evolution. In addition, we have made an interpretation in terms of Rossby waves of the southern hemisphere wave observed in the methane absorption filter. The images used for the study were captured by the Hubble Space Telescope's Wide Field Camera 3.

Jupiterrek, bere zona polarretan, ultramorea eta metano uhin luzeratan ikusgarria den laino geruza bat du uhin-patroi batek mugatuta, uhin-patroi hau metanoaren behaketetan definituago dago. Uhin multzo honi uhin zirkunpolarrak bezala ezagutzen zaie planetaren poloen inguruan daukaten antolamenduagatik eta aurretik Sanchez-Lavega, Vincente eta Barrado-Izagirre-ek aztertu dituzte. Lan honetan ikerketa hauek zabaldu ditugu azken urteetako uhinen ezaugarriak neurtuz eta haien eboluzio tenporala aztertuz. Horrez gain, metanoaren filtroan behatutako hego hemisferioko uhinaren Rossby uhinaren interpretazioa egin da. Ikerketarako erabilitako irudiak Hubble Espazio Teleskopioaren Wide Field Camera 3 kamerak jasotakoak dira.

**Palabras clave:** Júpiter, atmósferas planetarias, ondas planetarias, ondas circumpolares, proyección polar, planisferio, perfil de vientos, características de las ondas circumpolares, onda de Rossby, Hubble, HST

# Índice general

<b>Resumen</b>	<b>III</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>v</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>vi</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Júpiter	1
1.1.1. Descripción de la atmósfera de Júpiter	3
1.2. Ondas	7
1.2.1. Ondas circumpolares en Júpiter	8
1.3. Objetivos	8
<b>2. Observaciones</b>	<b>9</b>
2.1. Misiones a Júpiter	9
2.1.1. Misiones finalizadas	9
2.1.2. Misiones en activo	10
2.1.3. Misiones futuras	11
2.2. Telescopio Espacial Hubble	12
2.2.1. Wide Field Camera 3	14
<b>3. Metodología</b>	<b>16</b>
3.1. Navegación de imágenes	16
3.2. Proyecciones Polares	17
3.3. Proyecciones Cilíndricas	22
3.4. Análisis de imágenes	23
3.5. Perfiles de vientos	24
<b>4. Resultados</b>	<b>26</b>
4.1. Proyecciones Polares	26
4.2. Perfiles de vientos	32
4.3. Ondas circumpolares	36
4.3.1. Características de las ondas circumpolares	42
<b>5. Estudio de la Onda de Rossby</b>	<b>47</b>
5.1. Introducción	47
5.2. Ondas de Rossby Barotrópicas	50

5.3. Onda de Rossby tridimensional . . . . .	51
5.3.1. Estudio de la propagación en un fluido con cizalla . . . . .	52
5.3.2. Nivel crítico . . . . .	52
5.4. Interpretación de las ondas circumpolares . . . . .	53
<b>6. Conclusiones y trabajo futuro</b>	<b>61</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>63</b>

# Índice de tablas

1.1. Júpiter en números. . . . .	2
2.1. Imágenes utilizadas en este proyecto . . . . .	15
4.1. Principales características de las ondas circumpolares en el filtro del metano desde el año 1996 al 2019. . . . .	42
4.2. Principales características de las ondas circumpolares en el filtro del ultravioleta desde el año 1996 al 2019. . . . .	43
4.3. Evolución temporal de las características principales de las ondas circumpolares desde el año 1993 al 2019 del filtro del metano. . . . .	45
4.4. Evolución temporal de las características principales de las ondas circumpolares desde el año 1996 al 2019 del ultravioleta. . . . .	46
5.1. Rangos teóricos de los números de onda meridional y vertical cuando no hay oscilación vertical ( $m = 0$ ) o meridional ( $\ell = 0$ ) . . . . .	59
5.2. Rangos obtenidos gráficamente de los números de onda meridional y vertical	59

# Índice de figuras

1.1.	Comparativa de los tamaños del Sol, la Tierra y Júpiter. Fuente: NASA . . .	1
1.2.	Imagen a escala del tamaño de la Gran Mancha Roja en comparación con la Tierra. Fuente: NASA/JPL . . . . .	2
1.3.	Latitud planetográfica y planetocéntrica. . . . .	3
1.4.	Estructura vertical de la atmósfera de Júpiter. Copyright © Pearson Education, Inc., publishing as Pearson Addison-Wesley. . . . .	4
1.5.	Espectro reflejado y térmico del planeta Júpiter. Fuente: Sánchez-Lavega (2020) . . . . .	5
1.6.	Terminología anglosajona de las zonas y las bandas. Fuente: NASA. . . . .	6
1.7.	Perfil de vientos superpuesto sobre el planeta, donde se ve la correlación entre las bandas, las zonas y los jets del perfil. Fuente: Kaspi et al. (2018a). . . . .	6
1.8.	Definición gráfica de un “Hot Spots”. Fuente: NASA. . . . .	7
2.1.	La órbita de color verde corresponde a la órbita polar de 53 días y las azules a las órbitas científicas de 14 días. Fuente: Connerney et al. (2017). . . . .	11
2.2.	Imagen del polo sur de Júpiter tomada por la nave espacial Juno. Fuente: NASA. . . . .	11
2.3.	Comparación de la distancia de la órbita del JWST y de la del HST. Fuente: NASA . . . . .	12
2.4.	Esquema del Telescopio Espacial Hubble y sus componentes. Fuente: HUBBLESITE (NASA). . . . .	13
2.5.	Reparaciones del Hubble por astronautas. Fuente: NASA. . . . .	13
2.6.	Recorrido de la luz en el interior del HST. Fuente: HUBBLESITE (NASA). . . . .	14
2.7.	Tránsito de Ío, Calisto y Europa sobre Júpiter. Imagen obtenida por el HST el 24 de enero de 2015. . . . .	14
2.8.	Hubble . . . . .	15
3.1.	Fichero de las imágenes con sus respectivas propiedades. . . . .	17
3.2.	Navegación de las imágenes con LAIA. . . . .	18
3.3.	Delimitación de Júpiter mediante los puntos cardinales. . . . .	18
3.4.	Los puntos verdes han sido marcados manualmente para que después LAIA dibuje la elipse que mejor se ajusta a los puntos del limbo dibujados manualmente. . . . .	19
3.5.	Navegación de las imágenes con LAIA, a la izquierda la imagen sin navegar y a la derecha la imagen obtenida después del proceso de navegación descrito. . . . .	19
3.6.	Herramienta para crear las proyecciones polares en LAIA. . . . .	20

3.7.	Proyección polar norte (izquierda) y sur (derecha) obtenidas con la herramienta de LAIA. . . . .	20
3.8.	Resultado intermedio obtenido al fusionar las zonas comunes de las proyecciones polares. . . . .	21
3.9.	Resultado final obtenido para las proyecciones polares completas del Norte (izquierda) y del Sur (derecha). . . . .	21
3.10.	Herramienta de LAIA para crear los planisferios. . . . .	22
3.11.	Planisferio obtenido con LAIA. . . . .	22
3.12.	Área común de dos imágenes separadas una o dos rotaciones de Júpiter. . .	23
3.13.	Definición de los parámetros de correlación en IDL. . . . .	25
3.14.	Regiones de búsqueda para el proceso de correlación, de la misma región del planeta pero con una diferencia temporal de 10 h entre la imagen de la izquierda y la derecha. En esta última también se muestran los vectores de viento de cada medida. . . . .	25
4.1.	Proyecciones polares norte compuestas con las imágenes obtenidas con el filtro ultravioleta (izquierda), infrarrojo (centro) y metano (derecha) por HST. Con las imágenes de este año sólo es posible componer la proyección polar completa del polo norte. . . . .	26
4.2.	(a) Proyecciones polares norte y sur respectivamente, compuestas con imágenes obtenidas con el filtro ultravioleta (F275W) por HST. (b) Lo mismo que en (a) pero una rotación después, esto es, 10h después. . . . .	27
4.3.	(a) Proyecciones polares norte y sur respectivamente, compuestas con imágenes obtenidas con el filtro infrarrojo cercano (F631N) por HST. (b) Lo mismo que en (a) pero una rotación después, esto es, 10h después. . . . .	27
4.4.	(a) Proyecciones polares norte y sur respectivamente, compuestas con imágenes obtenidas con el filtro metano (FQ889N) por HST. (b) Lo mismo que en (a) pero una rotación después, esto es, 10h después. . . . .	27
4.5.	(a) Proyecciones polares norte y sur respectivamente, compuestas con imágenes obtenidas con el filtro ultravioleta (F275W) por HST. (b) Lo mismo que en (a) pero una rotación después, esto es, 10h después. . . . .	28
4.6.	(a) Proyecciones polares norte y sur respectivamente, compuestas con imágenes obtenidas con el filtro infrarrojo cercano (F631N) por HST. (b) Lo mismo que en (a) pero una rotación después, esto es, 10h después. . . . .	28
4.7.	(a) Proyecciones polares norte y sur respectivamente, compuestas con imágenes obtenidas con el filtro metano (FQ889N) por HST. (b) Lo mismo que en (a) pero una rotación después, esto es, 10h después. . . . .	28
4.8.	(a) Proyecciones polares norte y sur respectivamente, compuestas con imágenes obtenidas con el filtro ultravioleta (F275W) por HST. (b) Lo mismo que en (a) pero una rotación después, esto es, 10h después. . . . .	29
4.9.	(a) Proyecciones polares norte y sur respectivamente, compuestas con imágenes obtenidas con el filtro infrarrojo cercano (F631N) por HST. (b) Lo mismo que en (a) pero una rotación después, esto es, 10h después. . . . .	29
4.10.	(a) Proyecciones polares norte y sur respectivamente, compuestas con imágenes obtenidas con el filtro metano (FQ889N) por HST. (b) Lo mismo que en (a) pero una rotación después, esto es, 10h después. . . . .	29

4.11. (a) Proyecciones polares norte y sur respectivamente, compuestas con imágenes obtenidas con el filtro ultravioleta (F275W) por HST. (b) Lo mismo que en (a) pero una rotación después, esto es, 10h después. . . . .	30
4.12. (a) Proyecciones polares norte y sur respectivamente, compuestas con imágenes obtenidas con el filtro infrarrojo (F631N) por HST. (b) Lo mismo que en (a) pero una rotación después, esto es, 10h después. . . . .	30
4.13. (a) Proyecciones polares norte y sur respectivamente, compuestas con imágenes obtenidas con el filtro metano (FQ889N) por HST. (b) Lo mismo que en (a) pero una rotación después, esto es, 10h después. . . . .	30
4.14. (a) Proyecciones polares norte y sur respectivamente, compuestas con imágenes obtenidas con el filtro ultravioleta (F275W) por HST. (b) Lo mismo que en (a) pero una rotación después, esto es, 10h después. . . . .	31
4.15. (a) Proyecciones polares norte y sur respectivamente, compuestas con imágenes obtenidas con el filtro infrarrojo cercano (F631N) por HST. (b) Lo mismo que en (a) pero una rotación después, esto es, 10h después. . . . .	31
4.16. (a) Proyecciones polares norte y sur respectivamente, compuestas con imágenes obtenidas con el filtro metano (FQ889N) por HST. (b) Lo mismo que en (a) pero una rotación después, esto es, 10h después. . . . .	31
4.17. Perfil de vientos obtenido del año 2015, comparado con el perfil de referencia del año 2016 (Hueso et al., 2017). . . . .	32
4.18. Perfil de vientos obtenido del año 2016, comparado con el perfil de referencia del año 2016 (Hueso et al., 2017). . . . .	33
4.19. Perfil de vientos obtenido del año 2017, comparado con el perfil de referencia del año 2016 (Hueso et al., 2017). . . . .	33
4.20. Perfil de vientos obtenido del año 2018, comparado con el perfil de referencia del año 2016 (Hueso et al., 2017). . . . .	34
4.21. Perfil de vientos obtenido del año 2019, comparado con el perfil de referencia del año 2016 (Hueso et al., 2017). . . . .	34
4.22. Comparación de los perfiles obtenidos para cada año de estudio. . . . .	35
4.23. Representación del número de vectores de viento medidos por correlación automática en función de la latitud. . . . .	36
4.24. Representación de los detalles nubosos estudiados. Los puntos corresponden al filtro ultravioleta, los círculos al filtro del metano y las “estrellas” al filtro del infrarrojo cercano de cada año de estudio, diferenciándose cada año por colores. . . . .	37
4.25. Posición latitudinal de las ondas circumpolares del año 1996 sobre el perfil de referencia para ese mismo año (García-Melendo and Sánchez-Lavega, 2000). Las líneas discontinuas indican la latitud media de las ondas, los rectángulos grises la amplitud de cada onda y los puntos la velocidad de la onda medida por “cloud tracking”. . . . .	38
4.26. Posición latitudinal de las ondas circumpolares del año 2015 sobre el perfil que hemos obtenido para ese mismo año. Las líneas discontinuas indican la latitud media de las ondas, los rectángulos grises la amplitud de cada onda y los puntos la velocidad de la onda medida por “cloud tracking”. . . . .	38

4.27. Posición latitudinal de las ondas circumpolares del año 2016 sobre el perfil que hemos obtenido para ese mismo año. Las líneas discontinuas indican la latitud media de las ondas, los rectángulos grises la amplitud de cada onda y los puntos la velocidad de la onda medida por “cloud tracking”. . . . .	39
4.28. Posición latitudinal de las ondas circumpolares del año 2017 sobre el perfil que hemos obtenido para ese mismo año. Las líneas discontinuas indican la latitud media de las ondas, los rectángulos grises la amplitud de cada onda y los puntos la velocidad de la onda medida por “cloud tracking”. . . . .	39
4.29. Posición latitudinal de las ondas circumpolares del año 2018 sobre el perfil que hemos obtenido para ese mismo año. Las líneas discontinuas indican la latitud media de las ondas, los rectángulos grises la amplitud de cada onda y los puntos la velocidad de la onda medida por “cloud tracking”. . . . .	40
4.30. Posición latitudinal de las ondas circumpolares del año 2019 sobre el perfil que hemos obtenido para ese mismo año. Las líneas discontinuas indican la latitud media de las ondas, los rectángulos grises la amplitud de cada onda y los puntos la velocidad de la onda medida por “cloud tracking”. . . . .	40
4.31. Comparación de las Figura 4.25, Figura 4.26, Figura 4.27, Figura 4.28, Figura 4.29, Figura 4.30, que muestran la evolución de las características en los años 1996, 2015, 2016, 2017, 2018 y 2019. . . . .	41
5.1. Vorticidad de las parcelas de aire cuando sufren un desplazamiento (hacia el norte o sur) al ser sometidas a un movimiento sinusoidal. Fuente: (Barrado-Izagirre et al., 2008). . . . .	48
5.2. Campo de velocidad meridional y de vorticidad de la perturbación, cuando las parcelas de aire son desplazadas meridionalmente. La línea continua es la perturbación inicial, la línea discontinua el desplazamiento hacia el Oeste de la nueva perturbación y las flechas punteadas la velocidad debida al desplazamiento meridional. Fuente: Sánchez-Lavega (2010). . . . .	49
5.3. Gradiente de vorticidad en el año 2016. $\beta_y$ es el término dominante, mientras que $\beta_z$ y $\beta_e$ prácticamente se anulan entre si. . . . .	54
5.4. Gradiente de vorticidad en el año 2017. $\beta_y$ es el término dominante, mientras que $\beta_z$ y $\beta_e$ prácticamente se anulan entre si. . . . .	55
5.5. Gradiente de vorticidad en el año 2018. $\beta_y$ es el término dominante, mientras que $\beta_z$ y $\beta_e$ prácticamente se anulan entre si. . . . .	55
5.6. Gradiente de vorticidad en el año 2019. $\beta_y$ es el término dominante, mientras que $\beta_z$ y $\beta_e$ prácticamente se anulan entre si. . . . .	56
5.7. Representación gráfica de la relación de dispersión de la onda de Rossby para el año 2016 y 2017. Las líneas de colores representan las soluciones de la Ecuación 5.34 tomando un valor de $m$ para cada uno de los colores. La línea discontinua representa la velocidad $\bar{u} - c$ en ese año. . . . .	57
5.8. Representación gráfica de la relación de dispersión de la onda de Rossby para el año 2018 y 2019. Las líneas de colores representan las soluciones de la Ecuación 5.34 tomando un valor de $m$ para cada uno de los colores. La línea discontinua representa la velocidad $\bar{u} - c$ en ese año. . . . .	58

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Júpiter

Júpiter es el quinto planeta desde el Sol y el más masivo del Sistema Solar. Al igual que Saturno, Urano y Neptuno, pertenece al conjunto de planetas denominados gigantes gaseosos o planetas exteriores. Dentro de este grupo hay dos subgrupos, por un lado los gigantes gaseosos por su composición que son Júpiter y Saturno debido a que están formados por hidrógeno (compuesto mayoritario) y helio, y por otro lado los gigantes helados, que son Urano y Neptuno puesto que están formados principalmente por hielo, roca y gas. Júpiter tiene una masa de  $1,9 \cdot 10^{27}$  kg, es decir, 318 veces mayor que la masa de la Tierra ( $M_T$ ), sin embargo, debido a que su volumen es muy grande, su densidad es mucho menor que la densidad de la Tierra, siendo su valor  $1,3 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  frente a los  $5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  que es la densidad de la Tierra.

En la [Figura 1.1](#) se observa una comparativa de los tamaños de Júpiter, la Tierra y el Sol. El tamaño de Júpiter es casi 11 veces el de la Tierra y el Sol es 10 veces el tamaño de Júpiter. La distancia media al Sol es de 5,2 UA, lo que equivale a  $7,78 \cdot 10^8$  km ( $1\text{UA}= 1,5 \cdot 10^8$  km). La velocidad de rotación de Júpiter es la más rápida de los planetas que forman el Sistema Solar, siendo su periodo de rotación 9h 55m 29,4s ([Sheehan and Hockey \(2018\)](#)).

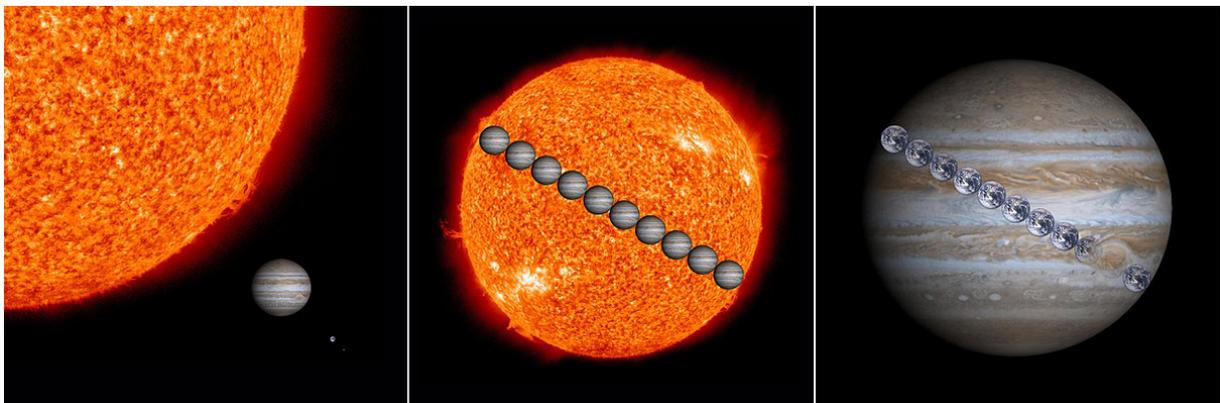


Figura 1.1: Comparativa de los tamaños del Sol, la Tierra y Júpiter. Fuente: NASA

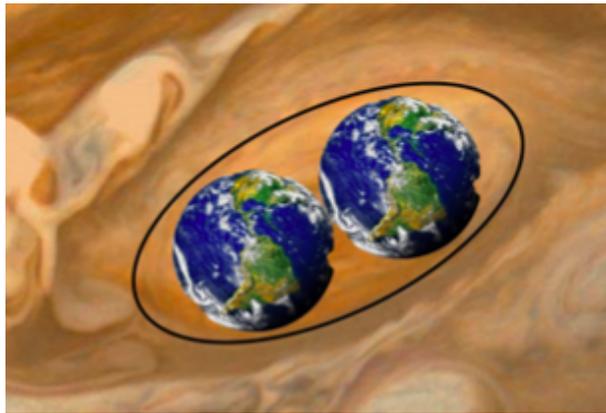


Figura 1.2: Imagen a escala del tamaño de la Gran Mancha Roja en comparación con la Tierra. Fuente: NASA/JPL

Tabla 1.1: Júpiter en números.

<i>Propiedad</i>	<i>Júpiter</i>
Masa	318 $M_T$
Radio Ecuatorial	71 492 km
Radio Polar	66 854 km
Densidad	1.33 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Rango de Temperaturas	110-198 K
Periodo de Rotación	9 h 55 m 29.4 s
Periodo Orbital	11.86 años
Distancia media al Sol	5.20336 UA
Excentricidad	0.048
Inclinación del eje de rotación	3.13°

Los polos de Júpiter se encuentran muy achatados como consecuencia de su breve periodo de rotación. Debido a ésto, dos datos significativos del planeta (Tabla 1.1) son su radio ecuatorial y su radio polar. Además Júpiter cuenta con otro aspecto llamativo, que es su Gran Mancha Roja (GRS de sus siglas en inglés), que es una tormenta de grandes dimensiones en forma de óvalo situada en el hemisferio sur y donde los vientos implicados en ella tienen una velocidad de 400 km/h aproximadamente (Ingersoll, 1999). El tamaño de la GRS es más o menos dos veces mayor que el de la Tierra (Figura 1.2). En las últimas décadas, los expertos han llevado a cabo diversos estudios de los cambios ocurridos en la GRS y han demostrado gracias a Juno y al Telescopio Espacial Hubble (HST de sus siglas en inglés) que la GRS se ha reducido en la dirección longitudinal y latitudinal (en menor medida) pero que sin embargo, no va a desaparecer puesto que se recupera después de cada interacción con los otros vórtices que se encuentran en sus proximidades (Lemasquerier et al. (2020), Sánchez-Lavega et al. (2018)).

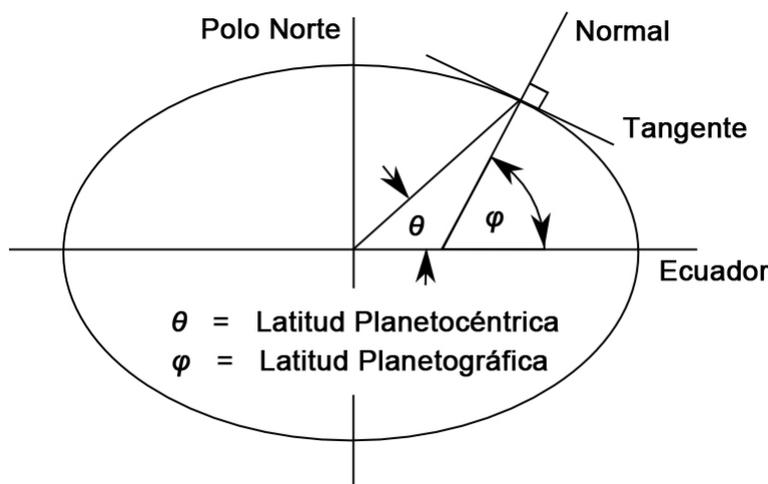


Figura 1.3: Definición gráfica de la latitud planetográfica (Pg) y planetocéntrica(Pc).

Júpiter posee más de una docena de corrientes en chorro o “*jets streams*”, a los que nos referimos como jets. Las mayores velocidades las alcanzan los jets hacia el este, alcanzando velocidades superiores a 120 m/s en zonas ecuatoriales (Sánchez-Lavega, 2014). Los vientos implicados en el planeta son 3-4 veces más intensos que en la Tierra.

El planeta Júpiter tiene tres sistemas de referencia de rotación; el I, II y III. En este proyecto se utiliza el sistema de referencia III. El sistema de referencia I corresponde a la zona ecuatorial del planeta y su periodo de rotación es de 9h 50m y 30s. El sistema II cubre el resto del planeta y su periodo de rotación tiene una duración de 9h 55m y 40,6s. Por último, el sistema de referencia III se basa en la medida del periodo de rotación del campo magnético de Júpiter, el cual es de 9h 55m 29,4s (Davies et al., 1986).

La forma del planeta es elipsoidal como consecuencia de tener los polos muy achatados y por lo tanto existen 2 definiciones para la latitud (Figura 1.3). La latitud planetocéntrica (Pc) es el ángulo que forma el plano ecuatorial y un vector que va desde el centro del planeta hasta la superficie. La latitud planetográfica (Pg) es el ángulo formado por el plano ecuatorial y un vector perpendicular a la superficie de la atmósfera en un punto. En este trabajo la latitud empleada será la latitud planetocéntrica. La relación entre ambas latitudes viene dada por la Ecuación 1.1:

$$\tan \varphi = \left( \frac{R_e}{R_p} \right)^2 \tan \theta \quad (1.1)$$

### 1.1.1. Descripción de la atmósfera de Júpiter

La atmósfera del planeta Júpiter no tiene un límite bien definido debido a que es un gigante gaseoso, sin embargo la sonda espacial Juno reveló que el espesor de la capa nubosa de amoníaco era de unos 2000-3500 km (Kaspi et al., 2018b), lo cual supone menos del 1% del radio del planeta. Como consecuencia de que no tiene una superficie sólida que sirva

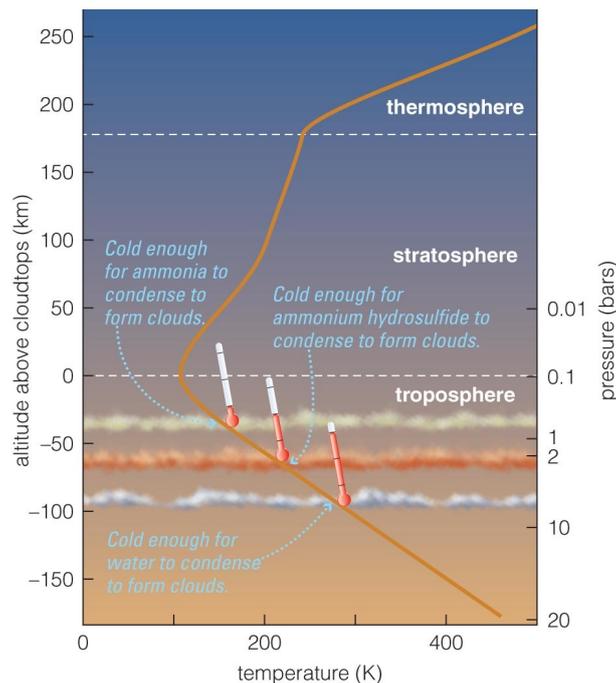


Figura 1.4: Estructura vertical de la atmósfera de Júpiter. Copyright © Pearson Education, Inc., publishing as Pearson Addison-Wesley.

como sistema de referencia, se miden los vientos involucrados en la atmósfera del planeta con respecto a la velocidad angular de rotación del campo magnético del mismo, que se supone ligado a su interior y rotando junto a él. Por esta razón el sistema de referencia que elegimos en este trabajo es el III.

Por otro lado, la atmósfera de Júpiter se clasifica verticalmente en capas que son, la troposfera, la estratosfera y la termosfera (Figura 1.4). La capa de la atmósfera donde se forman las nubes de condensado es la troposfera, la cual, comprende desde unas docenas de bares hasta los 100 mbar donde se encuentra la tropopausa, cuya temperatura es de 105K. En la parte superior de la tropopausa se forma la estratosfera como consecuencia del calentamiento de los hidrocarburos y que se extiende hasta una presión de 1mbar aproximadamente (Sánchez-Lavega, 2010). Por último, en la parte más externa se encuentra la termosfera.

### Composición química

Los compuestos presentes en los planetas están ligados a las condiciones químicas en la nebulosa solar, puesto que éstas cambian a lo largo de la nebulosa. De todos los planetas que forman el sistema solar, la composición de la atmósfera de Júpiter es la mejor estudiada debido a las medidas *in situ* llevadas a cabo por la sonda Galileo y gracias también a la misión Juno (Oberg and Wordsworth, 2019). En la atmósfera de Júpiter hallamos aproximadamente un 87% de hidrógeno y un 12% de helio, composición similar a la de nuestra estrella, el Sol. A parte de estos dos compuestos mayoritarios, en el 1% restante encontramos carbono, nitrógeno, oxígeno y azufre que, combinados con hidrógeno forman amoníaco, sulfuro de hidrógeno, agua e hidrocarburos entre otros (Sheehan and Hockey,

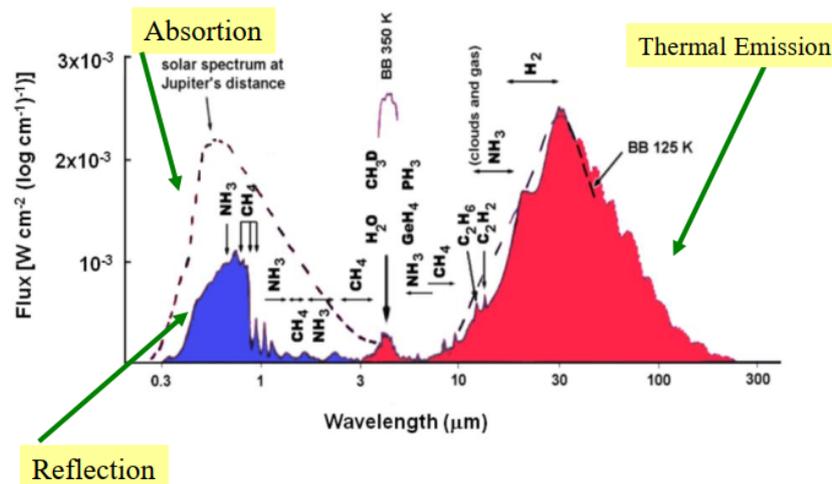


Figura 1.5: Espectro reflejado y térmico del planeta Júpiter. Fuente: [Sánchez-Lavega \(2020\)](#)

2018). La composición de una atmósfera planetaria se puede conocer mediante las técnicas de espectroscopía y métodos de ocultación desde telescopios terrestres, naves espaciales o sondas e *in situ* ([Sánchez-Lavega, 2010](#)).

### Energía interna

Los planetas gigantes gaseosos, excepto Urano, cuentan con una fuente de energía interna que calienta el planeta y la atmósfera superior ([Sánchez-Lavega, 2010](#)). En la [Figura 1.5](#) observamos que la emisión térmica de Júpiter es aproximadamente 2 veces la energía que recibe del Sol, lo que indica que Júpiter tiene una fuente interna de energía. El origen de dicha energía está en el calor que se produce a lo largo de la formación y contracción planetaria ([Fraknoi et al., 2016](#)).

### Bandas y zonas

El planeta Júpiter tiene un aspecto muy característico puesto que está formado por un patrón de zonas brillantes y bandas oscuras paralelas al ecuador como se observa en la [Figura 1.6](#), en la que también aparece la nomenclatura empleada para las zonas y las bandas a lo largo del planeta ([Rogers, 1995](#)). Las zonas son de color claro debido a que están compuestas por amoníaco, sin embargo las bandas son más oscuras (ocre) puesto que su compuesto es el hidrosulfuro amónico ([Sheehan and Hockey \(2018\)](#)). El patrón de bandas y zonas observado en Júpiter es muy estable, aunque en algunas ocasiones las bandas sufren cambios debidos a inestabilidades u otros fenómenos ([Sánchez-Lavega et al. \(2008\)](#), [Pérez-Hoyos et al. \(2012\)](#), [Sánchez-Lavega et al. \(2017\)](#), [Antuñano et al. \(2018\)](#)). El perfil de vientos zonal (jets zonales) y el aspecto bandeado del planeta se correlacionan muy bien ([Figura 1.7](#)), de manera que los jets (corrientes hacia el este y hacia el oeste) son más intensos en los límites entre las zonas y las bandas ([Ingersoll et al., 2004](#)). Las zonas son anticiclónicas, es decir, tienen un jet hacia el este en la parte hacia el polo y un jet hacia el oeste en el lado ecuatorial. Un anticiclón gira en sentido horario en el hemisferio norte y en sentido antihorario en el hemisferio sur. Por el contrario, las bandas son ciclónicas.

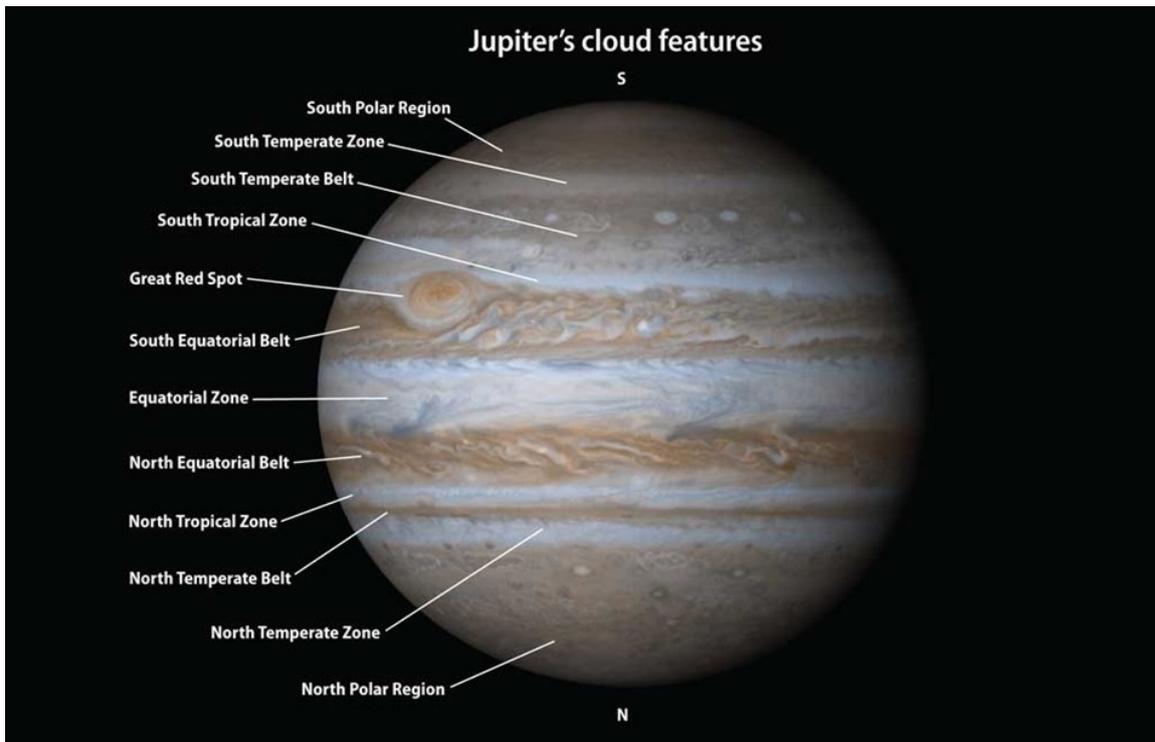


Figura 1.6: Terminología anglosajona de las zonas y las bandas. Fuente: NASA.

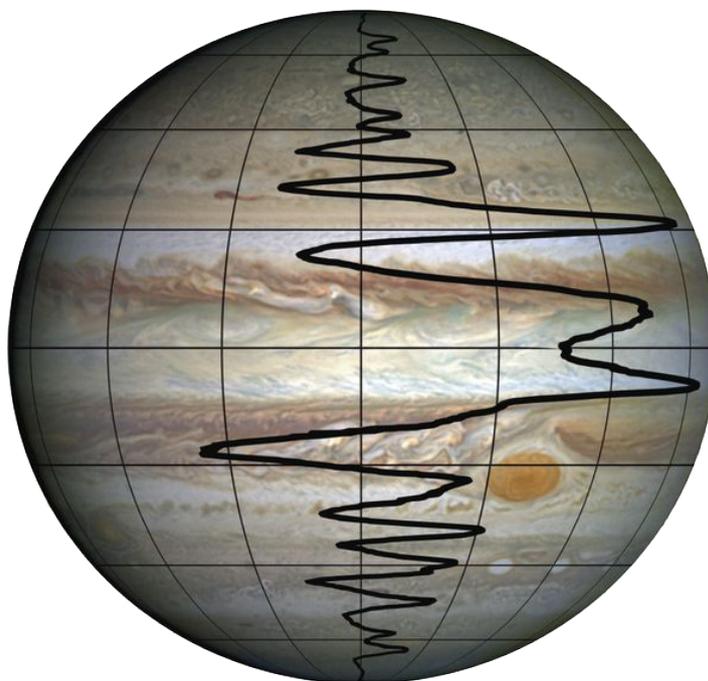


Figura 1.7: Perfil de vientos superpuesto sobre el planeta, donde se ve la correlación entre las bandas, las zonas y los jets del perfil. Fuente: [Kaspi et al. \(2018a\)](#).

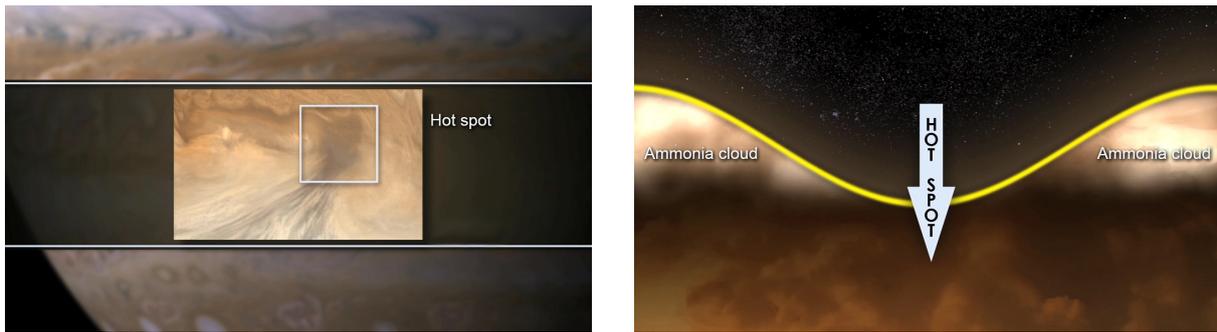


Figura 1.8: Definición gráfica de un “Hot Spots”. Fuente: NASA.

Otra característica interesante de Júpiter son los “Hot Spots”, que son regiones en las que la onda de Rossby<sup>1</sup> al fluir hacia arriba y hacia abajo desplaza el aire frío ocasionando cavidades en las nubes (Figura 1.8). Esto da como resultado una región de bolsas de aire caliente sin nubes (“Hot Spots”). La misión Galileo de la NASA lanzó en 1995 una sonda atmosférica que descendió a un “Hot Spot”, lo que supuso la primera y única investigación *in situ* de la atmósfera de Júpiter (Young (2003), Orton et al. (1998), Choi et al. (2013)).

## 1.2. Ondas

En las atmósferas de los planetas existe un fenómeno dinámico muy importante, las ondas atmosféricas. La existencia de ellas es debido a las inestabilidades que se producen en las parcelas de aire presentes en una atmósfera y a la presencia de una fuerza de restauración que genera las oscilaciones. Las principales características de las ondas son la amplitud, frecuencia, velocidad de fase y velocidad de grupo. Dependiendo de éstas características, de la fuerza de restauración y de las inestabilidades las ondas se clasifican de la siguiente manera:

- *Ondas de Kelvin-Helmholtz*: Su formación se debe a la cizalla vertical u horizontal producida entre dos flujos que pueden tener diferente densidad. Generalmente se tratan de ondas bastante inestables lo que ocasiona que duren muy poco tiempo.
- *Ondas acústicas*: Las ondas acústicas se deben a la perturbación provocada en el campo de presión de los fluidos creando un movimiento oscilante compuesto por una compresión adiabática y una expansión del medio que se propaga longitudinalmente a través del fluido. En este caso la fuerza restauradora es el gradiente de presión.
- *Ondas de gravedad*: En una atmósfera que se encuentra establemente estratificada, una parcela de aire es desplazada verticalmente como consecuencia de la fuerza de flotabilidad y de la propia gravedad, produciéndose así una oscilación vertical denominada onda de gravedad.
  - *Ondas de gravedad internas*: Este tipo de ondas sólo se producen cuando existe una atmósfera con estratificación estable. Una parcela de aire es desplazada

<sup>1</sup>Las ondas de Rossby se forman en sistemas rotativos y deben su existencia al cambio de la fuerza de Coriolis (Sánchez-Lavega, 2010).

verticalmente de la posición de equilibrio y como consecuencia se produce un movimiento oscilatorio debido a la diferencia de densidad con el aire externo.

- *Ondas topográficas*: Estas ondas se dan cuando una parcela de aire se desplaza verticalmente debido a fluir sobre obstáculos topográficos, como por ejemplo una montaña, con una forma sinusoidal.
- *Ondas de Rossby*: Se trata de ondas que se desplazan hacia el Oeste. Se originan cuando una parcela de aire se desplaza latitudinalmente y la fuerza restauradora de Coriolis se encarga de devolver dicha parcela a su latitud original, formando así las ondas de Rossby. Éstas serán estudiadas con mayor detalle en el [Capítulo 5](#).

### 1.2.1. Ondas circumpolares en Júpiter

En los polos de Júpiter se observa una capa de nieblas confinadas por un patrón ondulatorio alrededor de los polos del planeta, que se conocen como ondas circumpolares. Para estudiar las nieblas más altas de la atmósfera de Júpiter se emplean filtros ultravioleta, pero para observar la capa de nubes (“weather-layer”) que está debajo de éstas nieblas usamos filtros infrarrojos cercanos, puesto que son los más penetrantes. Por otro lado, para estudiar las ondas circumpolares que se encuentran entre lo que se observa en el infrarrojo y en el ultravioleta, se utilizan filtros de absorción del metano. En este último filtro [Sánchez-Lavega et al. \(1998\)](#) encontraron los primeros indicios de la existencia de las ondas circumpolares y propusieron que podía tratarse de una onda de Rossby. Posteriormente, esta propuesta fue estudiada por [Barrado-Izagirre et al. \(2008\)](#).

## 1.3. Objetivos

En este trabajo, se han utilizando imágenes de Júpiter capturadas por el Telescopio Espacial Hubble (HST) en tres longitudes de onda: ultravioleta (F275W, F255W), infrarrojo cercano (F631N, F673N) y metano (FQ889N, FQCHA4N). Con las imágenes de los filtros ultravioleta y metano hemos podido obtener las características de las ondas circumpolares y su evolución temporal. Con el filtro del infrarrojo cercano se observa la capa de nubes o “weather-layer”. Por otro lado, con las imágenes del filtro del metano vamos a intentar hacer una interpretación de la onda sur como onda de Rossby, como hicieron previamente [Sánchez-Lavega et al. \(1998\)](#) y [Barrado-Izagirre et al. \(2008\)](#), en los años 2016, 2017, 2018 y 2019. Por último, con el filtro infrarrojo cercano mediremos los perfiles de vientos completos y su evolución para los años 2015, 2016, 2017, 2018 y 2019, utilizando PLIA y PICV que son software desarrollado por el grupo de ciencias planetarias (GCP) de la UPV/EHU.

# Capítulo 2

## Observaciones

El astrónomo Galileo Galilei en 1610 llevó a cabo con su telescopio observaciones detalladas del planeta Júpiter, descubriendo los llamados satélites galileanos, Ío, Europa, Ganímedes y Calisto, que forman los satélites más grandes del planeta.

### 2.1. Misiones a Júpiter

Desde 1973, que llegó Pioneer 10, el planeta ha sido visitado por varias naves espaciales no tripuladas, orbitadores y sondas. A continuación se muestran las principales misiones que han visitado el gigante gaseoso.

#### 2.1.1. Misiones finalizadas

- **Pioneer 10**

Pioneer 10 fue la primera misión lanzada por la NASA a los planetas exteriores. La misión fue lanzada el 3 de marzo de 1972 desde Cabo Cañaveral. Inicialmente estaba diseñada como una misión de 21 meses para sobrevolar Júpiter, sin embargo, Pioneer duró más de 30 años. En 1973 se produjo el mayor acercamiento de Pioneer 10 a Júpiter. El 23 de enero de 2003 se recibe por última vez en la Tierra la señal de Pioneer 10.

- **Galileo**

La misión, formada por una sonda y un orbitador, fue lanzada el 18 de octubre de 1989 desde el Centro Espacial Kennedy, Florida, a bordo del transbordador espacial Atlantis. El objetivo de la sonda era estudiar la atmósfera del gigante gaseoso, por lo que en 1995 la sonda se separó de la nave introduciéndose en la atmósfera y transmitiendo durante 58 minutos datos de su composición y condiciones. Sin embargo, el orbitador estuvo operativo hasta 2003, cuando se agotó su combustible y se decidió enviarlo a la atmósfera de Júpiter para que se desintegrara.

- **Ulysses**

Ulysses fue una misión conjunta de la ESA y la NASA lanzada el 6 de octubre de 1990 desde la bahía de carga del transbordador espacial Discovery. La nave espacial fue diseñada para realizar una asistencia gravitatoria en Júpiter para poder pasar a una órbita polar alrededor del Sol con el objetivo de estudiar los polos de nuestra

estrella. El 8 de febrero de 1992 se convirtió en la quinta nave espacial en llegar a Júpiter. El 30 de junio de 2009 se perdió el contacto con la nave espacial.

### ■ **Cassini-Huygens**

Cassini fue una colaboración de la NASA, la Agencia Espacial Europea (ESA) y la agencia espacial italiana, Agenzia Spaziale Italiana (ASI). Fue lanzada el 15 de octubre de 1997 desde Cabo Cañaveral para estudiar el planeta Saturno y sus satélites naturales. El 30 de diciembre de 2000 Cassini alcanzó el punto más cercano a Júpiter obteniendo imágenes y aportando información de ondas y movimientos de las nubes. Además en Júpiter llevó a cabo una asistencia gravitatoria para aumentar su velocidad. La misión estaba formada por el orbitador Cassini y la sonda Huygens. Cassini-Huygens llegó a Saturno en julio de 2004. Tiempo después la sonda Huygens entró en la atmósfera de Titán tras un enorme éxito. El 15 de septiembre de 2017, la nave espacial se sumergió en la atmósfera de Saturno, enviando datos científicos hasta que se desintegró.

### 2.1.2. Misiones en activo

#### ■ **Voyager 1**

El 5 de septiembre de 1977 se lanzó la sonda Voyager 1 desde Cabo Cañaveral (Florida). Después de realizar una asistencia gravitatoria el 5 de marzo de 1979 en Júpiter y otra el 12 de noviembre de 1980 en Saturno cruzó al espacio interestelar en agosto de 2012 y continúa recopilando datos.

#### ■ **Voyager 2**

El 20 de agosto de 1977 se lanzó la sonda Voyager 2 desde Cabo Cañaveral (Florida). Después de realizar asistencias gravitatorias el 9 de julio de 1979 en Júpiter, el 26 de agosto de 1981 en Saturno, el 24 de junio de 1981 en Urano y el 25 de agosto de 1989 en Neptuno, el 10 de diciembre de 2018 ingresó en el espacio interestelar.

#### ■ **Telescopio Espacial Hubble**

El Telescopio Espacial Hubble (HST) se lanzó el 24 de abril de 1990 en la bahía de carga del transbordador espacial Discovery y en la actualidad sigue en funcionamiento. En la [Sección 2.2](#) se describirá con más detalle.

#### ■ **Juno**

El 5 de agosto de 2011 se lanzó desde Cabo Cañaveral la nave espacial Juno, y el 4 de julio de 2016 insertó con éxito en la órbita polar de 53 días alrededor de Júpiter ([Figura 2.1](#)), siendo la primera misión en obtener información detallada de los polos de Júpiter. Los objetivos de la misión son hacer un mapa de la gravedad de Júpiter y de los campos magnéticos para comprender cómo es el interior del planeta. Además también observa la composición y circulación de la atmósfera profunda para mejorar nuestra comprensión de las fuerzas que controlan las auroras del planeta. Entre los hallazgos, esta misión ha encontrado que los dos polos de Júpiter están cubiertos de ciclones del tamaño de la Tierra que están densamente agrupados e interaccionando ([Figura 2.2](#)). Esto es de gran interés para los científicos puesto que no se conoce cómo han podido formarse, cómo de estable es su configuración y cuál es la causa por la que el polo norte de Júpiter no se parece al polo sur.

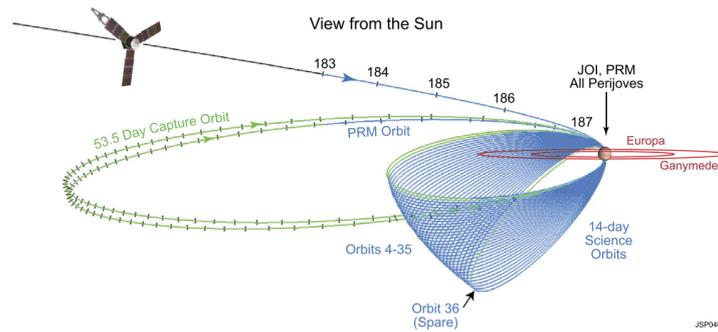


Figura 2.1: La órbita de color verde corresponde a la órbita polar de 53 días y las azules a las órbitas científicas de 14 días. Fuente: [Connerney et al. \(2017\)](#).



Figura 2.2: Imagen del polo sur de Júpiter tomada por la nave espacial Juno. Fuente: NASA.

### 2.1.3. Misiones futuras

- **Telescopio James Webb**

El 31 de octubre de 2021 está previsto que se lance en un cohete Ariane 5 desde la Guayana Francesa el telescopio espacial James Webb (JWST o Webb), el cual será el sucesor del Hubble debido a que los objetivos científicos del Webb han sido motivados por el Hubble. El JWST es un gran telescopio infrarrojo con un espejo primario de 6,5 m y se encargará del estudio de cada fase de la historia de nuestro universo y la evolución de nuestro Sistema Solar entre otros.

El JSWT será el sucesor del Hubble puesto que observará el universo en el infrarrojo mientras que el HST lo hace en longitudes de onda ópticas, ultravioletas y del infrarrojo cercano. Además como el espejo es mayor (6,5 m frente a 2,5 m del HST) este telescopio podrá observar más lejos. Por otro lado, el HST se encuentra en un órbita muy cercana a la Tierra, mientras que el JWST estará a 1,5 millones de kilómetros de distancia de la Tierra, cerca del segundo punto de Lagrange<sup>3</sup> (Figura 2.3). Por

<sup>3</sup>Puntos de Lagrange: posiciones donde la atracción gravitacional de dos grandes masas es exacta-

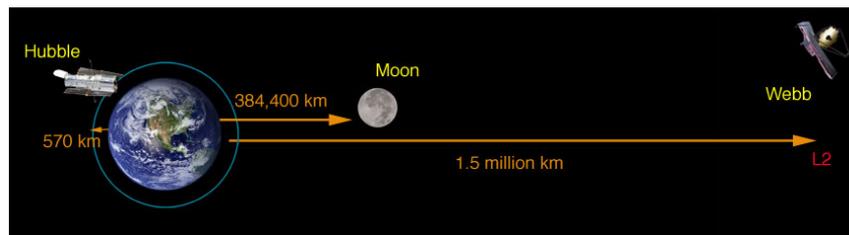


Figura 2.3: Comparación de la distancia de la órbita del JWST y de la del HST. Fuente: NASA

las propiedades de los puntos de Lagrange, el telescopio permanecerá en una órbita prácticamente estacionaria. Sin embargo, que se encuentre a dicha distancia, hace que las posibles reparaciones posteriores al lanzamiento sean casi imposibles.

### ■ JUICE

El JUPiter ICy Moons Explorer (JUICE) es una misión de la Agencia Espacial Europea (ESA) que realizará múltiples sobrevuelos de los satélites de Júpiter, Ganímedes, Calisto y Europa, y luego entrará en órbita alrededor de Ganímedes. Los objetivos científicos se centran en Júpiter y su sistema. Está previsto que el lanzamiento de la misión sea en junio de 2022 en un Ariane 5 desde el puerto espacial europeo en Kourou, Guayana Francesa. JUICE insertará en una órbita alrededor de Júpiter en enero de 2030. La nave espacial realizará sobrevuelos de Ganímedes y Calisto para optimizar la órbita, incluyendo dos sobrevuelos de Europa a principios de 2031. Dichas órbitas se utilizarán para estudiar a Júpiter y sus lunas hasta septiembre de 2032. La misión terminará con un impacto en la superficie de Ganímedes.

### ■ Europa Clipper

Europa Clipper es una misión diseñada para orbitar alrededor de Júpiter permitiendo múltiples sobrevuelos de su luna Europa. El objetivo de la misión es recopilar datos sobre Europa en cada sobrevuelo para determinar su habitabilidad. Está previsto que se lance en el período 2023-2025. Dependiendo del vehículo de lanzamiento, Europa Clipper seguirá un vuelo directo a Júpiter o realizará múltiples sobrevuelos planetarios necesitando más tiempo para alcanzar su objetivo.

## 2.2. Telescopio Espacial Hubble

El Telescopio Espacial Hubble (Figura 2.4) fue lanzado el 24 de abril de 1990 desde el Centro Espacial Kennedy a bordo del transbordador espacial Discovery. Su nombre se debe al astrónomo Edwin Hubble, quien demostró la expansión del universo. Los astronautas han tenido que ir al HST cuatro veces para poder llevar a cabo reparaciones e instalar nuevos instrumentos (Figura 2.5).

---

mente igual a la fuerza centrípeta requerida para que un objeto pequeño se mueva con ellos. (<https://solarsystem.nasa.gov/resources/754/what-is-a-lagrange-point/>)

## 2.2. Telescopio Espacial Hubble

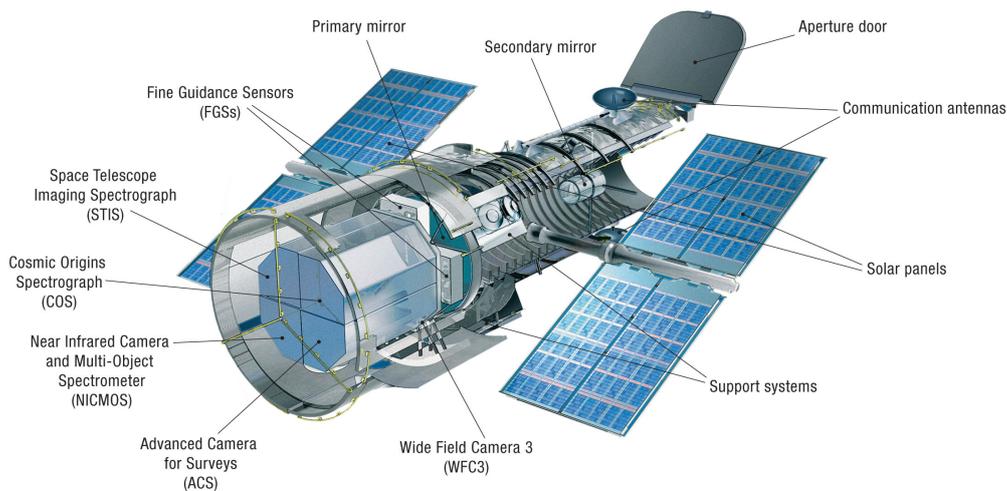


Figura 2.4: Esquema del Telescopio Espacial Hubble y sus componentes. Fuente: HUBBLESITE (NASA).

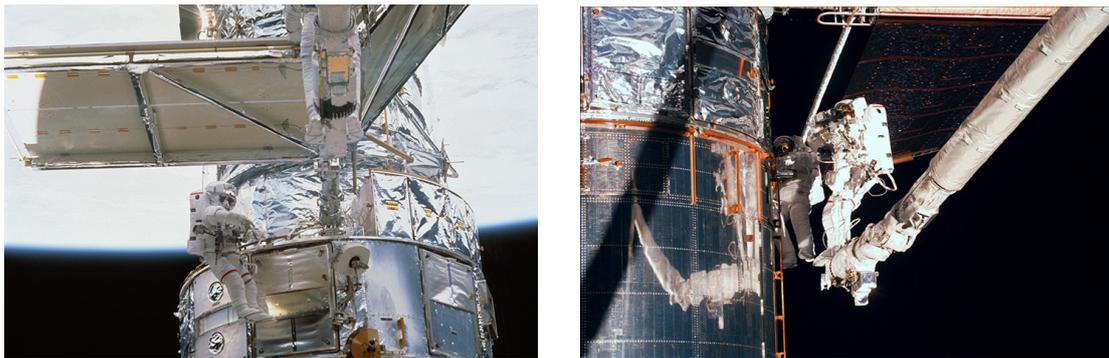


Figura 2.5: Reparaciones del Hubble por astronautas. Fuente: NASA.

El HST además de observar en el visible y en el infrarrojo cercano es capaz de detectar y observar luz ultravioleta, la cual es absorbida por la atmósfera, puesto que se encuentra fuera de la atmósfera terrestre a unos 600km de la superficie completando 15 órbitas por día. El Hubble es un telescopio reflector<sup>1</sup> Cassegrain capaz de percibir objetos 10 mil millones de veces más débiles que lo que el ojo humano puede detectar. Es decir, su resolución es mucho mayor que la de los telescopios terrestres. La luz recibida de los objetos celestes es conducida por un tubo hasta un espejo primario cóncavo y reflejado hacia un espejo secundario convexo de menor tamaño. El espejo secundario envía hacia atrás la imagen hasta un agujero existente en el centro del espejo primario, enfocando en el plano focal donde es captada por diferentes instrumentos científicos (Figura 2.6).

El telescopio está compuesto por tres cámaras, un espectrógrafo y un sensor de orientación. De todos los instrumentos que lo forman, en este trabajo nos centraremos en la cámara de gran angular Wide Field Camera 3 (WFC3) (Dressel, 2019).

<sup>1</sup>Telescopio reflector: cuando la luz se recoge mediante espejos (Alfonso-Garzón et al., 2009).

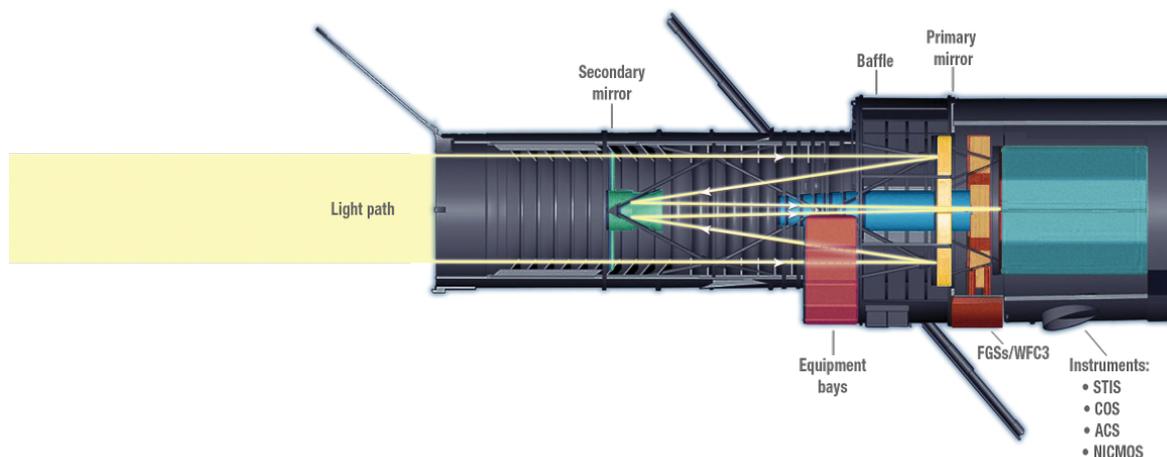


Figura 2.6: Recorrido de la luz en el interior del HST. Fuente: HUBBLESITE (NASA).

Como curiosidad, el 24 de enero de 2015 el Hubble capturó el tránsito sobre Júpiter de Ío, Calisto, Europa y las sombras proyectadas de Calisto y Europa (Figura 2.7).

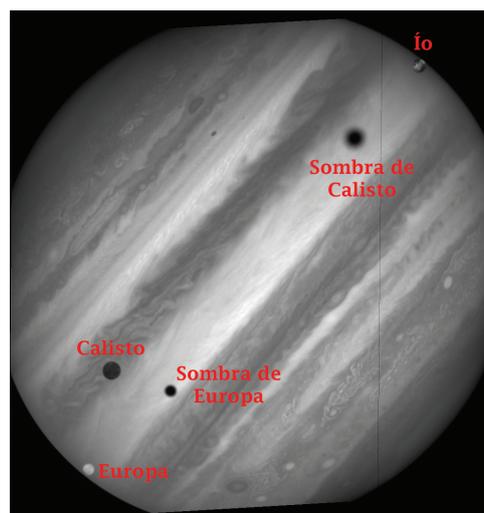


Figura 2.7: Tránsito de Ío, Calisto y Europa sobre Júpiter. Imagen obtenida por el HST el 24 de enero de 2015.

### 2.2.1. Wide Field Camera 3

En 2009 se instaló en el Hubble la WFC3 (Figura 2.8) para sustituir la WFPC2 (Wide Field Planetary Camera 2). Entre las novedades, esta nueva cámara tiene un campo de visión más amplio que la WFPC2. Por otro lado, la WFC3 es un instrumento que posee dos canales, uno para la luz ultravioleta y visible (UVIS) y el otro para el infrarrojo cercano (NIR). Las imágenes de la WFC3 y la WFPC2 (1996) utilizadas en este trabajo se muestran en la Tabla 2.1. Los filtros de ultravioleta (F275W, F255W) se utiliza para observar las nieblas más altas de la atmósfera de Júpiter, los filtros de infrarrojo cercano (F631N, F673N), que es el más penetrante, se usa para estudiar la capa de nubes (*weather-*



Figura 2.8: Astronautas trabajando en la instalación de la WFC3 en 2009. El panel blanco es la WFC3. Fuente: NASA.

*layer*) y los filtros de metano (FQ889N, FQCHA4N) lo usaremos para el estudio de las ondas circumpolares, visibles en este filtro, que se encuentran en una altura entre lo observado con el infrarrojo y el ultravioleta (Barrado-Izagirre et al. (2008), Sánchez-Lavega et al. (1998), Vincent et al. (2000)).

Tabla 2.1: Imágenes utilizadas en este proyecto.

<i>Fecha</i>	<i>Número de imágenes</i>	<i>Filtro</i>
14 Mayo 1996	6	F255W
14 Mayo 1996	16	F673N
14 Mayo 1996	11	FQCHA4N
19 Enero 2015	13	F275W
19 Enero 2015	26	F631N
19 Enero 2015	13	FQ889N
9 Febrero 2016	9	F275W
9 Febrero 2016	18	F631N
9 Febrero 2016	10	FQ889N
3 Abril 2017	12	F275W
3 Abril 2017	21	F631N
3 Abril 2017	12	FQ889N
17 Abril 2018	11	F275W
17 Abril 2018	24	F631N
17 Abril 2018	13	FQ889N
26-27 Junio 2019	8	F275W
26-27 Junio 2019	7	F631N
26-27 Junio 2019	11	FQ889N

# Capítulo 3

## Metodología

En este capítulo se expone el procedimiento que se ha seguido para obtener los resultados y conclusiones que se expondrán en los capítulos siguientes. Este procedimiento, que consiste en recopilar una serie de datos que serán necesarios para trabajar con ellos y obtener los resultados deseados, es bastante extenso puesto que se necesitan recopilar bastantes datos para realizar los cálculos precisos. Para ello se utilizan una serie de programas que exponemos a continuación.

- **LAIA**

LAIA (Laboratorio de Análisis de Imágenes Astronómicas) es un software desarrollado por J.A. Cano y que se ha utilizado para navegar las imágenes en formato *fits* de la base de datos del HST.

- **Programa de procesado de imágenes**

Para poder crear proyecciones polares completas de Júpiter, que es el planeta de nuestro interés, es necesario un programa de procesado de imágenes.

- **Hoja de cálculo**

Con el fin de realizar las medidas necesarias tenemos que emplear una hoja de cálculo debido a la gran cantidad de datos recopilados.

- **PICV**

Programa escrito en el lenguaje de programación IDL y desarrollado en el Grupo de Ciencias Planetarias (GCP) de la UPV/EHU (Hueso *et al.*, 2010). Este programa, mediante correlación automática, permite medir el movimiento de los detalles nubosos presentes en la atmósfera y calcular así la velocidad del viento.

### 3.1. Navegación de imágenes

Todas las imágenes mencionadas en el [Capítulo 2](#), las tenemos recopiladas en un fichero con sus propiedades más relevantes, es decir, fecha, hora, filtro... ([Figura 3.1](#)). Para poder realizar medidas en esas imágenes hay que navegarlas, es decir, asignarle a cada pixel una latitud y una longitud. Este proceso se lleva a cabo con el software LAIA. El primer paso para navegar la imagen es rotarla para colocarla en horizontal siendo de gran ayuda el patrón de bandas de Júpiter que tomaremos como referencia a la hora de colocar la

## 3.2. Proyecciones Polares

dataset	release date	PI name	start time	Instr	i_cfg	Filter	MC1(°)	MC2(°)	MC3(°)
IDUY09MSQ	2019/06/27	SIMON	2019/06/26 08:36:07	WFC3	WFC3/UVIS	F275W	259°	301°	276°
IDUY10NAQ	2019/06/27	SIMON	2019/06/26 10:11:30	WFC3	WFC3/UVIS	F275W	317°	359°	333°
IDUY11NQ	2019/06/27	SIMON	2019/06/26 12:03:23	WFC3	WFC3/UVIS	F275W	25°	67°	41°
IDUY12NZQ	2019/06/27	SIMON	2019/06/26 13:22:17	WFC3	WFC3/UVIS	F275W	73°	114°	89°
IDUY13OAJQ	2019/06/27	SIMON	2019/06/26 15:14:11	WFC3	WFC3/UVIS	F275W	142°	182°	156°
IDUY14OJQ	2019/06/27	SIMON	2019/06/26 16:33:04	WFC3	WFC3/UVIS	F275W	190°	230°	204°
IDUY15OUQ	2019/06/27	SIMON	2019/06/26 18:25:21	WFC3	WFC3/UVIS	F275W	258°	298°	272°
IDUY16PAQ	2019/06/27	SIMON	2019/06/26 21:19:15	WFC3	WFC3/UVIS	F275W	4°	43°	17°
IDUY17PLQ	2019/06/27	SIMON	2019/06/26 22:54:33	WFC3	WFC3/UVIS	F275W	62°	100°	75°
IDUY18Q4Q	2019/06/27	SIMON	2019/06/27 00:46:54	WFC3	WFC3/UVIS	F275W	131°	168°	143°
IDUY19RIQ	2019/06/27	SIMON	2019/06/27 02:05:25	WFC3	WFC3/UVIS	F275W	179°	216°	190°
IDUY20RQQ	2019/06/27	SIMON	2019/06/27 03:57:40	WFC3	WFC3/UVIS	F275W	247°	283°	258°
IDUY21SAQ	2019/06/27	SIMON	2019/06/27 05:16:12	WFC3	WFC3/UVIS	F275W	295°	331°	306°

Figura 3.1: Fichero de las imágenes con sus respectivas propiedades.

imagen en horizontal. Para este paso utilizaremos la herramienta de rotar incorporada en LAIA colocando una línea auxiliar sobre la imagen (Figura 3.2). Posteriormente le aplicaremos la herramienta de espejo horizontal. Una vez rotada la imagen para poder tenerla completamente navegada hay que delimitar el limbo<sup>4</sup> del planeta. Para realizar esto hay dos opciones:

- Marcar donde se encuentra el norte, el sur y un punto del limbo y el software se encarga de delimitar el planeta (Figura 3.3).
- Marcar varios puntos en el limbo del planeta y definir la elipse que se ajuste a dichos puntos con la herramienta que tiene incorporada LAIA (Figura 3.4). De esta forma el sur del planeta se encuentra arriba. Esta opción ha sido empleada en la navegación de las imágenes de 1996 citadas en la Tabla 2.1, ya que no tenemos polo norte y sur disponibles.

Una vez realizado lo anterior tenemos la imagen totalmente navegada (Figura 3.5).

## 3.2. Proyecciones Polares

Empleando la herramienta de proyección polar que proporciona LAIA (Figura 3.6), proyectamos polarmente las imágenes del HST puesto que nuestro trabajo se centra en las zonas polares del planeta Júpiter y es la mejor manera de visualizarlas. Para poder conseguir una proyección polar completa se debe componer, con un editor de imágenes, 6 proyecciones polares (Figura 3.7) de imágenes separadas 90-100 minutos entre sí, para lograr una rotación completa de Júpiter. En el proceso de la unificación de las proyecciones polares habrá zonas comunes que se deberán fusionar (Figura 3.8) obteniendo así las proyecciones polares completas (Figura 3.9).

<sup>4</sup>Limbo: la región más alejada desde el centro del cuerpo, es decir, el borde.

## Capítulo 3. Metodología

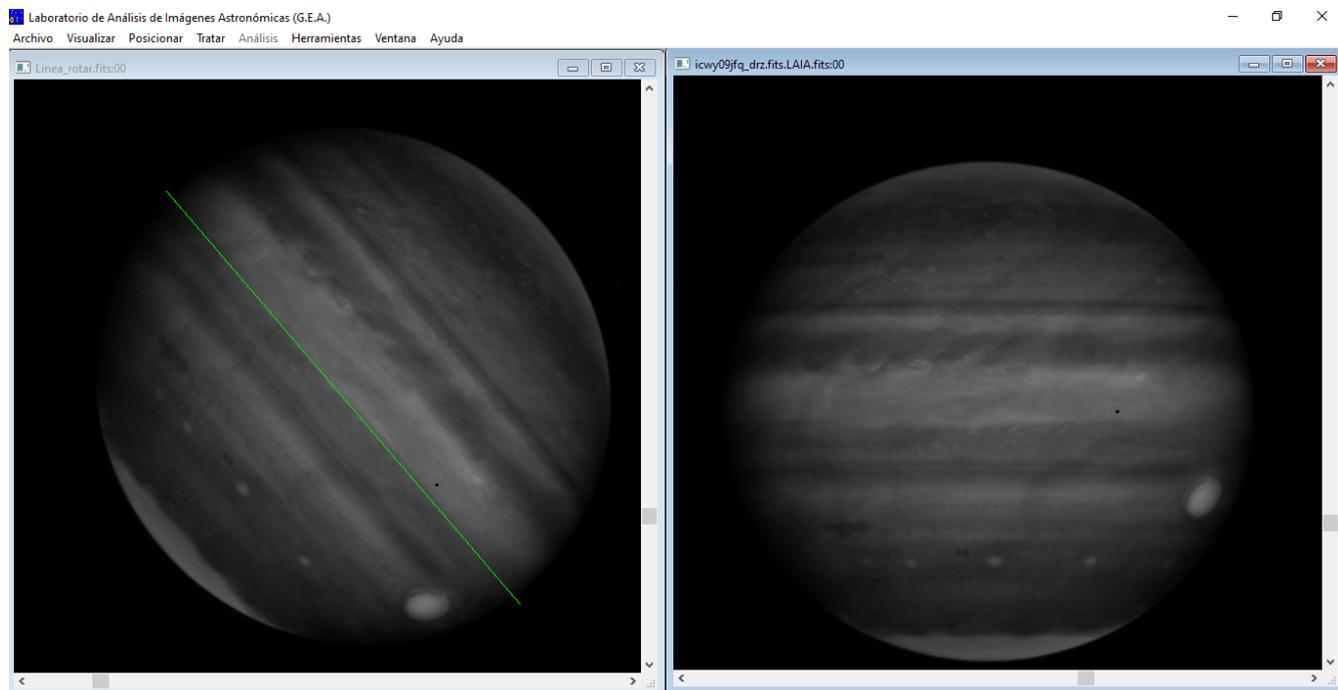


Figura 3.2: Navegación de las imágenes con LAIA.

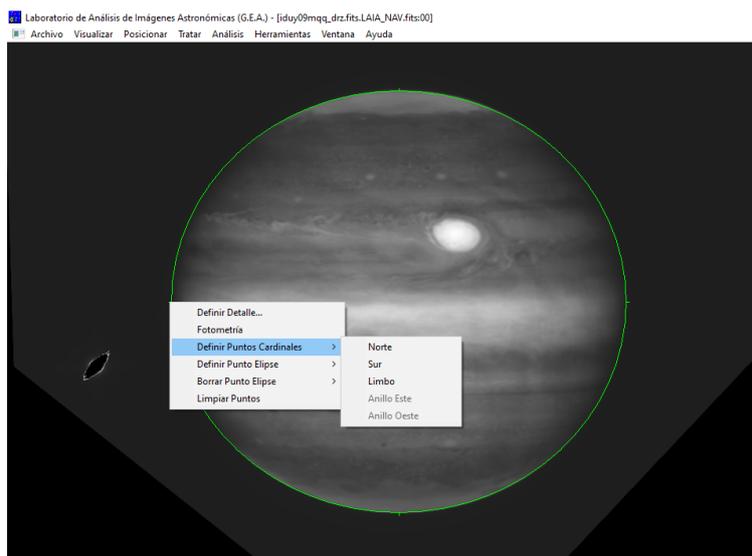


Figura 3.3: Delimitación de Júpiter mediante los puntos cardinales.

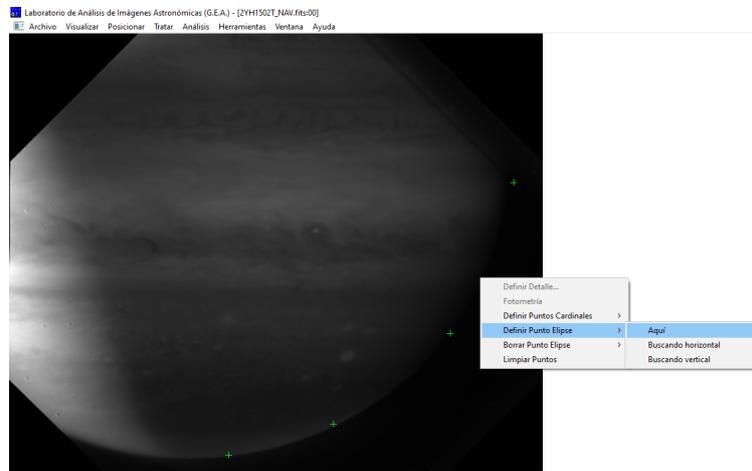


Figura 3.4: Los puntos verdes han sido marcados manualmente para que después LAIA dibuje la elipse que mejor se ajusta a los puntos del limbo dibujados manualmente.

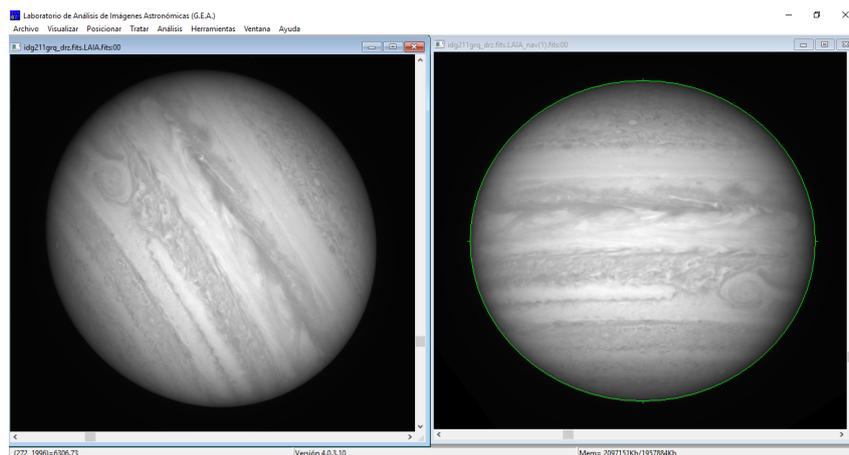


Figura 3.5: Navegación de las imágenes con LAIA, a la izquierda la imagen sin navegar y a la derecha la imagen obtenida después del proceso de navegación descrito.

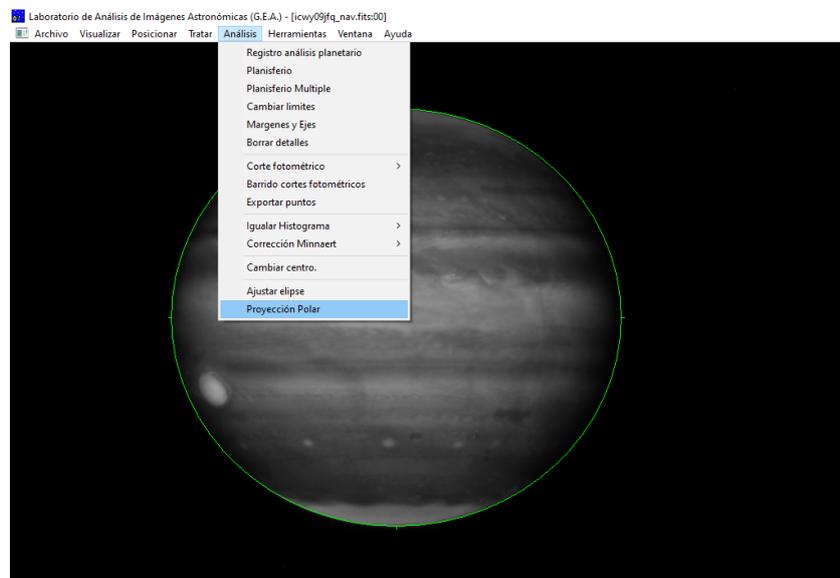


Figura 3.6: Herramienta para crear las proyecciones polares en LAIA.

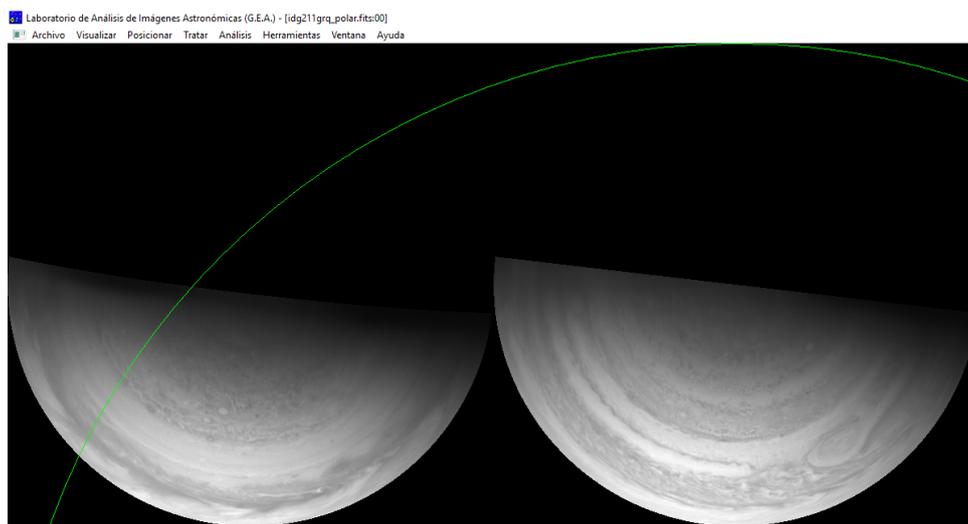


Figura 3.7: Proyección polar norte (izquierda) y sur (derecha) obtenidas con la herramienta de LAIA.

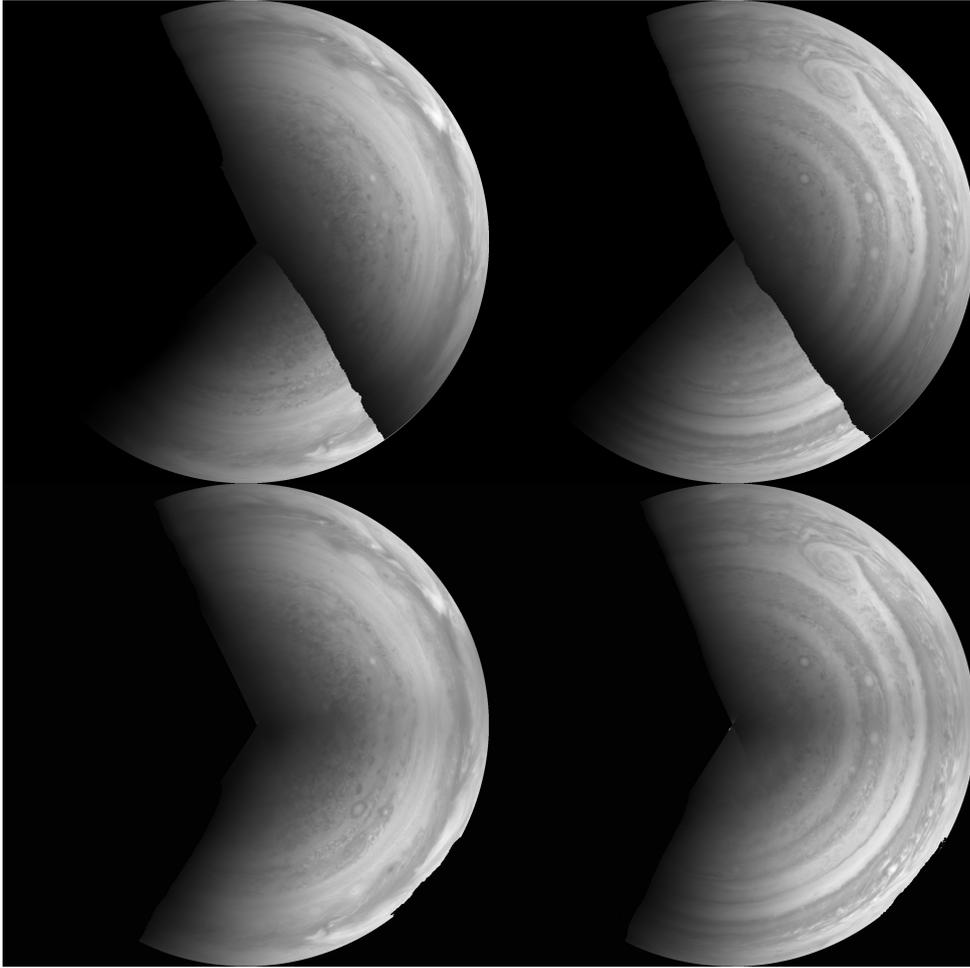


Figura 3.8: Resultado intermedio obtenido al fusionar las zonas comunes de las proyecciones polares.

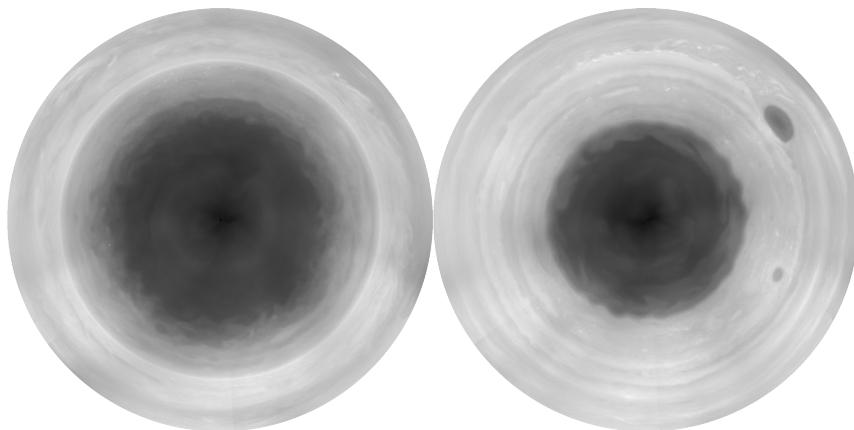


Figura 3.9: Resultado final obtenido para las proyecciones polares completas del Norte (izquierda) y del Sur (derecha).

### 3.3. Proyecciones Cilíndricas

LAIA también dispone de una herramienta para proyectar cilíndricamente (Figura 3.10) las imágenes del planeta. En nuestro caso, haremos proyecciones cilíndricas o planisferios (Figura 3.11) que van de  $-90^\circ$  a  $90^\circ$  de latitud y utilizaremos para obtener los perfiles de viento, como veremos en Sección 3.5.

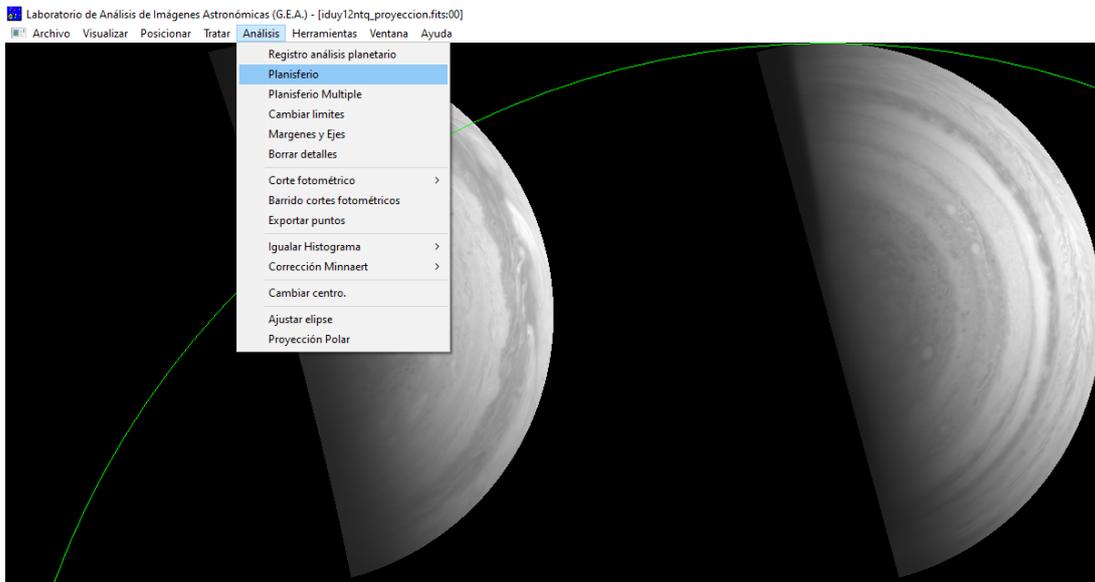


Figura 3.10: Herramienta de LAIA para crear los planisferios.

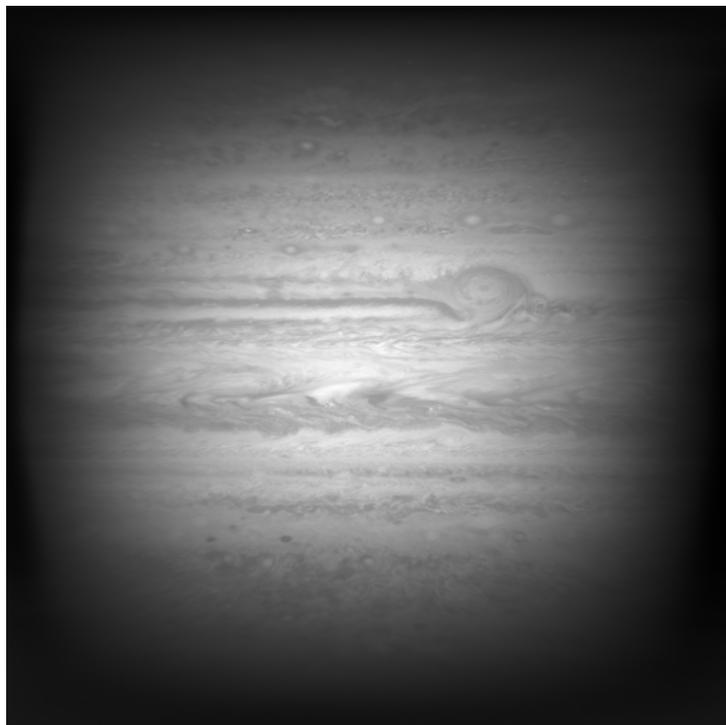


Figura 3.11: Planisferio obtenido con LAIA.

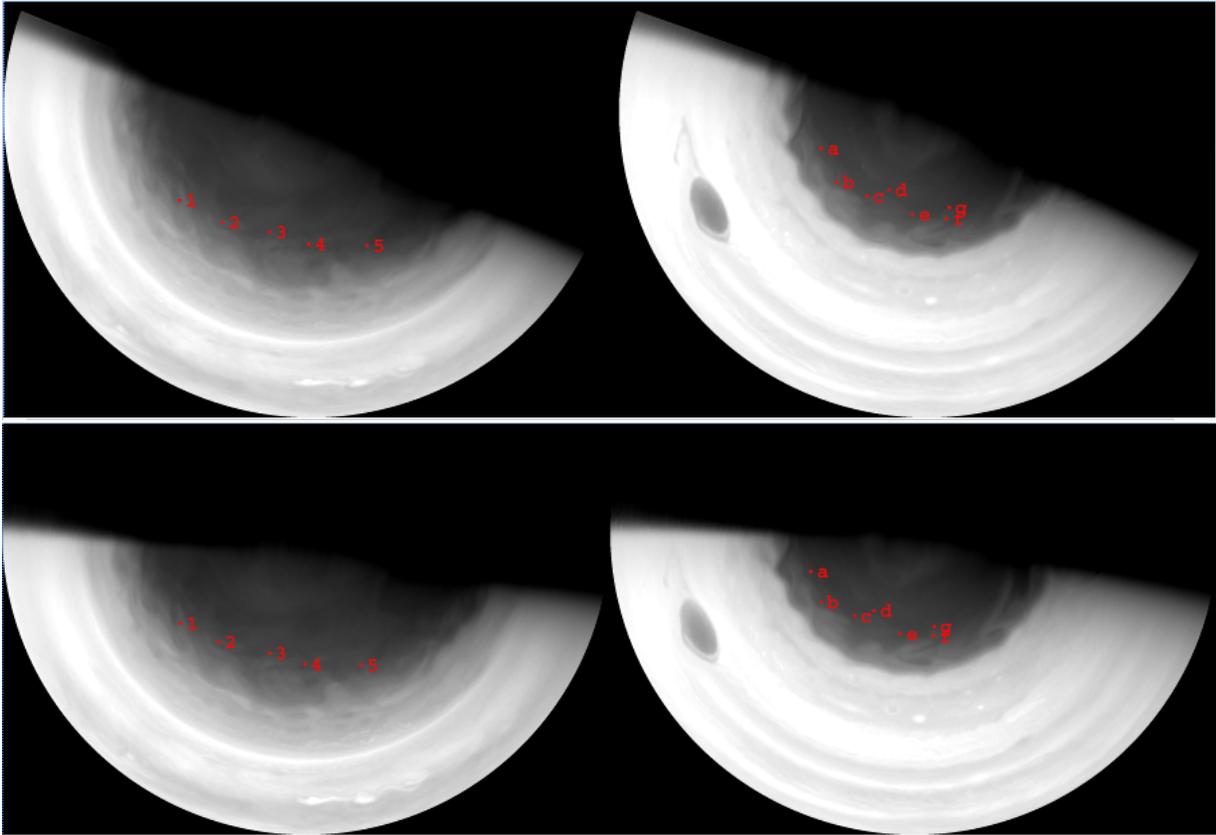


Figura 3.12: Área común de dos imágenes separadas una o dos rotaciones de Júpiter.

### 3.4. Análisis de imágenes

Para la medida de los movimientos de los detalles nubosos y posterior cálculo de su velocidad usaremos dos métodos: el método “cloud tracking” manual empleado para medir la velocidad de fase de la onda con las proyecciones polares obtenidas como se ha comentado en la [Sección 3.2](#) y el método de correlación automática con el que obtenemos los perfiles de vientos.

El método “cloud tracking” consiste en coger un par de imágenes separadas 10h o 20h aproximadamente (una o dos rotaciones de Júpiter), de tal forma que, observemos el mismo área del planeta en ambas imágenes ([Figura 3.12](#)). En algunos casos puede realizarse lo mismo pero comparando 3 imágenes separadas 10h cada una, de tal forma que la primera y la última están separadas por dos rotaciones. En este caso los resultados obtenidos son mejores puesto que la diferencia de tiempo es mayor y por lo tanto los errores de medición se minimizan. Una vez que las dos o tres imágenes estén navegadas hacemos un seguimiento de los mismos detalles, es decir, medimos con LAIA la latitud planetocéntrica y la longitud (sistema III) de los detalles comunes en dichas imágenes (números y letras de la [Figura 3.12](#)). Posteriormente calculamos la velocidad zonal  $u$  de cada detalle mediante la [Ecuación 3.1](#).

$$u = -\frac{\pi}{180^\circ} R(\theta) \cos(\theta) \frac{\Delta\lambda}{\Delta t} \quad (3.1)$$

donde  $\Delta\lambda$  es la variación en longitud,  $\Delta t$  el tiempo transcurrido y  $R(\theta)$  el radio planetario

que se define como:

$$R(\theta) = \frac{R_e \cdot R_p}{\sqrt{R_e^2 \sin^2 \theta + R_p^2 \cos^2 \theta}} \quad (3.2)$$

con  $R_e$  y  $R_p$  los radios ecuatorial y polar respectivamente (ver [Tabla 1.1](#)).

La precisión de todas las medidas que se realizan depende de la resolución y del tiempo existente entre las imágenes puesto que  $u \propto \Delta\lambda/\Delta t$ . Por lo tanto, el error en la velocidad zonal ( $\delta u$ ) dependerá del error en la longitud y del error del intervalo de tiempo:

$$\delta u = \frac{\delta\lambda}{\Delta t}. \quad (3.3)$$

Cada imagen tiene una resolución de  $0,2^\circ/\text{pixel}$  a una latitud de  $60,6^\circ$ , es decir, una resolución de  $120 \text{ km}/\text{pixel}$  aproximadamente. En cada una de las medidas realizadas tenemos una imprecisión de 2 píxeles por lo que  $\delta\lambda=239,64$ . Considerando que el tiempo transcurrido entre imágenes es aproximadamente de  $10\text{h} \approx 36000 \text{ s}$  obtenemos que  $\delta u \approx 7 \text{ m/s}$ .

Además hay otro tipo de error, el dado por la desviación estándar de los datos, puesto que para obtener la velocidad media de cada latitud promediaremos las medidas individuales bineando<sup>5</sup> los datos cada  $1^\circ$ . Considerando todo esto, siempre se tomará el error más alto.

Una vez que tenemos recopilados todos los resultados de la velocidad se pueden representar para saber a qué latitud se encuentra la onda, corroborar que las imágenes han sido correctamente navegadas y además comprobar que los detalles medidos se ajustan bien al perfil de vientos disponible del año 2016 ([Hueso et al., 2017](#)). Los datos obtenidos se muestran gráficamente en el [Capítulo 4](#).

Por otro lado, el otro método consiste en conseguir puntos por correlación automática empleando el programa PICV, escrito en el lenguaje de programación IDL y desarrollado en el Grupo de Ciencias Planetarias (GCP) de la UPV/EHU ([Hueso et al., 2010](#)). En este último caso debemos introducir dos proyecciones cilíndricas o planisferios de Júpiter separadas por un intervalo temporal de aproximadamente una rotación para que haya más área común. El programa automáticamente irá detectando detalles en común en ambas imágenes que podrán ser validados manualmente, y calculando la velocidad a la que se mueven éstos detalles.

### 3.5. Perfiles de vientos

Los perfiles de vientos completos se pueden obtener por dos métodos. Por un lado el “cloud tracking” manual, que lo usaremos para verificar los perfiles como se ha comentado en la [Sección 3.4](#). Con dicho método se obtienen varios puntos, al representar latitud frente a velocidad, en latitudes polares. Por otro lado, el método de correlación automática lo usaremos para calcular los perfiles de vientos, para lo que debemos introducir dos planisferios de Júpiter e indicarle al programa el valor de correlación mínima y el movimiento permitido en el eje Y y en el eje X para que identifique en los planisferios introducidos

---

<sup>5</sup>Binear: consiste en hacer el promedio de datos comprendidos en un intervalo.

los detalles comunes (Figura 3.13). Las áreas seleccionadas para realizar la búsqueda (regiones sombreadas de la Figura 3.14) se seleccionan evitando los detalles de gran escala (GRS, óvalos...). A lo largo del proceso de correlación, el software divide cada región en cajas horizontalmente largas y latitudinalmente estrechas, que se comparan con las latitudes equivalentes de la imagen después de una rotación (10 h después) como se observa en la Figura 3.14. El software dibuja vectores de viento en cada medida (imagen de la derecha de la Figura 3.14) y por último, el programa PICV nos generará un archivo con la latitud, longitud y velocidad zonal de cada punto correlacionado.

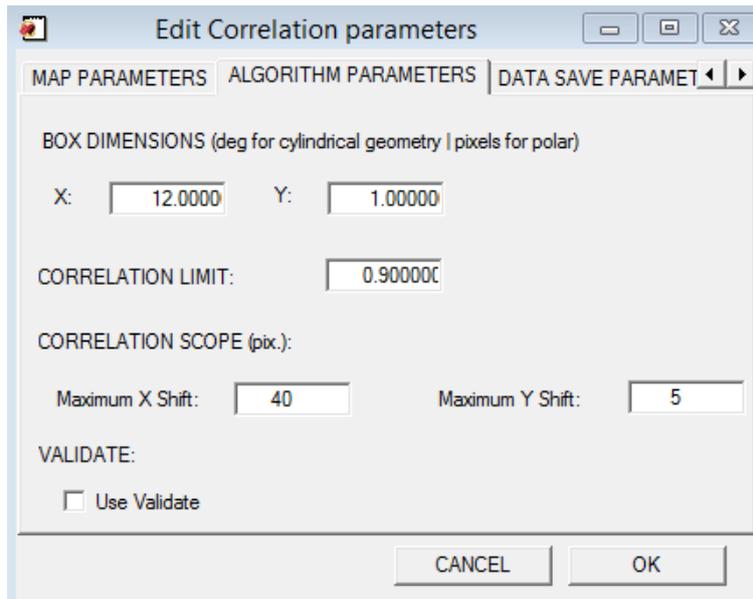


Figura 3.13: Definición de los parámetros de correlación en IDL.

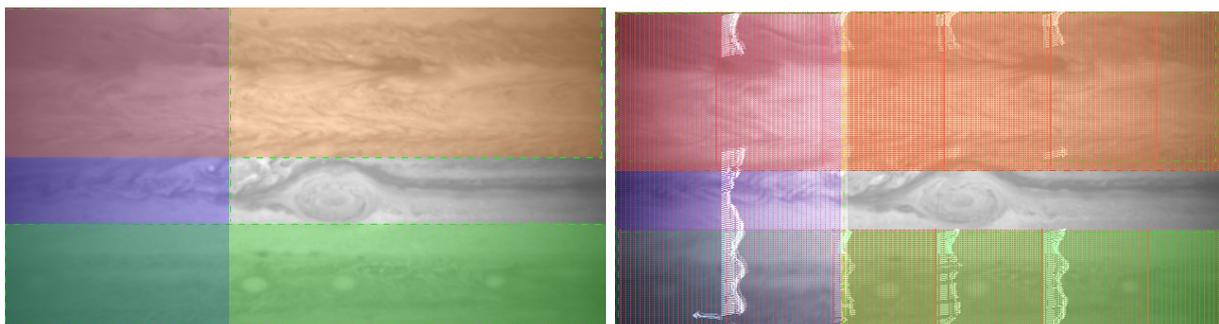


Figura 3.14: Regiones de búsqueda para el proceso de correlación, de la misma región del planeta pero con una diferencia temporal de 10 h entre la imagen de la izquierda y la derecha. En esta última también se muestran los vectores de viento de cada medida.

# Capítulo 4

## Resultados

En este capítulo se recogen los resultados que se obtienen al desarrollar la metodología descrita en el [Capítulo 3](#).

### 4.1. Proyecciones Polares

La diferencia observable entre las proyecciones polares es que en los filtros de metano (FQ889N, FQCHA4N) y ultravioleta (F275W, F255W), que se utilizan para observar las nieblas más altas del planeta, observamos que las nieblas se encuentran confinadas por una onda tanto en el norte como en el sur, siendo la onda más definida en el filtro del metano. La onda del norte observada en el filtro del ultravioleta es la más difusa. Por otro lado, en el filtro infrarrojo (F631N, F637N) no se observa ninguna onda puesto que se trata de la longitud de onda más penetrante.

Las proyecciones polares completas se obtienen componiendo 6 proyecciones polares obtenidas con LAIA ([Sección 3.2](#)) con un programa de edición de imágenes, como se ha comentado en el [Capítulo 3](#). A continuación se mostrarán las proyecciones completas correspondientes a los filtros ultravioleta, infrarrojo cercano y metano para los años 1996, 2015, 2016, 2017, 2018 y 2019.

#### Proyecciones Polares de 1996

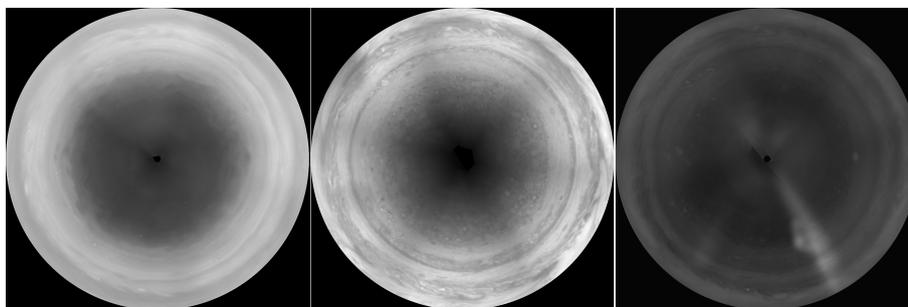


Figura 4.1: Proyecciones polares norte compuestas con las imágenes obtenidas con el filtro ultravioleta (izquierda), infrarrojo (centro) y metano (derecha) por HST. Con las imágenes de este año sólo es posible componer la proyección polar completa del polo norte.

## Proyecciones Polares de 2015

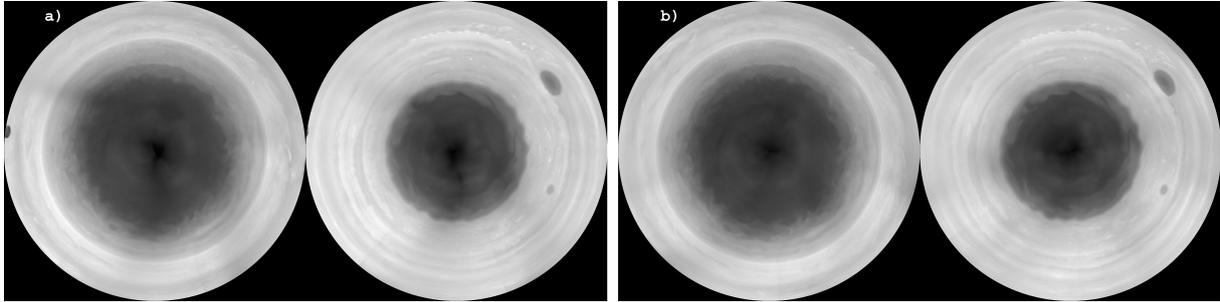


Figura 4.2: (a) Proyecciones polares norte y sur respectivamente, compuestas con imágenes obtenidas con el filtro ultravioleta (F275W) por HST. (b) Lo mismo que en (a) pero una rotación después, esto es, 10h después.

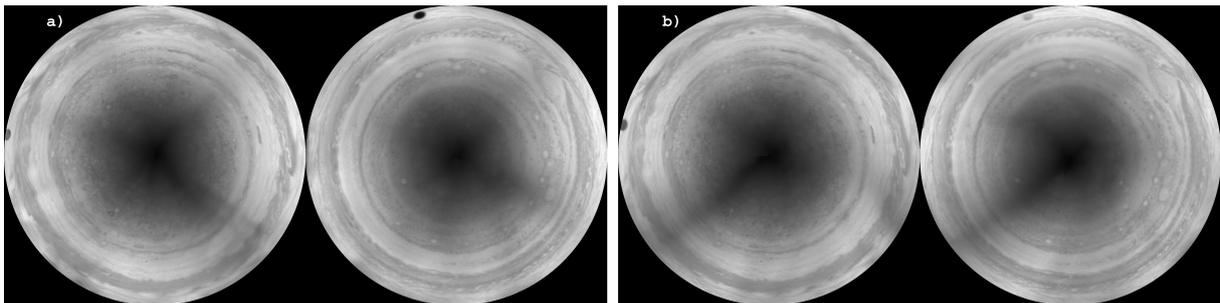


Figura 4.3: (a) Proyecciones polares norte y sur respectivamente, compuestas con imágenes obtenidas con el filtro infrarrojo cercano (F631N) por HST. (b) Lo mismo que en (a) pero una rotación después, esto es, 10h después.

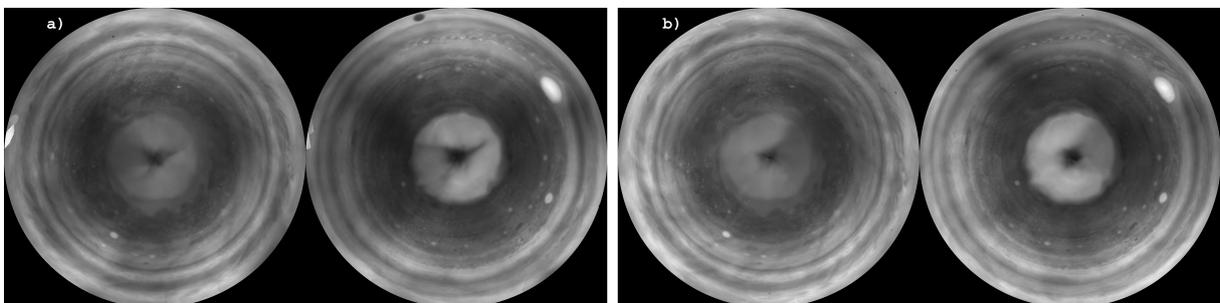


Figura 4.4: (a) Proyecciones polares norte y sur respectivamente, compuestas con imágenes obtenidas con el filtro metano (FQ889N) por HST. (b) Lo mismo que en (a) pero una rotación después, esto es, 10h después.

Proyecciones Polares de 2016

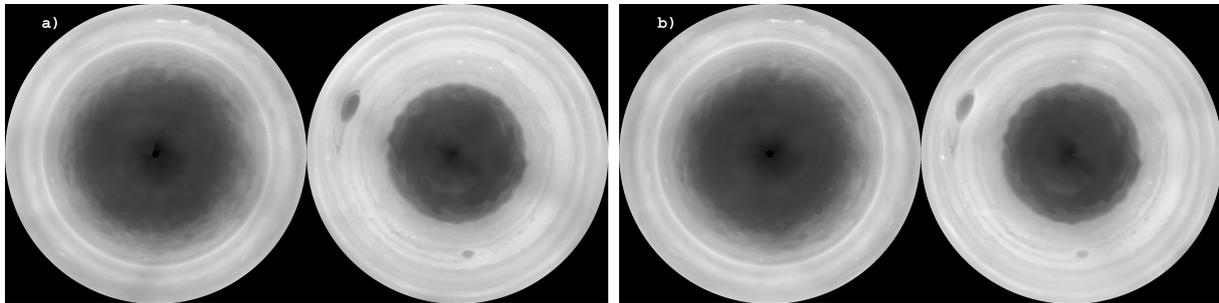


Figura 4.5: (a) Proyecciones polares norte y sur respectivamente, compuestas con imágenes obtenidas con el filtro ultravioleta (F275W) por HST. (b) Lo mismo que en (a) pero una rotación después, esto es, 10h después.

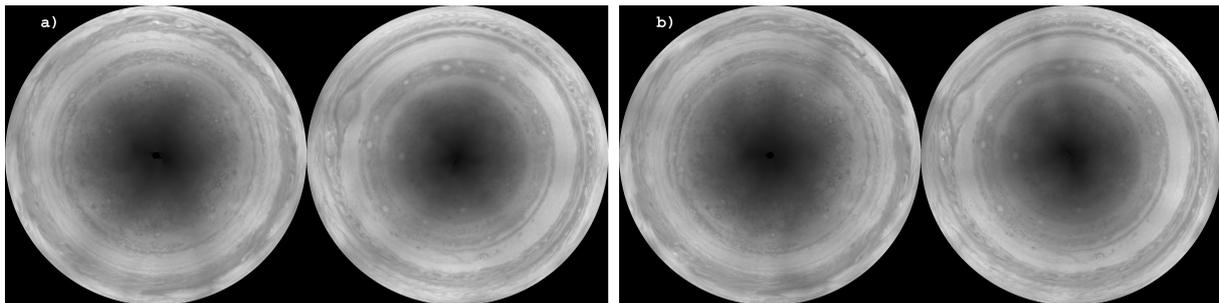


Figura 4.6: (a) Proyecciones polares norte y sur respectivamente, compuestas con imágenes obtenidas con el filtro infrarrojo cercano (F631N) por HST. (b) Lo mismo que en (a) pero una rotación después, esto es, 10h después.

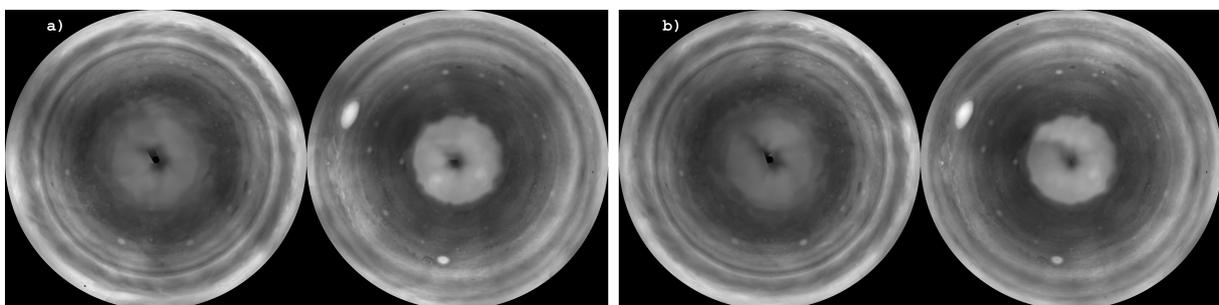


Figura 4.7: (a) Proyecciones polares norte y sur respectivamente, compuestas con imágenes obtenidas con el filtro metano (FQ889N) por HST. (b) Lo mismo que en (a) pero una rotación después, esto es, 10h después.

## Proyecciones Polares de 2017

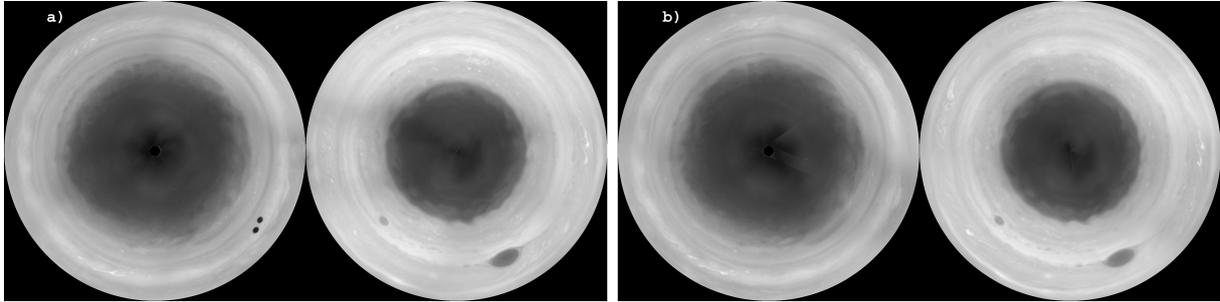


Figura 4.8: (a) Proyecciones polares norte y sur respectivamente, compuestas con imágenes obtenidas con el filtro ultravioleta (F275W) por HST. (b) Lo mismo que en (a) pero una rotación después, esto es, 10h después.

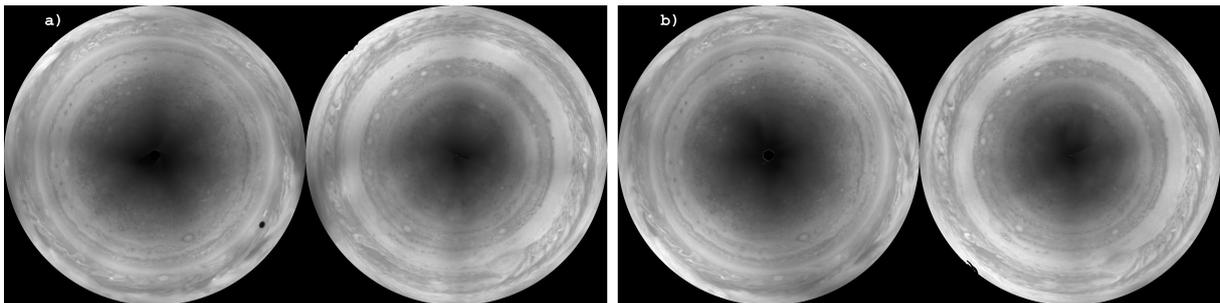


Figura 4.9: (a) Proyecciones polares norte y sur respectivamente, compuestas con imágenes obtenidas con el filtro infrarrojo cercano (F631N) por HST. (b) Lo mismo que en (a) pero una rotación después, esto es, 10h después.

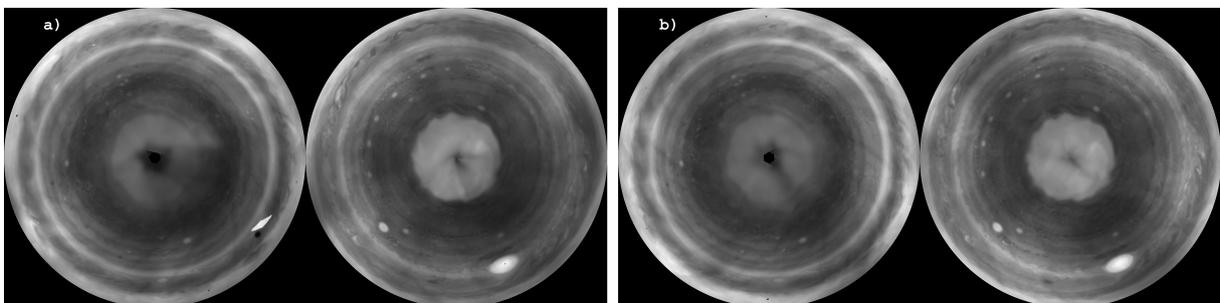


Figura 4.10: (a) Proyecciones polares norte y sur respectivamente, compuestas con imágenes obtenidas con el filtro metano (FQ889N) por HST. (b) Lo mismo que en (a) pero una rotación después, esto es, 10h después.

### Proyecciones Polares de 2018

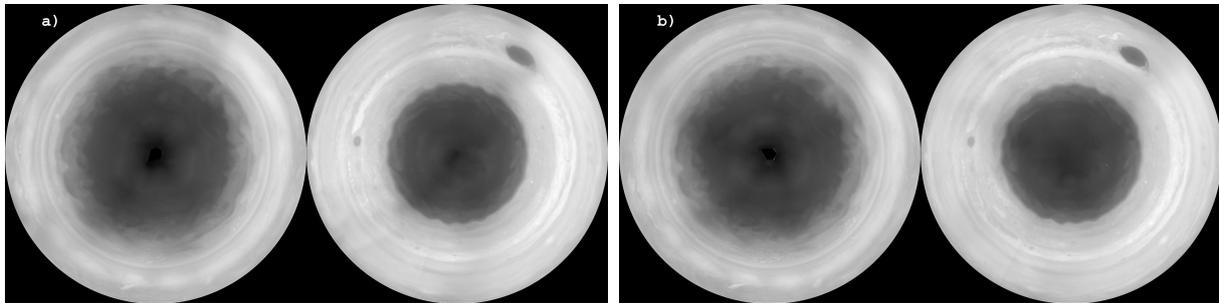


Figura 4.11: (a) Proyecciones polares norte y sur respectivamente, compuestas con imágenes obtenidas con el filtro ultravioleta (F275W) por HST. (b) Lo mismo que en (a) pero una rotación después, esto es, 10h después.

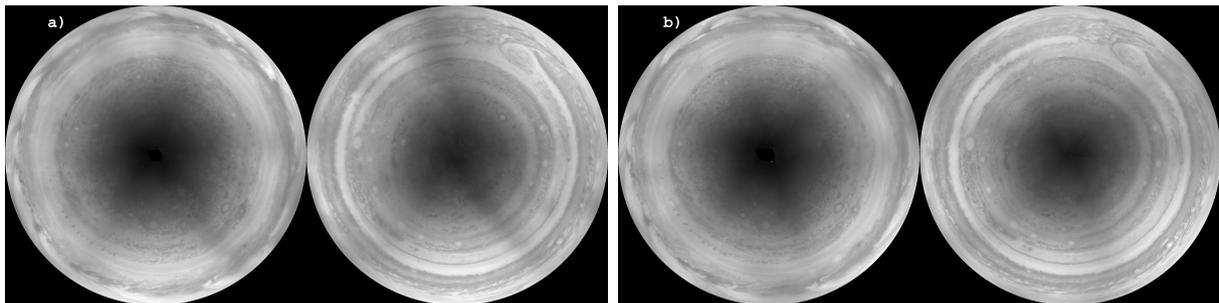


Figura 4.12: (a) Proyecciones polares norte y sur respectivamente, compuestas con imágenes obtenidas con el filtro infrarrojo (F631N) por HST. (b) Lo mismo que en (a) pero una rotación después, esto es, 10h después.

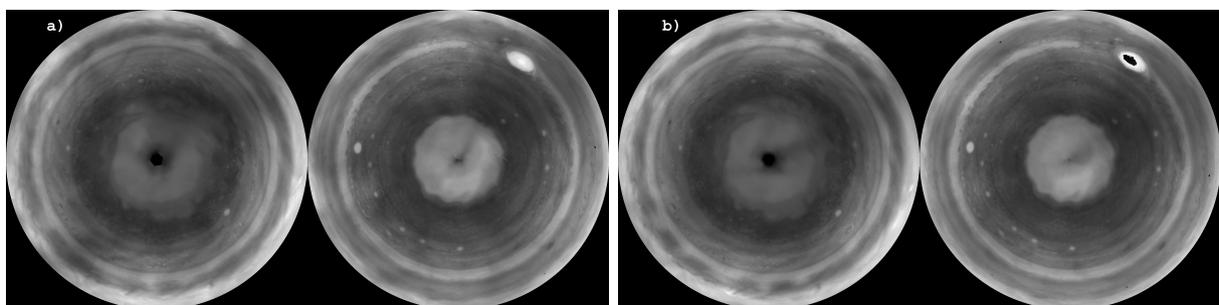


Figura 4.13: (a) Proyecciones polares norte y sur respectivamente, compuestas con imágenes obtenidas con el filtro metano (FQ889N) por HST. (b) Lo mismo que en (a) pero una rotación después, esto es, 10h después.

## Proyecciones Polares de 2019

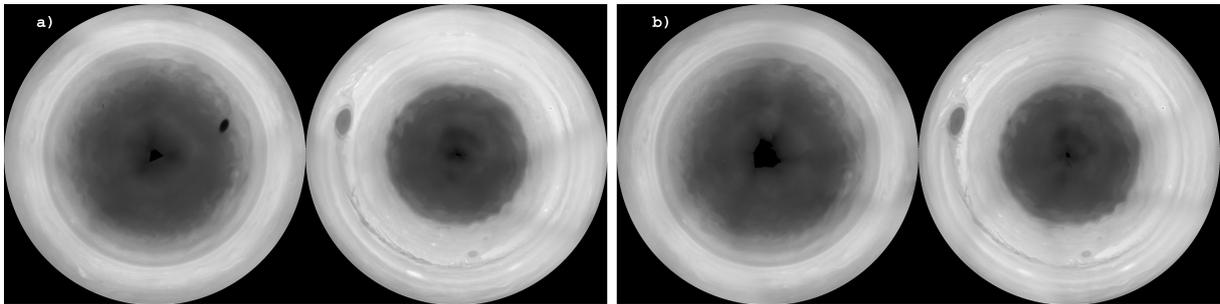


Figura 4.14: (a) Proyecciones polares norte y sur respectivamente, compuestas con imágenes obtenidas con el filtro ultravioleta (F275W) por HST. (b) Lo mismo que en (a) pero una rotación después, esto es, 10h después.

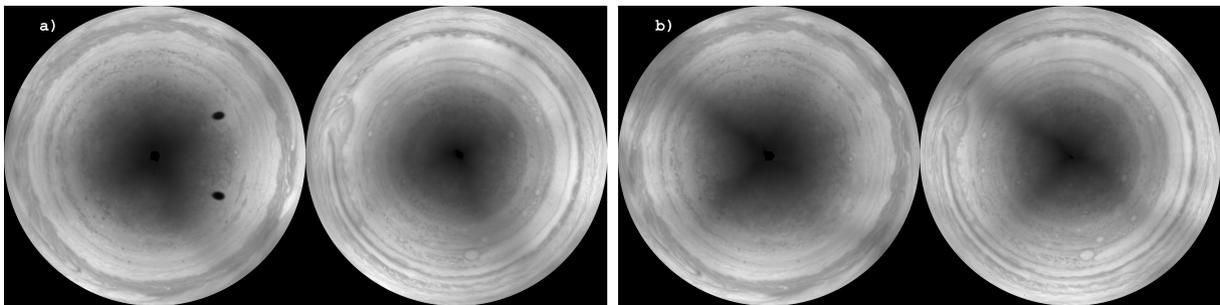


Figura 4.15: (a) Proyecciones polares norte y sur respectivamente, compuestas con imágenes obtenidas con el filtro infrarrojo cercano (F631N) por HST. (b) Lo mismo que en (a) pero una rotación después, esto es, 10h después.

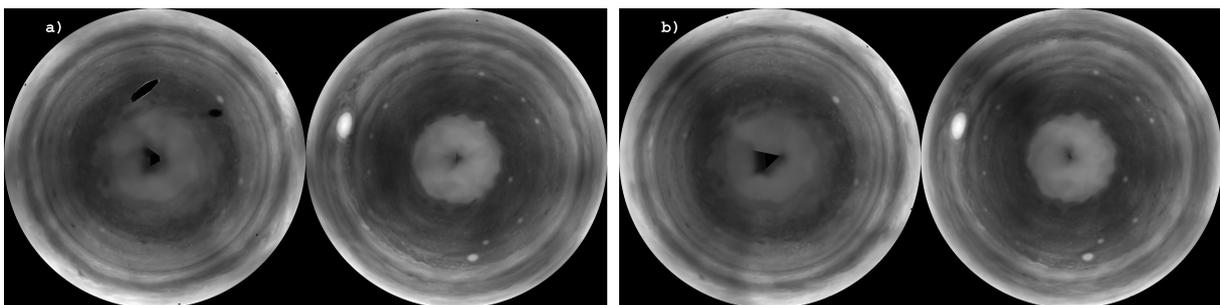


Figura 4.16: (a) Proyecciones polares norte y sur respectivamente, compuestas con imágenes obtenidas con el filtro metano (FQ889N) por HST. (b) Lo mismo que en (a) pero una rotación después, esto es, 10h después.

### 4.2. Perfiles de vientos

Siguiendo el procedimiento descrito en el [Capítulo 3](#), se han obtenido las velocidades zonales necesarias para representar los perfiles de viento del filtro infrarrojo (F631N). Para ello se han empleado varios pares de imágenes de cada año de estudio, de manera que obtenemos más de 2700 puntos en cada campaña de observación, que se binean y con los que posteriormente se dibujan los perfiles de vientos para cada uno de los años de estudio.

A continuación, se muestra una comparativa de los perfiles del filtro infrarrojo que hemos obtenidos para los años 2015, 2016, 2017, 2018, 2019 con el perfil de vientos que usaremos de referencia del filtro infrarrojo del año 2016 ([Hueso et al., 2017](#)). Gracias a estos perfiles obtendremos la velocidad media de la latitud a la que se encuentra la onda, que es una de las características que aparece en las tablas de la [Subsección 4.3.1](#).

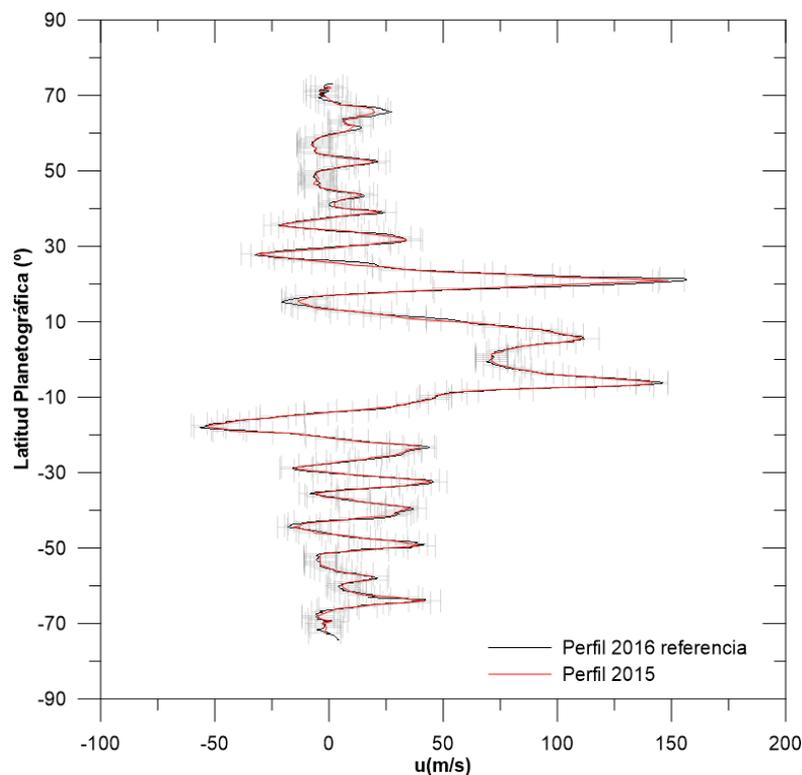


Figura 4.17: Perfil de vientos obtenido del año 2015, comparado con el perfil de referencia del año 2016 ([Hueso et al., 2017](#)).

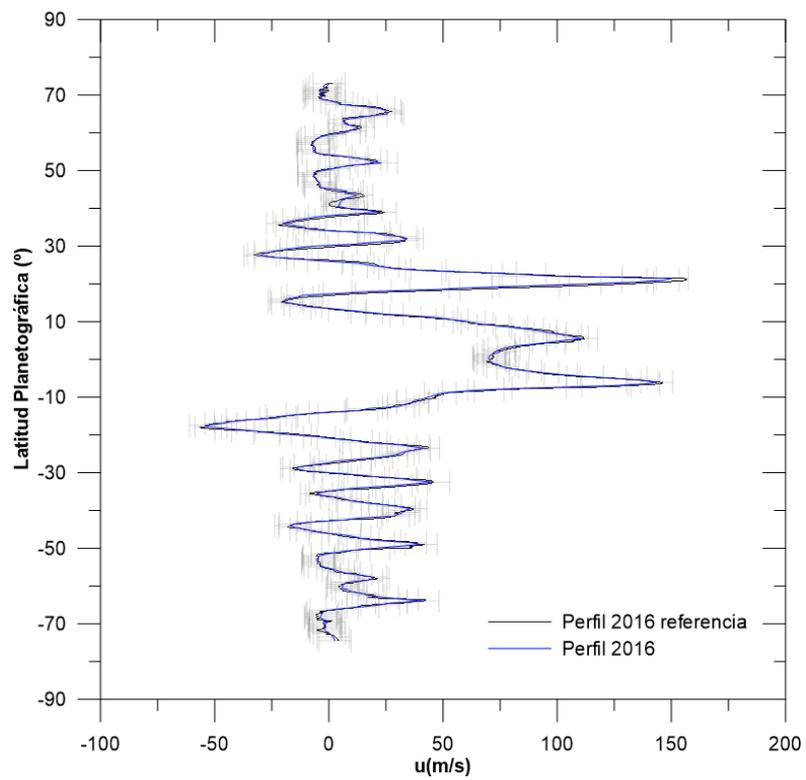


Figura 4.18: Perfil de vientos obtenido del año 2016, comparado con el perfil de referencia del año 2016 (Hueso et al., 2017).

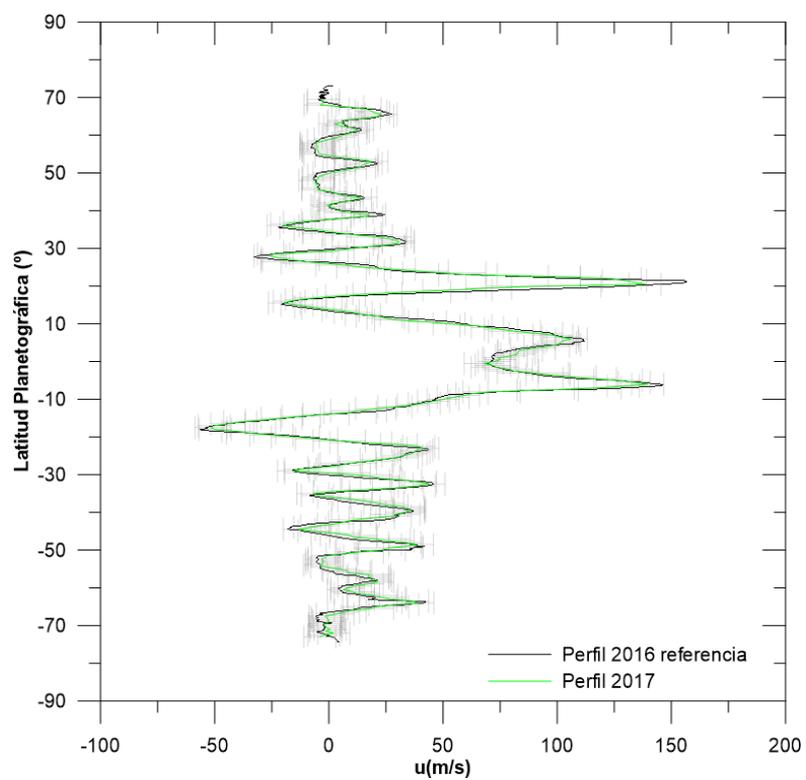


Figura 4.19: Perfil de vientos obtenido del año 2017, comparado con el perfil de referencia del año 2016 (Hueso et al., 2017).

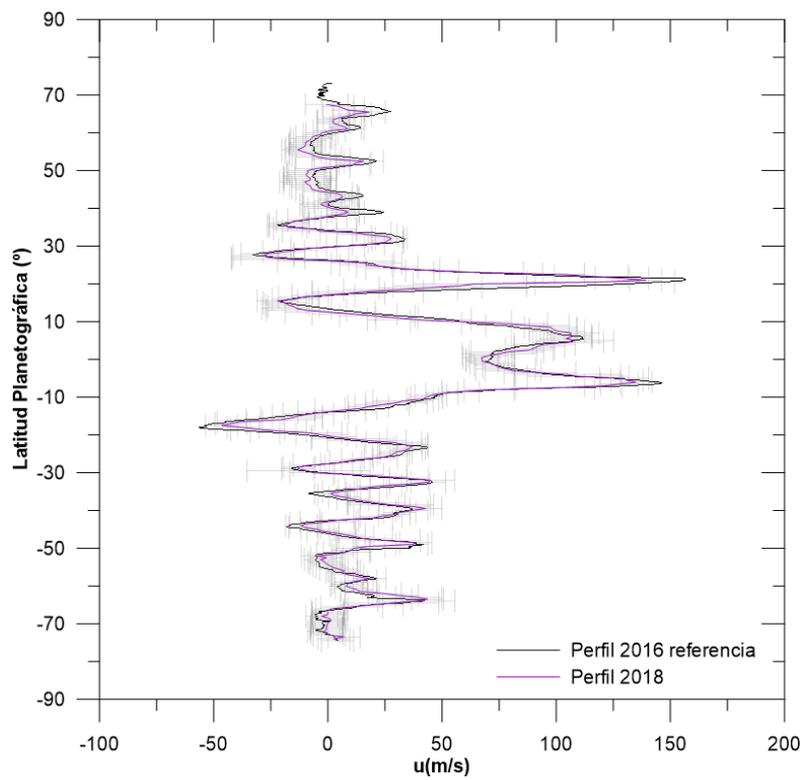


Figura 4.20: Perfil de vientos obtenido del año 2018, comparado con el perfil de referencia del año 2016 (Hueso et al., 2017).

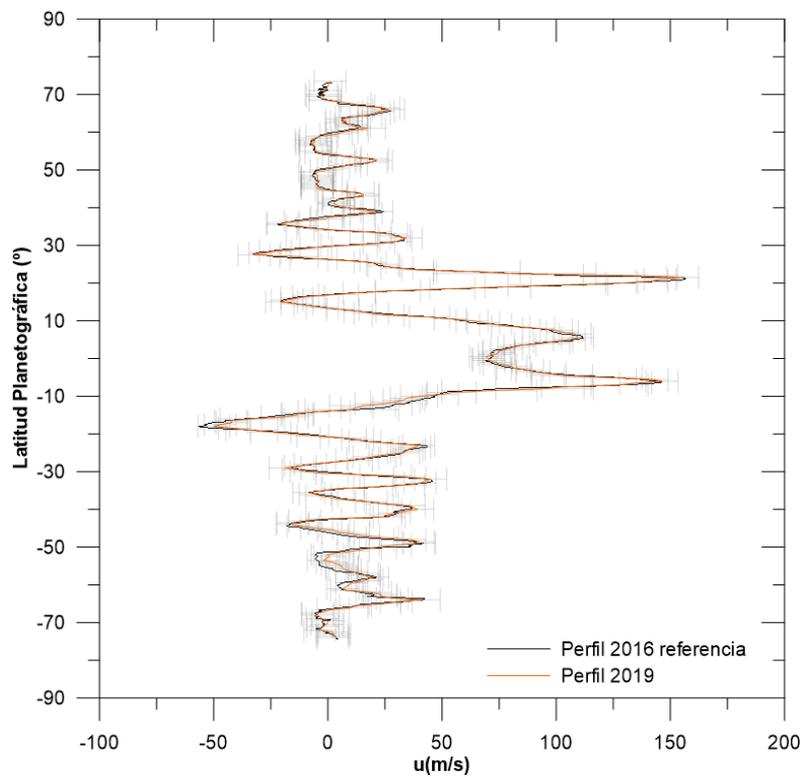


Figura 4.21: Perfil de vientos obtenido del año 2019, comparado con el perfil de referencia del año 2016 (Hueso et al., 2017).

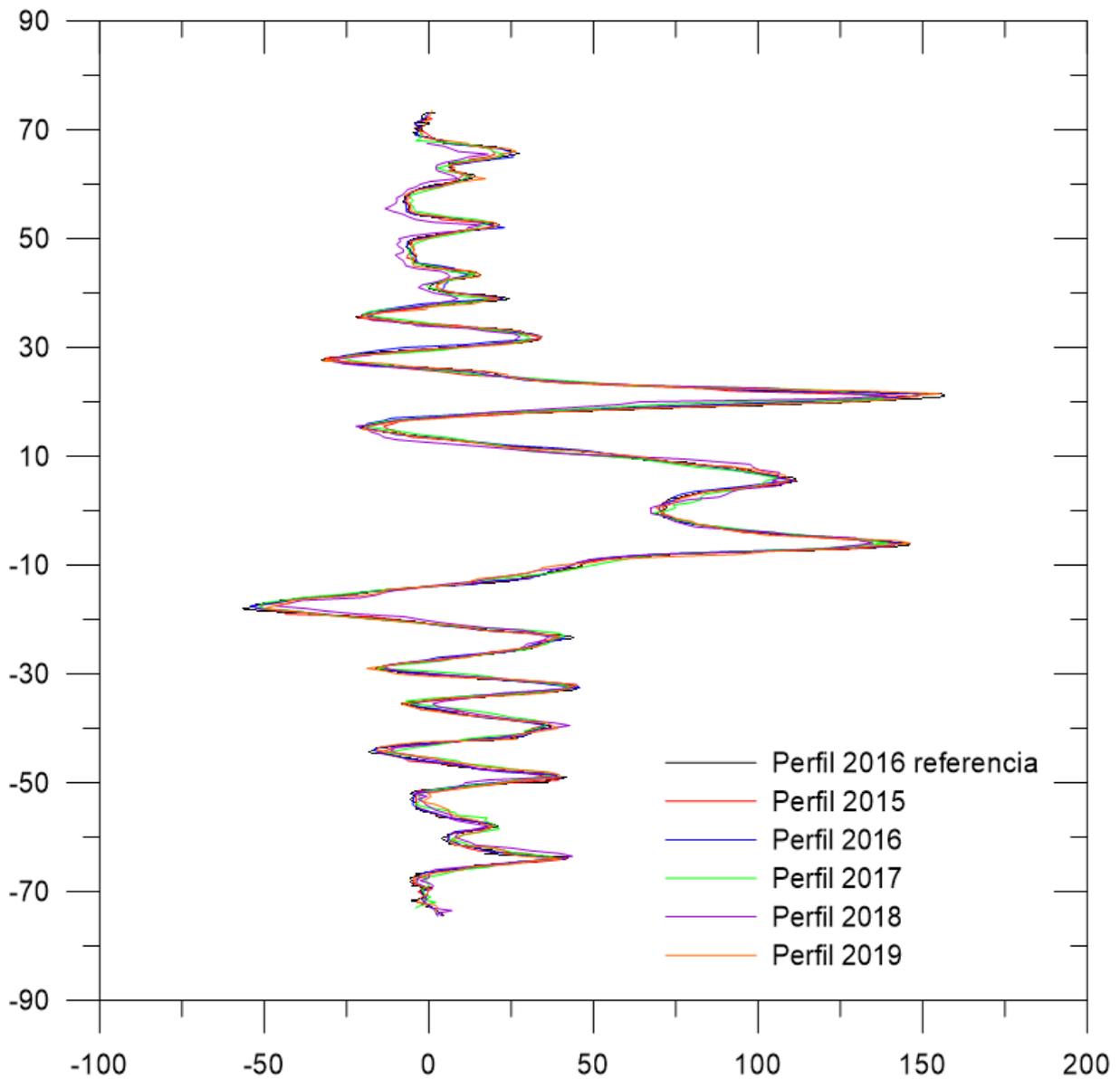


Figura 4.22: Comparación de los perfiles obtenidos para cada año de estudio.

En las [Figura 4.17](#), [Figura 4.18](#), [Figura 4.19](#), [Figura 4.20](#) y [Figura 4.21](#) observamos que los perfiles de viento del filtro infrarrojo (F631N) obtenidos en los años de estudio (2015, 2016, 2017, 2018, 2019) son análogos al perfil de viento de referencia del año 2016 ([Hueso et al., 2017](#)) y entre sí, como se muestra en la [Figura 4.22](#). Esto era de esperar ya que no se conoce completamente el origen de la estabilidad de estos vientos, pero se cree que dichos vientos están arraigados al interior del planeta, lo cual implica que ningún fenómeno atmosférico (perturbación, tormenta...) o exterior (colisión) haga que varíe significativamente el perfil de vientos como se ha podido verificar en trabajos como [Sánchez-Lavega et al. \(2008\)](#), [Sánchez-Lavega et al. \(2010\)](#) entre otros. Las pequeñas diferencias que observamos entre los perfiles estudiados en este trabajo y el perfil de referencia del 2016 ([Hueso et al., 2017](#)) son razonables y están dentro de lo que cabe esperar debido al error o pequeñas diferencias fenomenológicas existentes en la atmósfera.

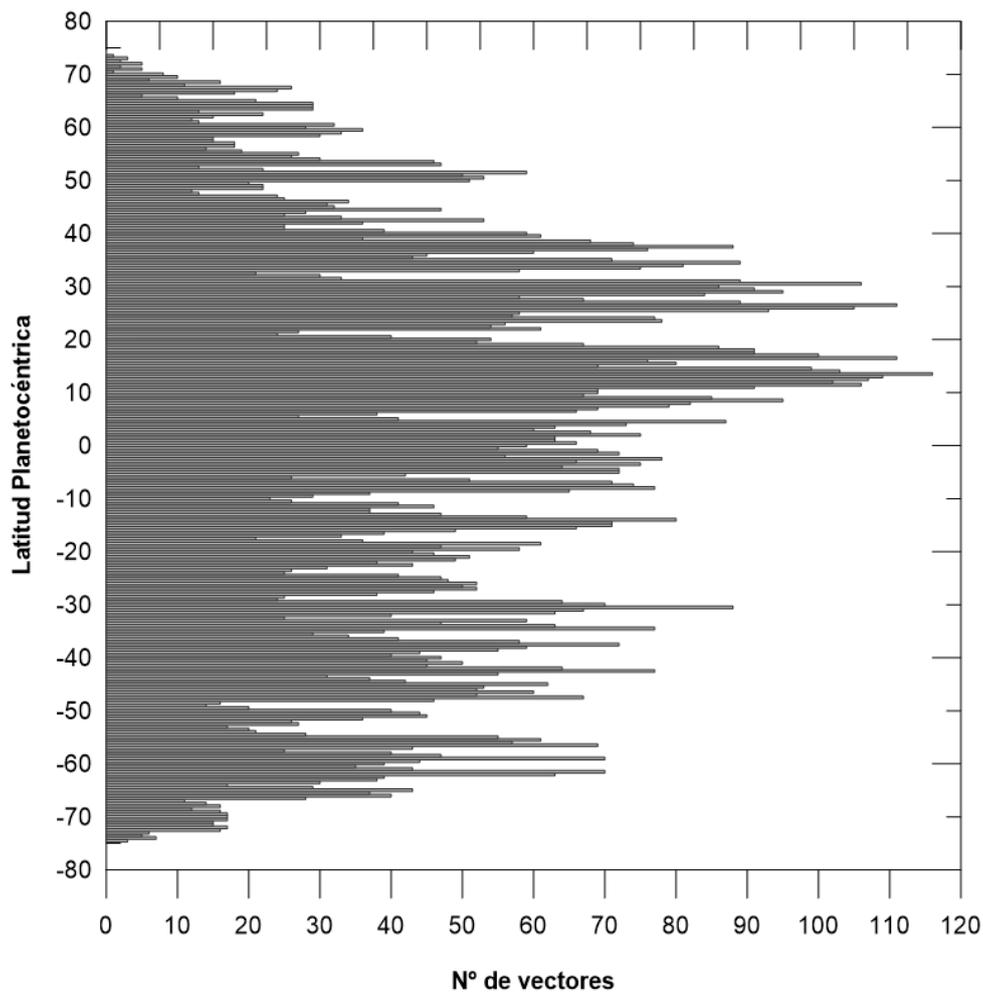


Figura 4.23: Representación del número de vectores de viento medidos por correlación automática en función de la latitud.

Por otro lado, representamos los 13925 vectores de viento totales (aproximadamente 2700 por cada año de estudio), conseguidos por el método de correlación automática que ha sido descrito en la [Sección 3.4](#), que se distribuyen latitudinalmente como se muestra en la [Figura 4.23](#). El número de vectores de viento obtenidos en cada latitud depende de la velocidad del viento en dicha latitud y de la morfología de las nubes de la atmósfera. Es más difícil encontrar trazadores para medir vientos en las zonas de mayor cizalla del viento que en las que la velocidad del viento es prácticamente nula.

### 4.3. Ondas circumpolares

Con el objetivo de observar y estudiar las nieblas que cubren las regiones polares de Júpiter y que se encuentran confinadas por un fenómeno ondulatorio, se han empleado dos filtros: el ultravioleta (F275W, F255W) y el metano (FQ889N, FQCHA4N). El filtro infrarrojo (F631N, F673N) se ha empleado para poder medir la velocidad zonal de la latitud a la que se localiza la onda, ya que con este filtro se observa la capa nubosa del planeta sobre la cual se sitúan estas nieblas.

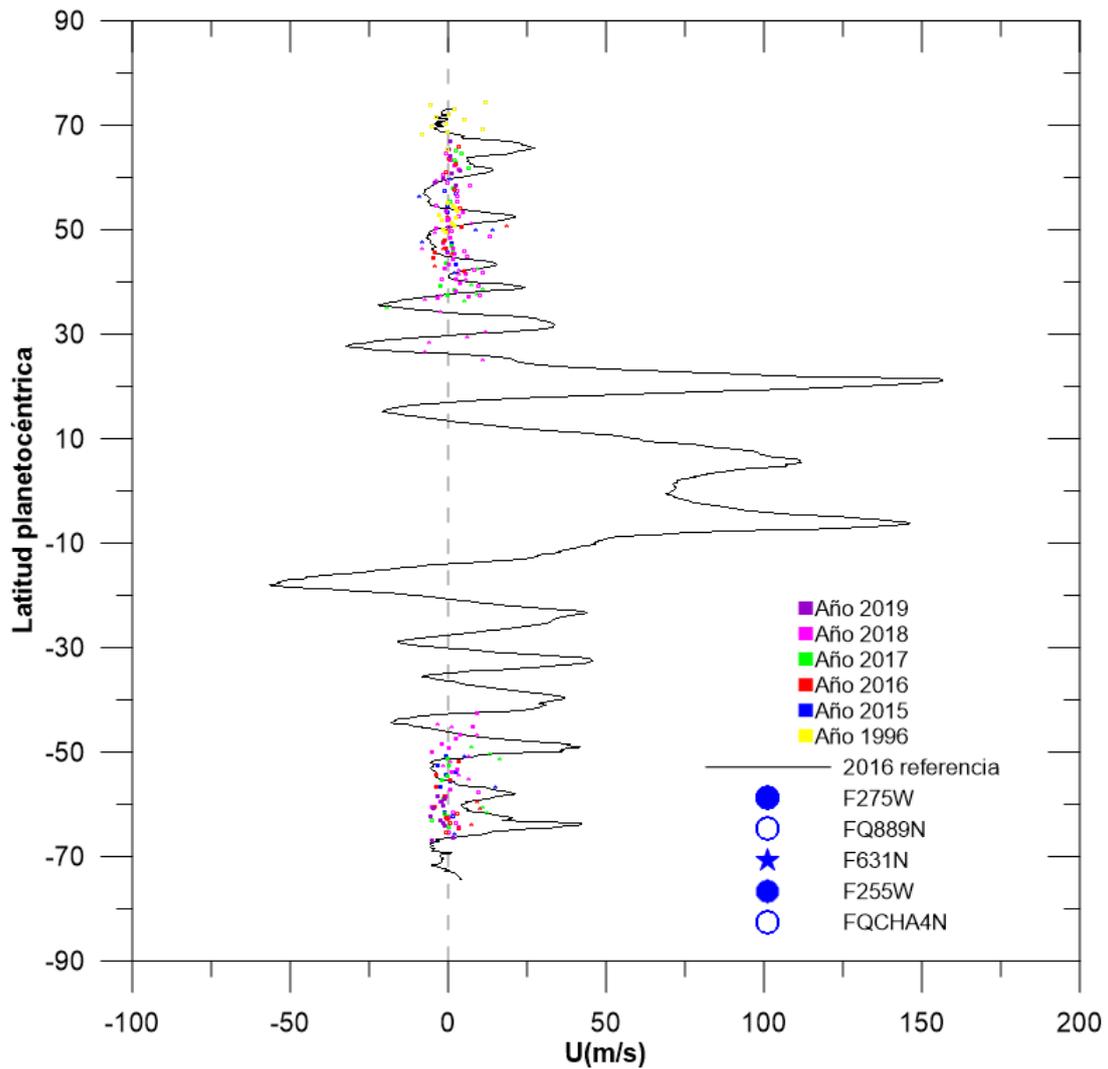


Figura 4.24: Representación de los detalles nubosos estudiados. Los puntos corresponden al filtro ultravioleta, los círculos al filtro del metano y las “estrellas” al filtro del infrarrojo cercano de cada año de estudio, diferenciándose cada año por colores.

Por otro lado, por el método de “cloud tracking” manual se han calculado los vientos y los hemos representado (ver Figura 4.24) junto al perfil de referencia del año 2016 (Hueso et al., 2017). En la Figura 4.24 se representan las velocidades de todos los detalles medidos en las zonas polares tanto en el ultravioleta y el metano, como en el infrarrojo cercano para los 6 años de estudio.

En las Figura 4.25, Figura 4.26, Figura 4.27, Figura 4.28, Figura 4.29, Figura 4.30 y Figura 4.31 se muestran, en detalle para cada año de estudio, los gráficos de la velocidad de la onda obtenidos por “cloud tracking” y la latitud media de las ondas visibles en los filtros del metano y ultravioleta, junto con el perfil de vientos calculados para cada año en el filtro infrarrojo, excepto para el año 1996 que se representan junto al perfil de referencia en el filtro infrarrojo de ese mismo año (García-Melendo and Sánchez-Lavega, 2000).

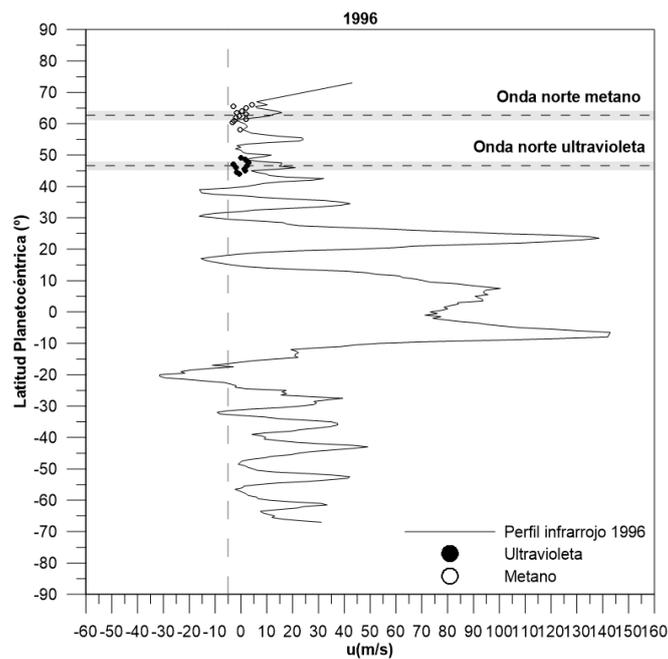


Figura 4.25: Posición latitudinal de las ondas circumpolares del año 1996 sobre el perfil de referencia para ese mismo año (García-Melendo and Sánchez-Lavega, 2000). Las líneas discontinuas indican la latitud media de las ondas, los rectángulos grises la amplitud de cada onda y los puntos la velocidad de la onda medida por “cloud tracking”.

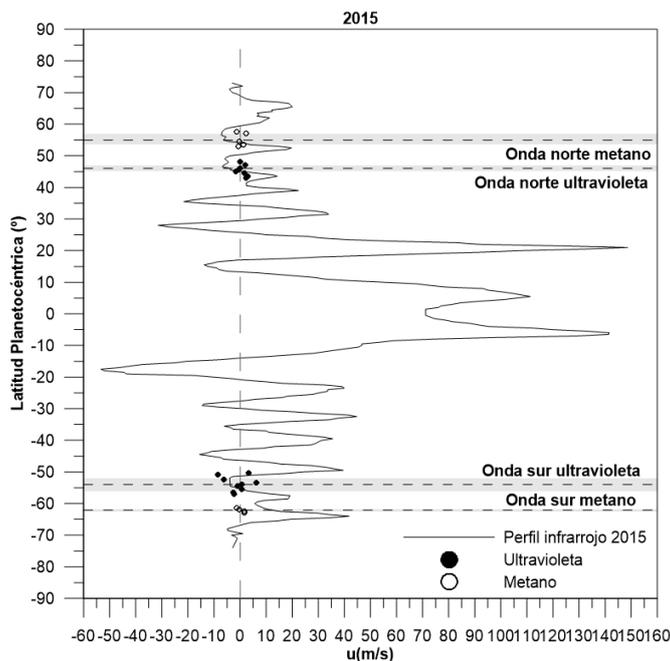


Figura 4.26: Posición latitudinal de las ondas circumpolares del año 2015 sobre el perfil que hemos obtenido para ese mismo año. Las líneas discontinuas indican la latitud media de las ondas, los rectángulos grises la amplitud de cada onda y los puntos la velocidad de la onda medida por “cloud tracking”.

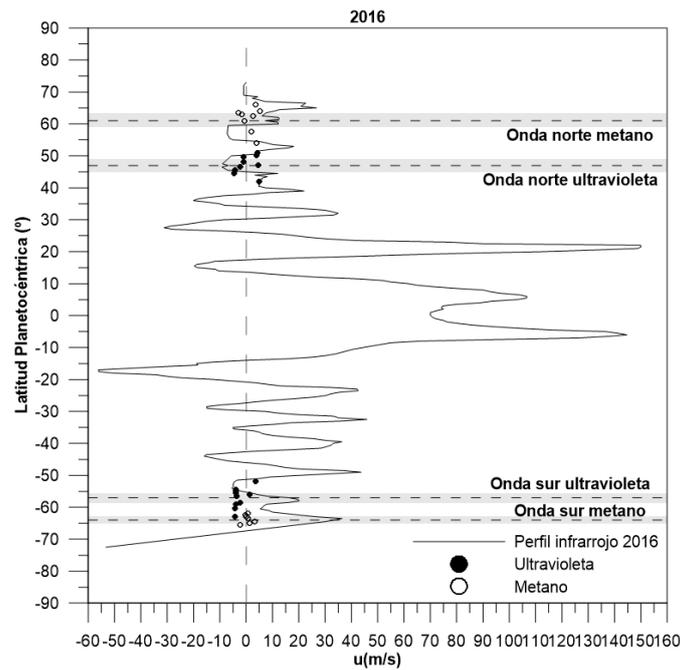


Figura 4.27: Posición latitudinal de las ondas circumpolares del año 2016 sobre el perfil que hemos obtenido para ese mismo año. Las líneas discontinuas indican la latitud media de las ondas, los rectángulos grises la amplitud de cada onda y los puntos la velocidad de la onda medida por “cloud tracking”.

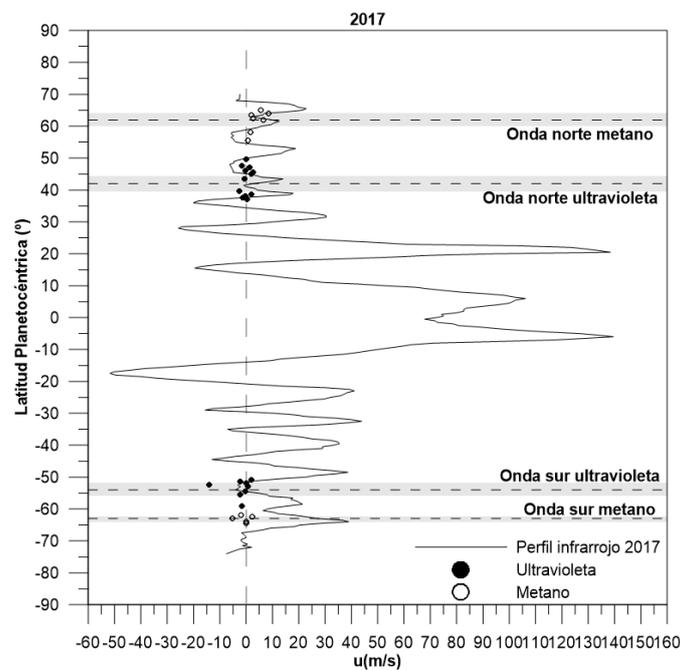


Figura 4.28: Posición latitudinal de las ondas circumpolares del año 2017 sobre el perfil que hemos obtenido para ese mismo año. Las líneas discontinuas indican la latitud media de las ondas, los rectángulos grises la amplitud de cada onda y los puntos la velocidad de la onda medida por “cloud tracking”.

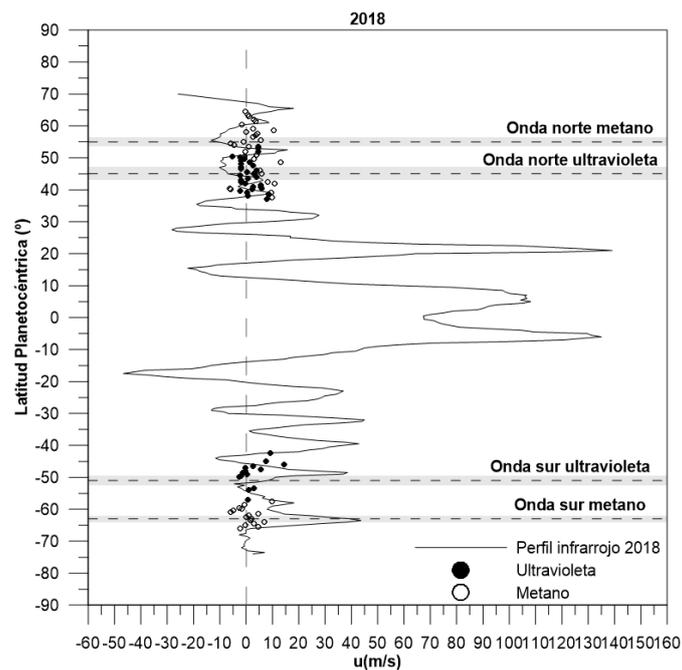


Figura 4.29: Posición latitudinal de las ondas circumpolares del año 2018 sobre el perfil que hemos obtenido para ese mismo año. Las líneas discontinuas indican la latitud media de las ondas, los rectángulos grises la amplitud de cada onda y los puntos la velocidad de la onda medida por “cloud tracking”.

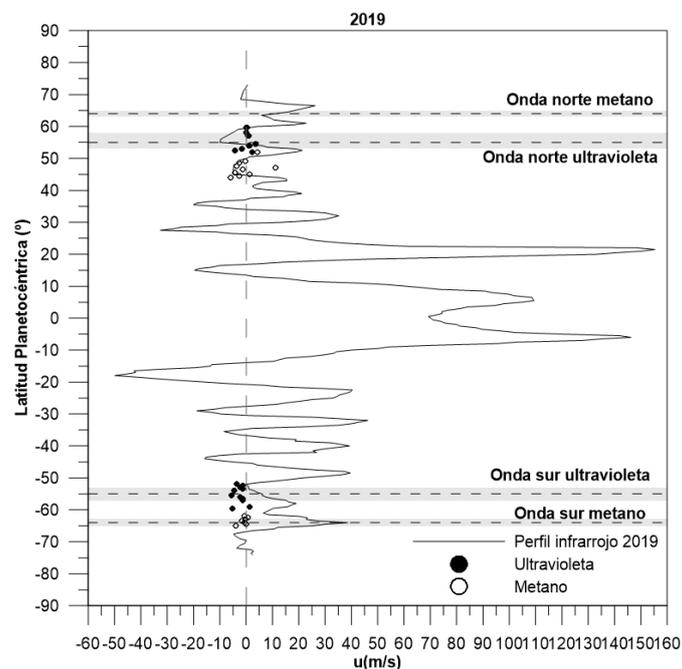


Figura 4.30: Posición latitudinal de las ondas circumpolares del año 2019 sobre el perfil que hemos obtenido para ese mismo año. Las líneas discontinuas indican la latitud media de las ondas, los rectángulos grises la amplitud de cada onda y los puntos la velocidad de la onda medida por “cloud tracking”.

### 4.3. Ondas circumpolares

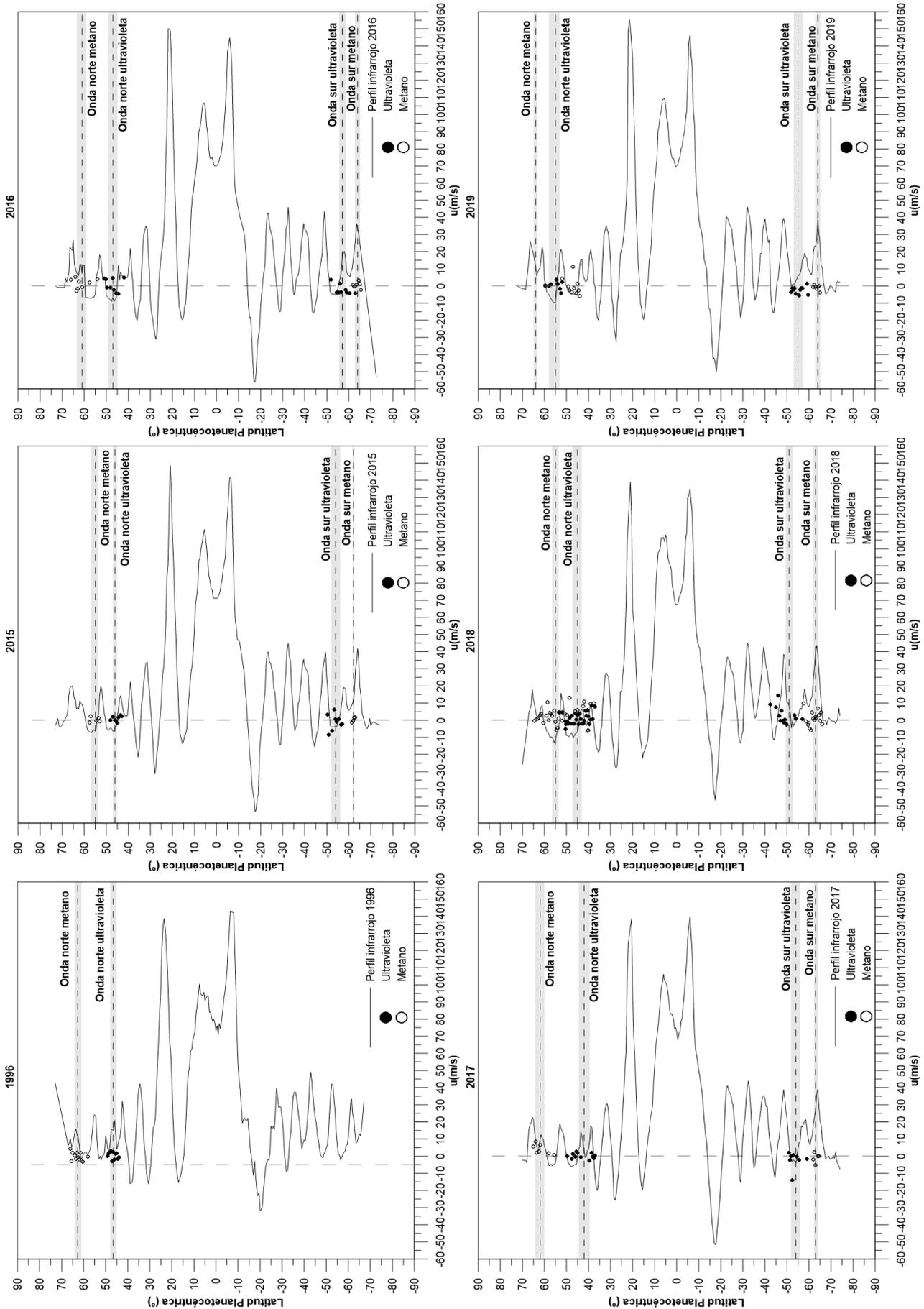


Figura 4.31: Comparación de las Figura 4.25, Figura 4.26, Figura 4.27, Figura 4.28, Figura 4.29, Figura 4.30, que muestran la evolución de las características en los años 1996, 2015, 2016, 2017, 2018 y 2019.

Como se observa en la [Figura 4.31](#) la onda norte y sur del ultravioleta y la onda sur del metano en todos los años de estudio se encuentran a la misma latitud aproximadamente. El cambio en la latitud más significativo se da en el filtro del metano de la onda norte en los años 2015 y 2018 donde la onda está a una latitud considerablemente menor.

### 4.3.1. Características de las ondas circumpolares

Las ondas vienen caracterizadas principalmente por: la velocidad de fase ( $c$ ), latitud media ( $\langle Pc \rangle$ ), amplitud ( $\langle A \rangle$ ) y número de onda ( $k$ ). La velocidad de fase ( $c$ ) ha sido calculada mediante “cloud tracking” haciendo un seguimiento de los mismos detalles en imágenes separadas 10 horas o múltiplos de éstas aproximadamente y el número de onda ha sido obtenido contando el número promedio de crestas o valles.

Las características de las ondas estudiadas en este trabajo se presentan en la [Tabla 4.1](#) y la [Tabla 4.2](#). Las características del metano aparecen en la [Tabla 4.1](#) y en la [Tabla 4.2](#) las del ultravioleta. En ellas se observa que la latitud planetocéntrica media norte en el metano se encuentra entre  $55^\circ$  y  $64^\circ$ , mientras que en el ultravioleta está entre  $42^\circ$  y  $55^\circ$ . En el sur del filtro del metano dicha latitud se encuentra entre  $-62.1^\circ$  y  $-64^\circ$  y en el ultravioleta entre  $-51^\circ$  y  $-57^\circ$ .

Tabla 4.1: Principales características de las ondas circumpolares en el filtro del metano desde el año 1996 al 2019.

	Mayo 1996	Enero 2015	Febrero 2016	Abril 2017	Abril 2018	Junio 2019
<b>Norte</b>						
$\langle Pc \rangle$ ( $^\circ$ )	$62 \pm 3$	$55 \pm 2$	$61 \pm 4$	$62 \pm 3$	$55 \pm 4$	$64 \pm 1$
$\langle A \rangle$ ( $^\circ$ )	$3 \pm 2$	$3 \pm 1$	$4 \pm 6$	$4 \pm 8$	$3 \pm 8$	$2 \pm 2$
$c$ (m/s)	$1 \pm 3$	$0.1 \pm 2$	$2 \pm 3$	$4 \pm 4$	$2 \pm 7$	$1 \pm 4$
$\langle u \rangle$ (m/s)	$7 \pm 7$	$-6 \pm 7$	$7 \pm 7$	$10 \pm 7$	$-11 \pm 7$	$10 \pm 7$
$c - \langle u \rangle$ (m/s)	$-6 \pm 7$	$6 \pm 7$	$-5 \pm 7$	$-6 \pm 7$	$13 \pm 7$	$-9 \pm 7$
$N^\circ$ onda ( $k$ )	7	7-8	6	9-10	8-9	9
<b>Sur</b>						
$\langle Pc \rangle$ ( $^\circ$ )	-	$-62.1 \pm 0.4$	$-64 \pm 1$	$-63 \pm 1$	$-63 \pm 2$	$-64 \pm 1$
$\langle A \rangle$ ( $^\circ$ )	-	$0.7 \pm 0.6$	$2.4 \pm 0.7$	$1.9 \pm 0.8$	$2 \pm 2$	$2 \pm 1$
$c$ (m/s)	-	$0.6 \pm 2.1$	$0.3 \pm 2.8$	$-0.6 \pm 4$	$1 \pm 6$	$-1 \pm 4$
$\langle u \rangle$ (m/s)	-	$12 \pm 7$	$33 \pm 7$	$27 \pm 7$	$40 \pm 10$	$39 \pm 10$
$c - \langle u \rangle$ (m/s)	-	$-11 \pm 7$	$-33 \pm 7$	$-27 \pm 7$	$-39 \pm 10$	$-40 \pm 10$
$N^\circ$ onda ( $k$ )	-	8	10	12-13	11	12-13

### 4.3. Ondas circumpolares

Tabla 4.2: Principales características de las ondas circumpolares en el filtro del ultravioleta desde el año 1996 al 2019.

	Mayo 1996	Enero 2015	Febrero 2016	Abril 2017	Abril 2018	Junio 2019
<b>Norte</b>						
$\langle Pc \rangle$ (°)	46 ± 2	46 ± 2	47 ± 2	42 ± 4	45 ± 4	55 ± 3
$\langle A \rangle$ (°)	3 ± 1	2 ± 1	4 ± 2	5 ± 5	4 ± 7	5 ± 1
$c$ (m/s)	1 ± 5	0.6 ± 5	0 ± 4	0.1 ± 1.6	0.9 ± 8	0 ± 4
$\langle u \rangle$ (m/s)	21 ± 7	-4 ± 7	-5 ± 7	3 ± 7	-7 ± 7	-5 ± 7
$c - \langle u \rangle$ (m/s)	-20 ± 6	5 ± 7	5 ± 7	-3 ± 7	8 ± 8	5 ± 7
$N^\circ$ onda ( $k$ )	12	14	7	9	8	10-11
<b>Sur</b>						
$\langle Pc \rangle$ (°)	-	-54 ± 2	-57 ± 3	-54 ± 2	-51 ± 4	-55 ± 2
$\langle A \rangle$ (°)	-	4 ± 2	3 ± 2	4 ± 2	3 ± 2	3 ± 1
$c$ (m/s)	-	-1 ± 5	-0.7 ± 2.5	-0.4 ± 1.8	1 ± 8	-1 ± 4
$\langle u \rangle$ (m/s)	-	-4 ± 7	12 ± 7	-4 ± 7	8 ± 10	6 ± 7
$c - \langle u \rangle$ (m/s)	-	3 ± 7	-13 ± 7	4 ± 7	-7 ± 10	-7 ± 7
$N^\circ$ onda ( $k$ )	-	10	10-11	12-13	13	14

Además en la [Tabla 4.3](#) aparecen recogidas las características principales de las ondas circumpolares en el filtro del metano desde el año 1993 al 2019. Los datos estudiados desde el año 1993 al 2000 corresponden a N. Barrado-Izagirre ([Barrado-Izagirre et al., 2008](#)) y los de 2014 a I. Ochoa-Maruri ([Ochoa-Maruri, 2015](#)). En dicha tabla observamos que la latitud de la onda sur es muy estable en todos los años, sin embargo, en el norte la latitud a la que se encuentra la onda circumpolar tiene algunas variaciones significativas, como por ejemplo el año 2015, 2018 y 2019. La amplitud de las ondas circumpolares también sufre mayor variación en el norte (1,7 a 4,1) que en el sur (0,7 a 2,5). Por otro lado, la velocidad de fase ( $c$ ) es más estacionaria en 1996 y desde 2015 hasta 2019 en el caso norte y en los años 1994, 1997, 2015, 2016, 2017, 2018 y 2019 en el caso sur. Por último, analizando la velocidad zonal relativa al viento promedio ( $c - \langle u \rangle$ ) observamos que en el sur es muy estable en 1994, 1997 y 2015, por el contrario cambia significativamente en los demás años de mostrados en la [Tabla 4.1](#), donde la magnitud de dicho parámetro se encuentra comprendida entre -27 m/s y -40 m/s. En el caso del norte, esta característica de la onda circumpolar no cambia de manera relevante excepto en los años 2015 y 2018 donde cambia de signo como consecuencia del cambio de la latitud a la que se encuentra la onda.

Del mismo modo, en la [Tabla 4.4](#) se muestra el histórico de las características principales de las ondas circumpolares del filtro del ultravioleta. Los datos del año 2000 corresponden a N. Barrado-Izagirre ([Barrado-Izagirre et al., 2008](#)), los de 2012 y 2014 a I. Ochoa-Maruri ([Ochoa-Maruri, 2015](#)). En dicha tabla se observa que la latitud planetocéntrica del norte en los años 1996, 2012, 2015, 2016, 2017 y 2018 no varía significativamente, sin embargo si hay cambio significativo en los años 2000, 2014 y 2019. En el caso del sur en 2000, 2012, 2014 y 2016 la latitud es prácticamente la misma y cambia en 2015, 2017, 2018 y 2019. Por otro lado, la velocidad de fase es bastante estacionaria, tanto en el norte como en el

## Capítulo 4. Resultados

---

sur, excepto en el norte del 2014 y en el sur del año 2012. Analizando la velocidad zonal relativa al viento promedio ( $c - \langle u \rangle$ ) observamos que en el norte es muy similar en el año 2000, 2014, 2015, 2016, 2018 y 2019, pero sin embargo cambia de signo en 2017 y de magnitud en 1996 y 2012, donde su valor es de 20m/s y 22m/s respectivamente. En cuanto al sur, en el caso del ultravioleta, varía bastante de unos años a otros excepto en el año 2018 y 2019 donde tienen el mismo valor.

Tabla 4.3: Evolución temporal de las características principales de las ondas circumpolares desde el año 1993 al 2019 del filtro del metano.

	Junio 1993	Julio 1994	Octubre 1995	Mayo 1996	Septiembre 1997	Octubre 1999	Diciembre 2000	Abril 2014	Enero 2015	Febrero 2016	Abril 2017	Abril 2018	Junio 2019
<b>Norte</b>													
$\langle Pc \rangle$ ( $^{\circ}$ )	-	$63.2 \pm 0.2$	$63.8 \pm 0.2$	$62 \pm 3$	$63.4 \pm 0.2$	$63.8 \pm 0.2$	$63.7 \pm 0.1$	$61 \pm 2$	$55 \pm 2$	$61 \pm 4$	$62 \pm 3$	$55 \pm 4$	$64 \pm 1$
$\langle A \rangle$ ( $^{\circ}$ )	-	1.8	1.8	$3 \pm 2$	1.2	1.9	1.7	$4.1 \pm 0.7$	$3 \pm 1$	$4 \pm 6$	$4 \pm 8$	$3 \pm 8$	$2 \pm 2$
$c$ (m/s)	-	$7 \pm 4$	-	$1 \pm 3$	$11 \pm 8$	-	$-0.5 \pm 5$	-	$0.1 \pm 2$	$2 \pm 3$	$4 \pm 4$	$2 \pm 7$	$1 \pm 4$
$\langle u \rangle$ (m/s)	-	-	-	$7 \pm 7$	$15 \pm 5$	-	$8 \pm 6$	-	$-6 \pm 7$	$7 \pm 7$	$10 \pm 7$	$-11 \pm 7$	$10 \pm 7$
$c - \langle u \rangle$ (m/s)	-	-	-	$-6 \pm 7$	$-5 \pm 8$	-	$-8 \pm 6$	-	$6 \pm 7$	$-5 \pm 7$	$-6 \pm 13$	$13 \pm 7$	$-9 \pm 7$
$N^{\circ}$ onda ( $k$ )	-	8	8	7	12	8-10	5	6	7-8	6	9-10	8-9	9
<b>Sur</b>													
$\langle Pc \rangle$ ( $^{\circ}$ )	$-64.3 \pm 0.2$	$-64.1 \pm 0.2$	$-64.1 \pm 0.2$	-	$-64.2 \pm 0.2$	$-63.4 \pm 0.4$	$-64.4 \pm 0.1$	$-62 \pm 3$	$-62.1 \pm 0.4$	$-64 \pm 1$	$-63 \pm 1$	$-63 \pm 2$	$-64 \pm 1$
$\langle A \rangle$ ( $^{\circ}$ )	1.2	1.1	1.0	-	1.0	1.2	0.8	$2.5 \pm 0.4$	$0.7 \pm 0.6$	$2.4 \pm 0.7$	$1.9 \pm 0.8$	$2 \pm 2$	$2 \pm 1$
$c$ (m/s)	-	$2 \pm 1$	$10 \pm 4$	-	$0 \pm 4$	-	$5 \pm 2$	-	$0.6 \pm 2.1$	$0.3 \pm 2.8$	$-0.6 \pm 4$	$1 \pm 6$	$-1 \pm 4$
$\langle u \rangle$ (m/s)	-	$16 \pm 5$	$37 \pm 5$	-	$16 \pm 5$	-	$37 \pm 3$	-	$12 \pm 7$	$33 \pm 7$	$27 \pm 7$	$40 \pm 10$	$39 \pm 10$
$c - \langle u \rangle$ (m/s)	-	$-14 \pm 5$	$-27 \pm 5$	-	$-16 \pm 4$	-	$-32 \pm 3$	-	$-11 \pm 7$	$-33 \pm 7$	$-27 \pm 7$	$-39 \pm 10$	$-40 \pm 10$
$N^{\circ}$ onda ( $k$ )	12	12	12	-	13	14	14	10	8	10	12-13	11	12-13

Tabla 4.4: Evolución temporal de las características principales de las ondas circumpolares desde el año 1996 al 2019 del ultravioleta.

	Mayo 1996	Diciembre 2000	Septiembre 2012	Abril 2014	Enero 2015	Febrero 2016	Abril 2017	Abril 2018	Junio 2019
<b>Norte</b>									
$\langle Pc \rangle$ (°)	46 ± 2	50 ± 2	46 ± 3	38.5 ± 0.5	46 ± 2	47 ± 2	42 ± 4	45 ± 4	55 ± 3
$\langle A \rangle$ (°)	3 ± 1	-	6 ± 1	1.3 ± 0.3	2 ± 1	4 ± 2	5 ± 5	4 ± 7	5 ± 1
$c$ (m/s)	1 ± 5	-0.5 ± 0.8	-3 ± 9	16 ± 9	0.6 ± 5	0 ± 4	0.1 ± 1.6	0.9 ± 8	0 ± 4
$\langle u \rangle$ (m/s)	21 ± 7	-9 ± 4	-6 ± 6	-4 ± 7	-4 ± 7	-5 ± 7	3 ± 7	-7 ± 7	-5 ± 7
$c - \langle u \rangle$ (m/s)	20 ± 6	6 ± 9	22 ± 9	5 ± 7	5 ± 7	5 ± 7	-3 ± 7	8 ± 8	5 ± 7
$N^o$ onda ( $k$ )	12	-	14	-	14	7	9	8	10-11
<b>Sur</b>									
$\langle Pc \rangle$ (°)	-	-57 ± 2	-57 ± 2	-57.9 ± 0.8	-54 ± 2	-57 ± 3	-54 ± 2	-51 ± 4	-55 ± 2
$\langle A \rangle$ (°)	-	-	3.1 ± 0.9	2.1 ± 0.3	4 ± 2	3 ± 2	4 ± 2	3 ± 2	3 ± 1
$c$ (m/s)	-	1.7 ± 1	8 ± 7	-	-1 ± 5	-0.7 ± 2.5	-0.4 ± 1.8	1 ± 8	-1 ± 4
$\langle u \rangle$ (m/s)	-	15 ± 5	11 ± 10	-	-4 ± 7	12 ± 7	-4 ± 7	8 ± 10	6 ± 7
$c - \langle u \rangle$ (m/s)	-	-13 ± 4	-3 ± 10	-	3 ± 7	-13 ± 7	4 ± 7	-7 ± 10	-7 ± 7
$N^o$ onda ( $k$ )	-	18-20	14	-	10	10-11	12-13	13	14

# Capítulo 5

## Estudio de la Onda de Rossby

Carl-Gustaf Arvid Rossby (1898-1957), meteorólogo sueco-estadounidense, mientras realizaba sus estudios sobre la circulación general de la atmósfera identificó unas ondas sinusoidales en el *jet stream* polar, conocidas actualmente como *ondas de Rossby*. Dichas ondas son una familia de ondas cuya frecuencia es baja y su longitud de onda larga (recorriendo todo el planeta), conocidas también como *ondas planetarias*, que se dan en sistemas rotativos. El desarrollo de este capítulo está basado en [Barrado-Izagirre et al. \(2008\)](#) y [Sánchez-Lavega \(2010\)](#).

### 5.1. Introducción

En una atmósfera barotrópica con flujo únicamente horizontal y densidad constante, la onda de Rossby conserva la vorticidad absoluta,  $\eta$ , y existe debido al cambio del parámetro de Coriolis o *efecto*  $\beta$  con la latitud. Es decir, la fuerza de Coriolis es la fuerza restauradora de las ondas de Rossby. La vorticidad absoluta viene definida por la expresión:

$$\eta = \zeta + f \quad (5.1)$$

donde  $\zeta$  ( $\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$ ) es la vorticidad relativa y  $f = 2\Omega \sin \varphi$  es el parámetro de Coriolis.

Comenzamos considerando una cadena de parcelas de aire cerradas que se encuentra a una latitud determinada y escogemos una de esas parcelas en la que la vorticidad relativa ( $\zeta$ ) es nula en el instante inicial  $t_0$ , lo cual implica por la [Ecuación 5.1](#) que  $\eta_0 = f_0$ . Si la parcela se desplaza meridionalmente una distancia  $\delta y$  en el instante posterior  $t_1$ , la vorticidad en ese instante será  $\eta_1 = \zeta_1 + f_1$ . Puesto que se conserva la vorticidad absoluta  $\eta$ :

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = 0 \rightarrow \frac{\partial (\zeta + f)}{\partial t} = 0 \quad (5.2)$$

Considerando todo lo anterior, obtenemos que

$$\eta_0 = \eta_1 \rightarrow f_0 = \zeta_1 + f_1 \rightarrow \zeta_1 = f_0 - f_1 \quad (5.3)$$

Teniendo en cuenta la *aproximación del plano*  $\beta^1$ , obtenemos que  $f_1 = f_0 + \beta \delta y$  donde  $\beta = \frac{df}{dy} = \frac{2\Omega \cos \varphi}{R_p(\varphi)}$  es el gradiente de vorticidad planetaria. Por lo tanto:

$$\zeta_1 = f_0 - f_1 = f_0 - f_0 - \beta \delta y \rightarrow \zeta_1 = -\beta \delta y \quad (5.4)$$

---

<sup>1</sup>Aproximación del plano  $\beta$ : Si la variación del parámetro de Coriolis con la latitud es pequeña, aunque

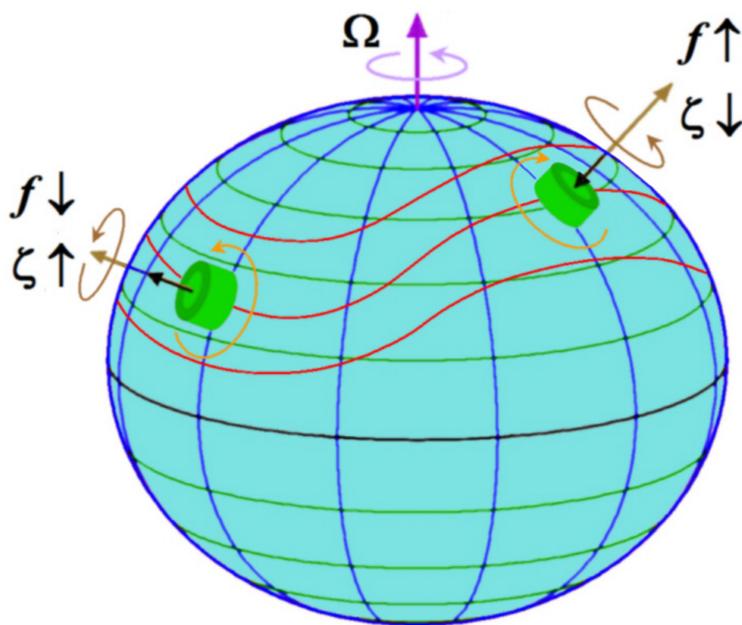


Figura 5.1: Vorticidad de las parcelas de aire cuando sufren un desplazamiento (hacia el norte o sur) al ser sometidas a un movimiento sinusoidal. Fuente: (Barrado-Izagirre et al., 2008).

De la Ecuación 5.4 deducimos que si las parcelas de aire se encuentran en el hemisferio norte y sufren un desplazamiento meridional sometido a un movimiento sinusoidal oscilatorio hacia el sur entonces la vorticidad será positiva (ciclónica), mientras que si el desplazamiento es hacia el norte la vorticidad será negativa (anticiclónica) como se observa en la Figura 5.1. Si las parcelas de aire se encuentran en el hemisferio sur ocurre lo mismo que se ha comentado anteriormente pero sin embargo las vorticidades serán al inverso.

La vorticidad origina un campo de velocidad meridional que ocasiona que la cadena de parcelas de aire sea transferida hacia el suroeste del máximo de vorticidad y al noroeste del mínimo de vorticidad, provocando la oscilación en torno a la latitud de equilibrio. Esto se muestra en la Figura 5.2 donde la línea continua es la perturbación original, la línea discontinua el movimiento ondulatorio de la nueva posición y las flechas punteadas la velocidad producida por un desplazamiento meridional. El desplazamiento hacia el Oeste del campo de vorticidad establece lo que denominamos como *onda de Rossby*.

Si definimos (teniendo en cuenta que el desplazamiento meridional se encuentra restringido a un movimiento sinusoidal oscilatorio)  $\delta y = A \sin[k(x - ct)]$ , donde  $c$  es la velocidad de propagación de la onda y  $A$  es la amplitud, se puede calcular la velocidad de fase de la

---

se trate de movimientos meridionales inmensos, se puede hacer una aproximación desarrollando  $f(\varphi)$  en series de Taylor sobre la latitud de referencia  $\varphi_0$ :  $f(\varphi) = 2\Omega \sin \varphi = 2\Omega[\sin \varphi_0 + (\varphi - \varphi_0) \cos \varphi_0 + \dots]$ . En el plano tangente:  $\varphi - \varphi_0 \approx \frac{y}{R_p(\varphi)}$ .

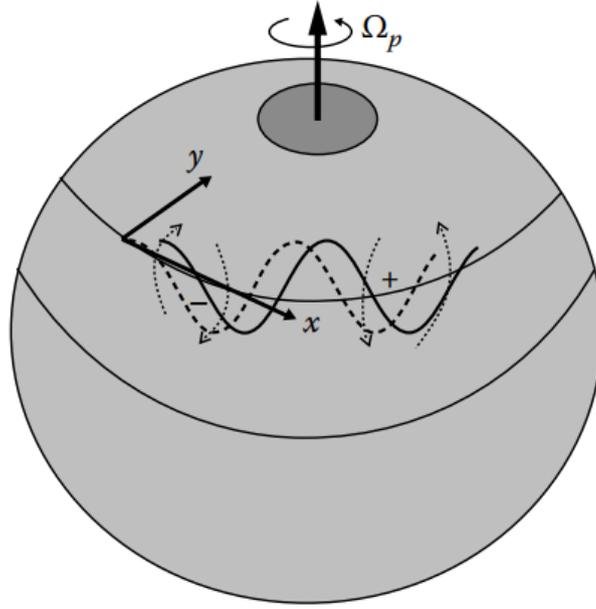


Figura 5.2: Campo de velocidad meridional y de vorticidad de la perturbación, cuando las parcelas de aire son desplazadas meridionalmente. La línea continua es la perturbación inicial, la línea discontinua el desplazamiento hacia el Oeste de la nueva perturbación y las flechas punteadas la velocidad debida al desplazamiento meridional. Fuente: [Sánchez-Lavega \(2010\)](#).

onda. Por lo tanto, la velocidad meridional viene dada por:

$$v = \frac{d(\delta y)}{dt} = -Akc \cos[k(x - ct)] \quad (5.5)$$

Teníamos que  $\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$ , pero como sólo hay desplazamiento meridional entonces:

$$\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} = Ak^2c \sin[k(x - ct)] \quad (5.6)$$

Sustituyendo la [Ecuación 5.6](#) y  $\delta y$  en la [Ecuación 5.4](#):

$$\begin{aligned} Ak^2c \sin[k(x - ct)] &= -\beta A \sin[k(x - ct)] \\ \downarrow \\ c &= -\frac{\beta}{k^2} \end{aligned} \quad (5.7)$$

En la [Ecuación 5.7](#) observamos que el sentido de la velocidad de fase de la onda es hacia el Oeste relativa al flujo medio y es inversamente proporcional al cuadrado del número de onda ( $k$ ).

## 5.2. Ondas de Rossby Barotrópicas

En las *ondas de Rossby* es posible encontrar la relación de dispersión buscando soluciones ondulatorias de la ecuación de vorticidad barotrópica:

$$\frac{D(\zeta + f)}{Dt} = 0 \quad \text{donde} \quad \frac{D}{Dt} \equiv \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} \quad (5.8)$$

Teniendo en cuenta que en el movimiento horizontal la componente vertical se conserva y la *aproximación del plano*  $\beta$ , la **Ecuación 5.8** se transforma en:

$$\left( \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} \right) \zeta + \beta v = 0 \quad (5.9)$$

Si se supone que el movimiento horizontal consiste en una velocidad constante más una pequeña perturbación  $u'$ , haciendo uso de la teoría de perturbaciones:

$$u = \bar{u} + u' \quad (5.10)$$

$$v = v' \quad (5.11)$$

$$\zeta = \frac{\partial v'}{\partial x} - \frac{\partial u'}{\partial y} = \zeta' \quad (5.12)$$

Introducimos una función de corriente horizontal perturbada,  $\psi$ , de manera que:

$$u' = -\frac{\partial \psi'}{\partial y} \quad (5.13)$$

$$v' = \frac{\partial \psi'}{\partial x} \quad (5.14)$$

Con la **Ecuación 5.13** y la **Ecuación 5.14** se obtiene que:

$$\zeta' = \nabla^2 \psi' \quad (5.15)$$

Por lo tanto, la **Ecuación 5.9** perturbada es:

$$\left( \frac{\partial}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial}{\partial x} \right) \nabla^2 \psi' + \beta \frac{\partial \psi'}{\partial x} = 0 \quad (5.16)$$

En la **Ecuación 5.16** se han despreciado los productos entre los términos de la perturbación.

Como solución probaremos  $\psi' = \text{Re} [\psi_0 e^{i(kx + \ell y - \nu t)}]$  donde  $k$  y  $\ell$  son el número de onda zonal y meridional respectivamente. Sustituyendo en la **Ecuación 5.16** obtenemos:

$$(-\nu + k\bar{u}) (-k^2 - \ell^2) + k\beta = 0 \rightarrow \nu = k \left( \bar{u} - \frac{\beta}{k^2 + \ell^2} \right) \quad (5.17)$$

Teniendo en cuenta que  $c = \nu/k$ , deducimos que la velocidad de fase zonal relativa al viento promedio es:

$$c - \bar{u} = -\frac{\beta}{k^2 + \ell^2} \quad (5.18)$$

### 5.3. Onda de Rossby tridimensional

En la [Ecuación 5.18](#) vemos que la velocidad de propagación de la onda de Rossby relativa a la velocidad media del flujo ( $c - \langle u \rangle$ ) siempre es hacia el Oeste e inversamente proporcional al cuadrado del número de onda. Es decir, la velocidad de fase de la *onda de Rossby* aumenta significativamente cuando decrece el número de onda, o lo que es lo mismo, cuando crece la longitud de onda ( $c = \nu\lambda$ ).

Cuando la longitud de onda sea muy larga, la velocidad de fase hacia el Oeste será lo suficientemente grande como para compensar el desplazamiento del viento medio zonal hacia el Este provocando que la perturbación sea cuasi-estacionaria o estacionaria respecto a la rotación del planeta. En la [Ecuación 5.18](#) se observa que la solución de la onda de Rossby se hace estacionaria cuando:

$$k^2 + \ell^2 = \frac{\beta}{\bar{u}} \quad (5.19)$$

Por último, el máximo de la frecuencia de una onda de Rossby es  $2\Omega$ .

### 5.3. Onda de Rossby tridimensional

A continuación consideramos una atmósfera tridimensional para estudiar la estructura vertical de la onda de Rossby. El desplazamiento del aire, dentro de la cuasi-geostrofia, obedece la conservación de la vorticidad potencial cuasi-geostrofica, puesto que las ondas de Rossby tienen escalas horizontales largas y frecuencias bajas ([Sánchez-Lavega \(2010\)](#)). La ecuación de la vorticidad barotrópica dada por [Salby \(1996\)](#) es:

$$\frac{D}{Dt} \left[ \nabla^2 \Psi + f_0 + \beta y + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{f_0^2}{N^2} \rho \frac{\partial \Psi}{\partial z} \right) \right] = 0 \quad (5.20)$$

Si suponemos un estado con temperatura constante (isotermo) en movimiento uniforme se puede conseguir, para el movimiento ondulatorio en un plano  $\beta$ , la ecuación de la perturbación de la vorticidad potencial:

$$\frac{D}{Dt} \left[ \nabla^2 \Psi' + \frac{f_0^2}{N^2} \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} \left( \rho \frac{\partial \Psi'}{\partial z} \right) \right] + \frac{D(f_0 + \beta y)}{Dt} = 0 \quad (5.21)$$

puesto que  $f_0$  es un parámetro constante,

$$\frac{D}{Dt} \left[ \nabla^2 \Psi' + \frac{f_0^2}{N^2} \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} \left( \rho \frac{\partial \Psi'}{\partial z} \right) \right] + \beta \frac{\partial \Psi'}{\partial x} = 0. \quad (5.22)$$

En la [Ecuación 5.22](#) los coeficientes son constantes, así que proponemos soluciones del tipo:

$$\Psi' = A e^{[z/2H + i(kx + \ell y + mz - \nu t)]} \quad (5.23)$$

donde  $k$ ,  $\ell$  y  $m$  son los números de onda zonal, meridional y vertical respectivamente y  $H$  la escala de alturas. Sustituyendo la [Ecuación 5.23](#) en la [Ecuación 5.22](#) obtenemos:

$$(-\nu + \bar{u}k) \left[ -k^2 - \ell^2 - \left( m^2 + \frac{1}{4H^2} \right) \right] + (-\nu + \bar{u}k) \left( \frac{f_0^2}{N^2} \right) \left( m^2 + \frac{1}{4H^2} \right) + \beta k = 0 \quad (5.24)$$

Despejando la relación de dispersión de las *ondas de Rossby cuasi-geostróficas tridimensionales*:

$$c - \bar{u} = -\frac{\beta}{k^2 + \ell^2 + \left(\frac{f_0^2}{N^2}\right) \left(m^2 + \frac{1}{4H^2}\right)} \quad (5.25)$$

Considerando el denominador de la [Ecuación 5.25](#) como el número de onda efectivo total al cuadrado, dicha ecuación tiene una forma similar a la ecuación obtenida para las ondas de Rossby barotrópicas ([Ecuación 5.18](#)).

### 5.3.1. Estudio de la propagación en un fluido con cizalla

En las atmósferas la velocidad del fluido no es constante y generalmente existe cizalla en los vientos. En el caso de Júpiter el perfil de vientos zonal presenta regiones con gran cizalla meridional, como se puede observar en los perfiles mostrados en la [Sección 4.2](#). En estos casos el parámetro  $\beta$  no es constante, como hemos supuesto anteriormente, y lo sustituiremos por el parámetro *beta efectiva* ( $\beta_e$ ), que es el gradiente meridional de la vorticidad zonal media y viene definido por:

$$\beta_e = \beta + \beta_y + \beta_z = \frac{df}{dy} - \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} - \frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial}{\partial z} \left( \bar{\rho} \frac{f^2}{N^2} \frac{\partial u}{\partial z} \right). \quad (5.26)$$

La relación de dispersión en este caso la obtenemos sustituyendo el parámetro  $\beta$  por  $\beta_e$  en la [Ecuación 5.25](#):

$$c - \bar{u} = -\frac{\beta_e}{k^2 + \ell^2 + \left(\frac{f_0^2}{N^2}\right) \left(m^2 + \frac{1}{4H^2}\right)} \quad (5.27)$$

Reordenando la [Ecuación 5.27](#) y despejando el cuadrado del número de onda meridional obtenemos la ecuación empleada para la interpretación de las ondas de Rossby presentes en los polos de Júpiter:

$$\ell^2 = \frac{\beta_e}{\bar{u} - c} - k^2 - \frac{f^2}{N^2} \left( m^2 + \frac{1}{4H^2} \right) \quad (5.28)$$

Además con esta ecuación es posible estudiar las limitaciones de la propagación de las ondas en el plano  $yz$ .

### 5.3.2. Nivel crítico

El confinamiento vertical y horizontal de una onda, con una relación de dispersión como la obtenida para las ondas de Rossby, viene delimitado por un *nivel crítico* donde  $\bar{u} = c$ .

Dicho nivel crítico se puede encontrar en cualquier dirección. En el caso de la propagación vertical de la onda, en  $z$ , tenemos que

$$m^2 = \left( \frac{N^2}{f_0^2} \right) \left( \frac{\beta_e}{\bar{u} - c} - k^2 \right) - \frac{1}{4H^2} \quad (5.29)$$

Cuando  $\bar{u} = c$  obtenemos con la [Ecuación 5.29](#) que  $m^2 \rightarrow \infty$ , es decir, que la longitud de onda vertical en ese sitio es nula. Del mismo modo, en la dirección meridional tendremos  $\ell^2 \rightarrow \infty$ ,  $L_y = 0$ . Por lo tanto, el nivel crítico de la onda de Rossby se encuentra cuando  $\bar{u} - c = 0$  y la actividad ondulatoria es absorbida.

## 5.4. Interpretación de las ondas circumpolares

Muchos fenómenos ondulatorios de la atmósfera de Júpiter se interpretaron como ondas de Rossby, en la zona ecuatorial en trabajos como Allison (1990); Ortiz et al. (1998); Arregi et al. (2006) y en otras latitudes en Li et al. (2006). Sánchez-Lavega et al. (1998) propusieron que la onda polar sur que se observa en el filtro del metano debía ser una onda de Rossby. En este trabajo el objetivo es desarrollar dicha interpretación de la onda sur en el filtro del metano, ya que se trata de la más estable y ha sido previamente estudiada (Barrado-Izaguirre et al. (2008), Sánchez-Lavega et al. (1998)), en los años de estudio 2016, 2017, 2018 y 2019.

Comenzamos comprobando que no se trate de una onda de gravedad. Para ello hacemos uso de la relación de dispersión con desplazamiento Doppler para ondas de *inertio-gravedad* (Holton, 2004):

$$(v - k\bar{u})^2 = f_o^2 + N^2 \frac{(k^2 + \ell^2)}{m^2} \quad (5.30)$$

En nuestro caso, la frecuencia está comprendida entre  $1,4 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1} \leq v \leq 2,8 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ ,  $f_o$  es el parámetro de Coriolis<sup>2</sup> que tiene un valor de  $3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  aproximadamente y el término  $k\bar{u}$  toma valores entre  $1,1 \times 10^{-5} \leq k\bar{u} \leq 8,8 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ , donde  $\bar{u}$  se ha utilizado como la velocidad del viento medida en las nubes, puesto que de acuerdo con las medidas del viento térmico del instrumento CIRS a bordo de Cassini (Simon-Miller et al., 2006), los vientos son más o menos constantes en el rango de alturas de la onda. Si analizamos la Ecuación 5.30 con lo rangos anteriormente expuestos, nos damos cuenta que dicha ecuación no se cumple porque  $(v - k\bar{u})^2 \ll f_o^2$  y el otro término implicado en la ecuación siempre es positivo.

En la Tabla 4.1 observamos que la onda circumpolar sur de todos los años de estudio de este trabajo se mueve hacia el Oeste relativa al flujo zonal. Este motivo nos hace pensar que podría tratarse de una onda de Rossby, por lo que a continuación haremos una interpretación de la onda como si se tratara de una onda tridimensional (3D) de Rossby bajo una aproximación cuasi-geostrófica cuya relación de dispersión viene dada por la Ecuación 5.28 donde  $k$ ,  $\ell$ ,  $m$  y  $c$  son las principales propiedades de la onda mientras que  $u$ ,  $\beta_e$ ,  $N$ ,  $f$ , y  $H$  son las propiedades del entorno que se definirán a continuación. Los valores de  $k$ ,  $c$  y  $u$  son los que se muestran en la Tabla 4.1,  $f$  es el parámetro de Coriolis definido anteriormente,  $H$  es la escala de altura,  $N = N(z, \varphi)$  es la frecuencia de Brunt-Väisälä en función de la altura  $z$  y de la latitud  $\varphi$ , y  $\beta_e$  es el parámetro “beta efectiva” definida en la Ecuación 5.26.

El término  $\beta$  de la Ecuación 5.26 es el gradiente de vorticidad planetaria, el segundo,  $\beta_y$ , es el gradiente de vorticidad obtenido a partir del perfil zonal de viento y el último,  $\beta_z$ , está relacionado con la cizalla vertical del viento. Para obtener el segundo término se binea el perfil usando cajas de latitud de  $0,5^\circ$  y diferenciamos el perfil promediado resultante numéricamente respecto a la coordenada meridional y el último término tam-

<sup>2</sup>El parámetro de Coriolis se define como  $f_o = 2\Omega \sin\varphi$ , donde  $\Omega$  es la velocidad angular del planeta y  $\varphi$  es la latitud.

bién lo obtenemos numéricamente, siendo este dependiente de la latitud y de la altura. Por otro lado, hemos usado las medidas del campo de temperatura obtenidas con el instrumento CIRS de la misión Cassini (Simon-Miller et al., 2006) para poder calcular  $\partial u/\partial z$ .

Para poder calcular  $\beta_e$  necesitamos calcular la densidad  $\rho = \rho(z, \varphi)$ , que la obtenemos de la ecuación de los gases ideales:

$$P = \rho R^* T \quad (5.31)$$

donde  $R^* = R/\mu$  ( $R = 8.314 \text{ JK}^{-1}\text{mol}^{-1}$ ,  $\mu = 2.309 \text{ g mol}^{-1}$ ).

La frecuencia de Brunt-Väisälä ha sido calculada empleando la expresión:

$$N(z, \varphi)^2 = \frac{g^2}{c_p T(z, \varphi)}. \quad (5.32)$$

donde  $g$  es la gravedad, que la tomaremos como constante para el rango de latitudes en las que se encuentran las ondas de estudio, cuyo valor es de  $26 \text{ m/s}^2$  aproximadamente y  $c_p = 10420 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ . El cuadrado de la frecuencia de Brunt-Väisälä ( $N^2$ ) toma un valor de  $5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-2}$  en el nivel de presión esperado para la onda (350 mbar).

En la Figura 5.3, Figura 5.4, Figura 5.5 y Figura 5.6 representamos  $\beta$ ,  $\beta_y$ ,  $\beta_z$  y  $\beta_e$ , observando que el término que predomina sobre los demás es  $\beta_y$ .

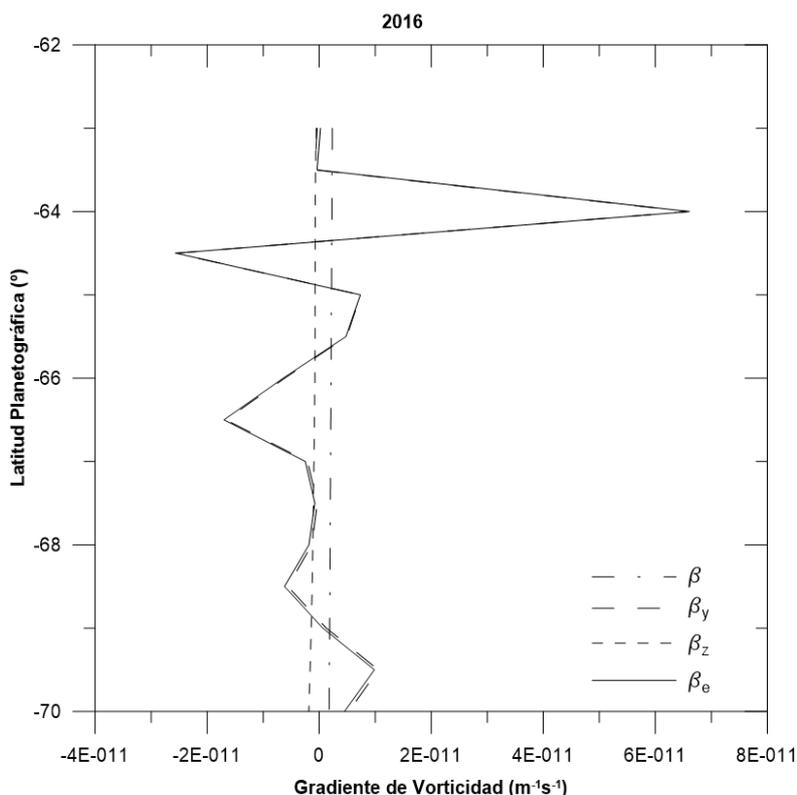


Figura 5.3: Gradiente de vorticidad en el año 2016.  $\beta_y$  es el término dominante, mientras que  $\beta_z$  y  $\beta_e$  prácticamente se anulan entre sí.

## 5.4. Interpretación de las ondas circumpolares

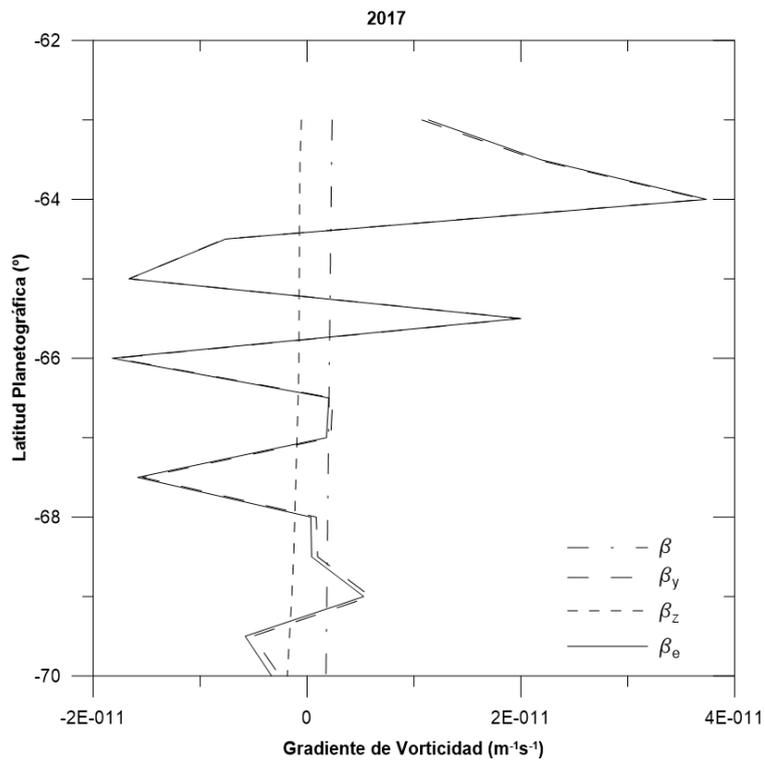


Figura 5.4: Gradiente de vorticidad en el año 2017.  $\beta_y$  es el término dominante, mientras que  $\beta_z$  y  $\beta_e$  prácticamente se anulan entre sí.

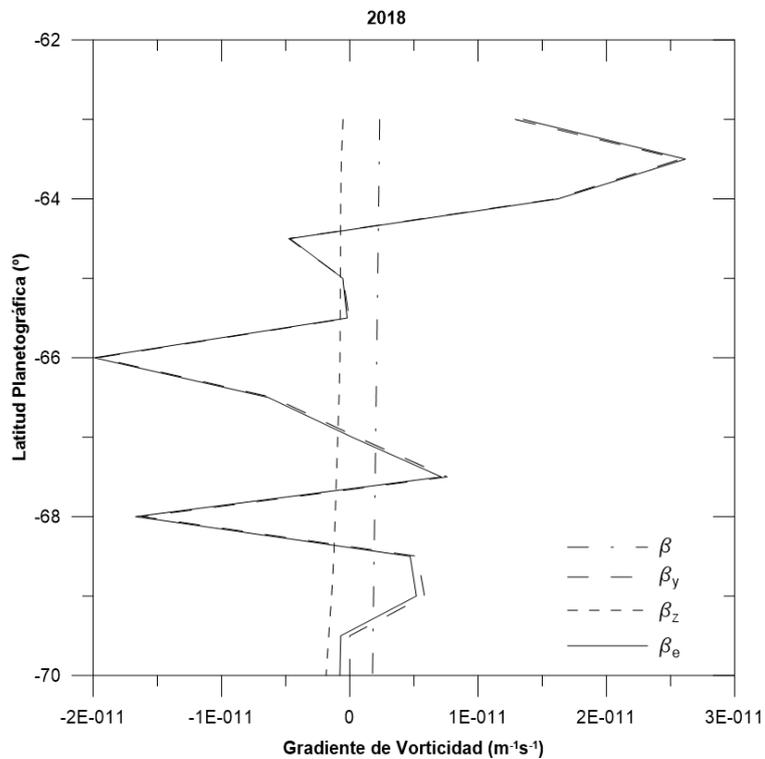


Figura 5.5: Gradiente de vorticidad en el año 2018.  $\beta_y$  es el término dominante, mientras que  $\beta_z$  y  $\beta_e$  prácticamente se anulan entre sí.

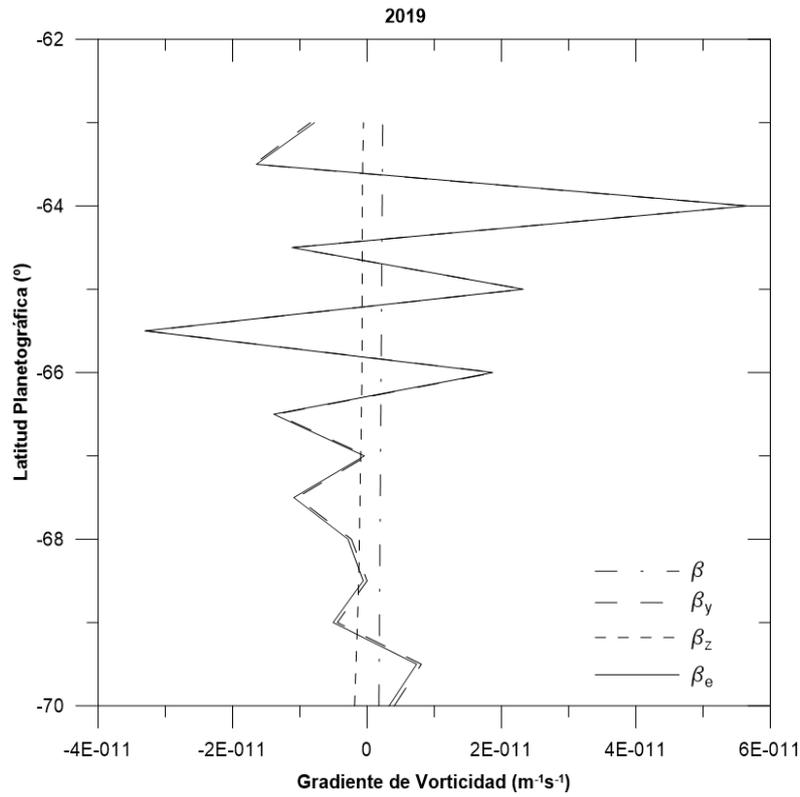


Figura 5.6: Gradiente de vorticidad en el año 2019.  $\beta_y$  es el término dominante, mientras que  $\beta_z$  y  $\beta_e$  prácticamente se anulan entre si.

Por último, nos queda resolver la escala de alturas que viene dada por la expresión:

$$H = \frac{RT(z, \varphi)}{\mu g} \quad (5.33)$$

donde debemos emplear los datos del campo térmico determinados por Cassini CIRS.

Todos los datos expuestos anteriormente los calculamos para cada año de estudio (2015, 2016, 2017, 2018) y los sustituimos en la Ecuación 5.28 obteniendo:

$$\begin{aligned} 2016 \rightarrow \ell^2 &= \frac{6,61 \times 10^{-11}}{\bar{u} - c} - 2,72 \times 10^{-13} - 1,84 \times 10^{-4} m^2 \\ 2017 \rightarrow \ell^2 &= \frac{1,13 \times 10^{-11}}{\bar{u} - c} - 3,35 \times 10^{-13} - 1,84 \times 10^{-4} m^2 \\ 2018 \rightarrow \ell^2 &= \frac{1,45 \times 10^{-11}}{\bar{u} - c} - 2,83 \times 10^{-13} - 1,84 \times 10^{-4} m^2 \\ 2019 \rightarrow \ell^2 &= \frac{5,66 \times 10^{-11}}{\bar{u} - c} - 3,5 \times 10^{-13} - 1,84 \times 10^{-4} m^2 \end{aligned} \quad (5.34)$$

En la Figura 5.7 y Figura 5.8 representamos la relación de dispersión tomando  $m$  como parámetro libre en el conjunto de expresiones de la Ecuación 5.34.

## 5.4. Interpretación de las ondas circumpolares

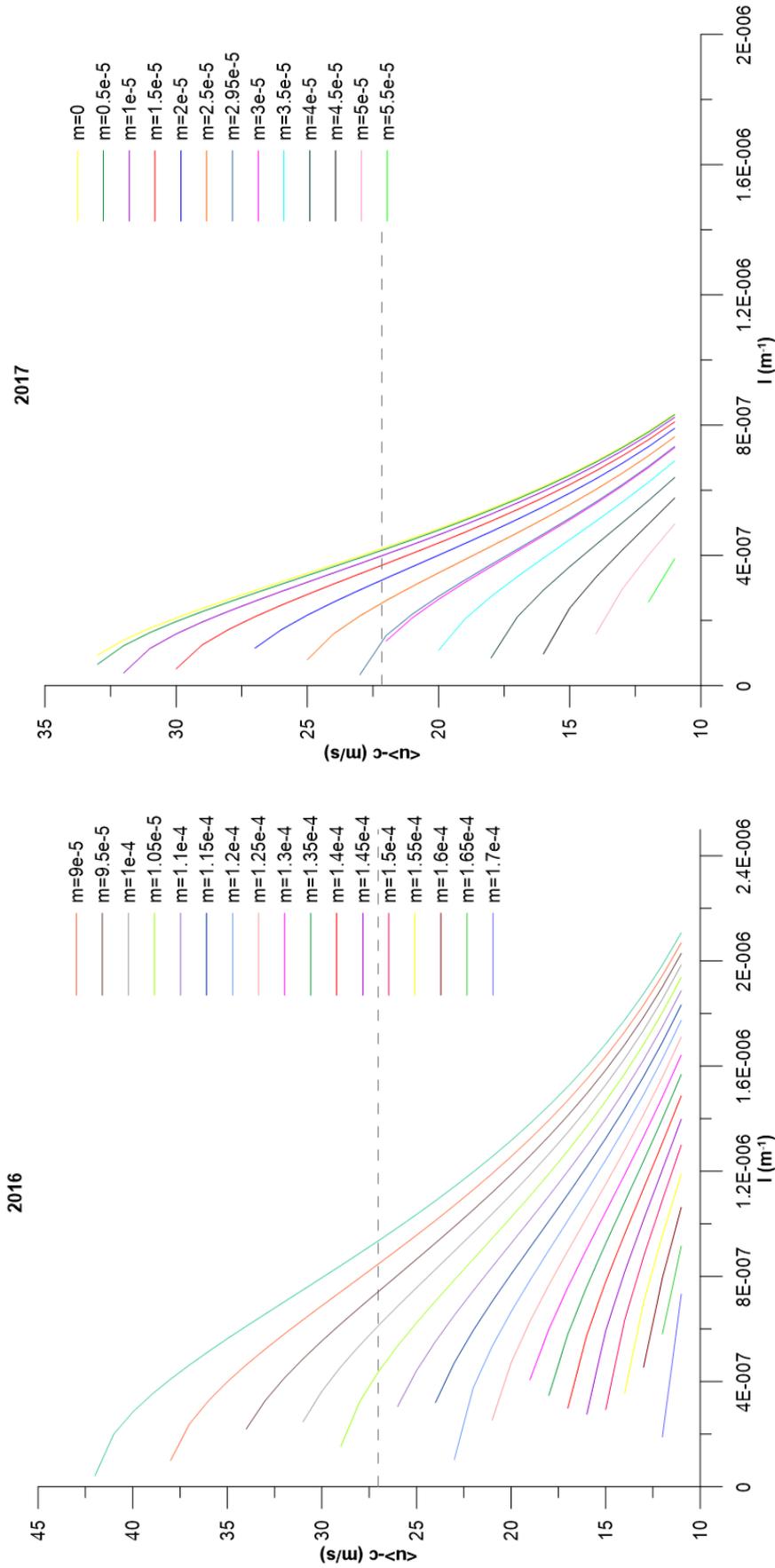


Figura 5.7: Representación gráfica de la relación de dispersión de la onda de Rossby para el año 2016 y 2017. Las líneas de colores representan las soluciones de la Ecuación 5.34 tomando un valor de  $m$  para cada uno de los colores. La línea discontinua representa la velocidad  $\bar{u} - c$  en ese año.

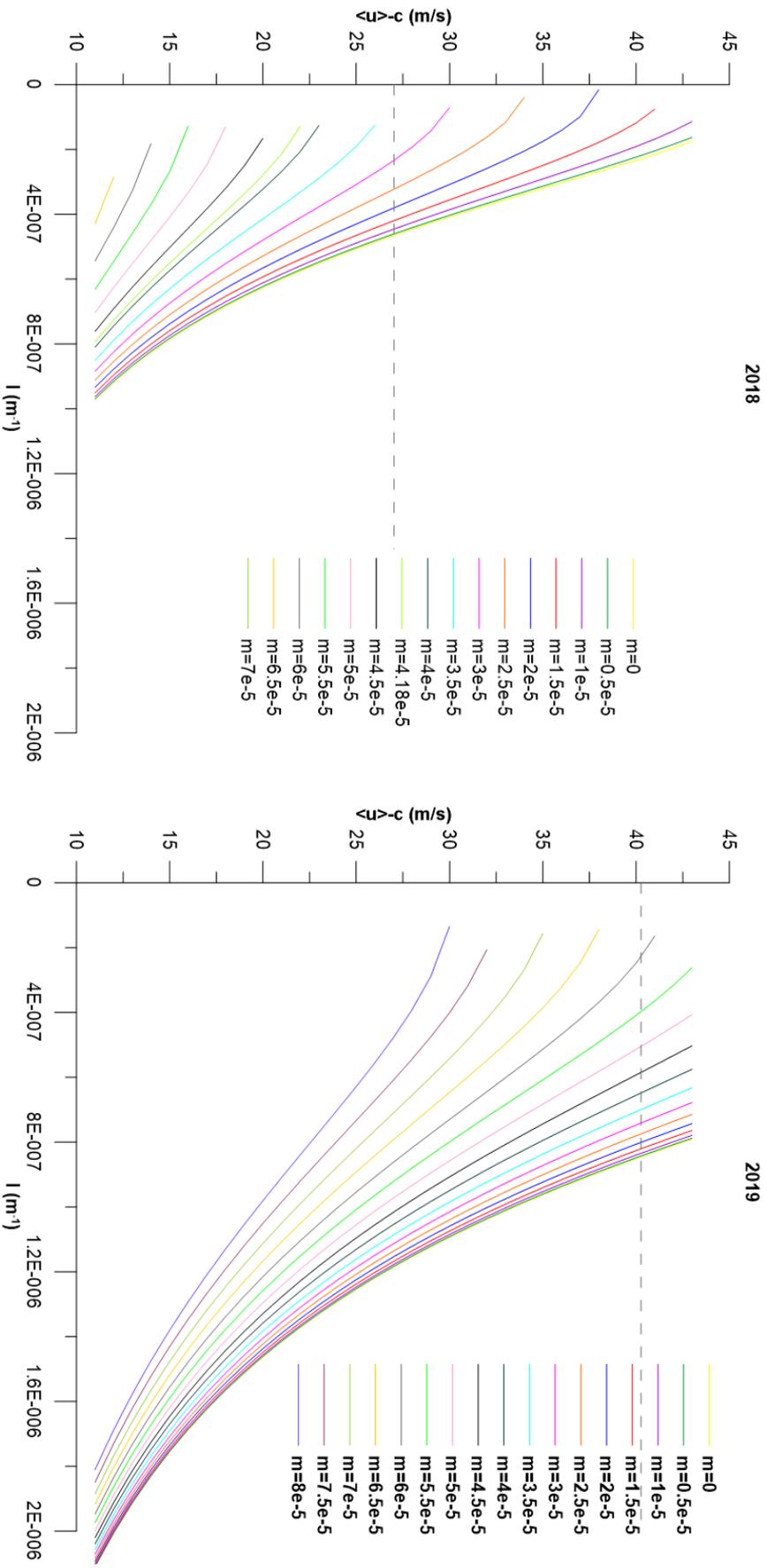


Figura 5.8: Representación gráfica de la relación de dispersión de la onda de Rossby para el año 2018 y 2019. Las líneas de colores representan las soluciones de la [Ecuación 5.34](#) tomando un valor de  $m$  para cada uno de los colores. La línea discontinua representa la velocidad  $\bar{u} - c$  en ese año.

## 5.4. Interpretación de las ondas circumpolares

A continuación, tomamos el valor de  $\bar{u} - c$  correspondiente a cada año, cuyo dato aparece en la [Tabla 4.1](#), y sustituimos en la [Ecuación 5.34](#) para ver el rango del número de onda meridional y vertical que cumplen dicha expresión.

En el año 2019 el valor de  $\bar{u} - c$  es  $40 \text{ m/s}$ . Sustituyendo en la [Ecuación 5.34](#) obtenemos la siguiente expresión:

$$\ell^2 = 1,08 \times 10^{-12} - 1,84 \times 10^{-4} m^2. \quad (5.35)$$

Cuando no hay oscilación meridional ( $\ell = 0$ ), el número de onda vertical alcanza un valor máximo de  $m = 7,7 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$  que corresponde a un mínimo de longitud de onda vertical de  $L_z = 81 \text{ km} \sim 5H$ . Por otro lado, cuando no hay oscilación vertical ( $m = 0$ ), obtenemos  $\ell = 1,05 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$  que corresponde a un mínimo de longitud de onda meridional de  $6000 \text{ km}$ . Por lo tanto, los valores de  $m$  y  $\ell$  tienen que estar comprendidos en los rangos:  $0 < m < 7,7 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$  y  $0 < \ell < 1,05 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ .

El procedimiento descrito anteriormente lo repetimos para los otros años de estudio. En la [Tabla 5.1](#) se recogen los resultados obtenidos.

Tabla 5.1: Rangos teóricos de los números de onda meridional y vertical cuando no hay oscilación vertical ( $m = 0$ ) o meridional ( $\ell = 0$ ).

<b>Año</b>	$m \text{ (m}^{-1}\text{)}$	$\ell \text{ (m}^{-1}\text{)}$	$L_z \text{ (km)}$	$L_y \text{ (km)}$
2019	$0 < \ell < 1,05 \times 10^{-6}$	$0 < m < 7,7 \times 10^{-5}$	$81 \sim 5H$	6000
2018	$0 < \ell < 2,55 \times 10^{-7}$	$0 < m < 2,22 \times 10^{-5}$	$283 \sim 17H$	24640
2017	$0 < \ell < 2,9 \times 10^{-7}$	$0 < m < 2,17 \times 10^{-5}$	$289 \sim 17H$	21666
2016	$0 < \ell < 1,3 \times 10^{-6}$	$0 < m < 9,7 \times 10^{-5}$	$65 \sim 4H$	4833

De la [Figura 5.7](#) y la [Figura 5.8](#) podemos obtener gráficamente los valores de  $m$  y  $\ell$  según el valor  $\bar{u} - c$  que tiene la onda en cada año de estudio, obteniendo:

Tabla 5.2: Rangos obtenidos gráficamente de los números de onda meridional y vertical.

<b>Año</b>	$m \text{ (m}^{-1}\text{)}$	$\ell \text{ (m}^{-1}\text{)}$
2019	$2,48 \times 10^{-7} < \ell < 8,5 \times 10^{-7}$	$0 < m < 6 \times 10^{-5}$
2018	$8,4 \times 10^{-8} < \ell < 5,4 \times 10^{-7}$	$0 < m < 4 \times 10^{-5}$
2017	$3 \times 10^{-8} < \ell < 3,98 \times 10^{-7}$	$0 < m < 2,95 \times 10^{-5}$
2016	$4,4 \times 10^{-7} < \ell < 9,4 \times 10^{-7}$	$8,5 \times 10^{-5} < m < 1,05 \times 10^{-4}$

Comparando los rangos obtenidos gráficamente (dando diferentes valores a  $m$ ) y los obtenidos teóricamente (estudiando el caso límite de  $\ell = 0$  (sin oscilación meridional) y  $m = 0$  (sin oscilación vertical)) vemos que los intervalos obtenidos gráficamente son similares a

los teóricos.

Para determinar el confinamiento vertical y meridionalmente de las ondas debe existir un nivel crítico, donde  $\bar{u} - c = 0$ . Como dijimos en la [Subsección 5.3.2](#), cuando  $\bar{u} = c$  los números de onda vertical y meridional tienden a infinito y la amplitud de las ondas decrece hasta desaparecer. En esta sección también hemos obtenido que la longitud de onda vertical mínima es de  $L_z \sim 5H$  en el año 2019,  $L_z \sim 17H$  en 2018 y 2017 y  $L_z \sim 4H$  en 2016. Dichos valores son razonables y que en 2018 y 2017 su valor sea mayor que en los otros años, se debe a que el valor del parámetro *beta efectiva* es menor, debido a que la onda en dichos años se encuentra en otra latitud menor.

Teniendo en cuenta todo esto y que en todos los años las ondas se desplazan hacia el oeste, podemos interpretar la onda como onda de Rossby y confinar dicha onda vertical y meridionalmente para un número de onda concreto.

# Capítulo 6

## Conclusiones y trabajo futuro

Usando imágenes obtenidas con el Telescopio Espacial Hubble, hemos caracterizado las ondas circumpolares visibles en las longitudes de onda del ultravioleta y del metano, de los años 1996, 2015, 2016, 2017, 2018 y 2019. Dichas imágenes han sido navegadas y analizadas con LAIA para poder realizar medidas y obtener, también con LAIA, las proyecciones polares y los planisferios. Gracias a los planisferios se ha podido conseguir, utilizando el método de correlación automática, los perfiles de vientos en el filtro del infrarrojo cercano de los años de estudio con el software PICV y gracias a las proyecciones polares, se han podido caracterizar las nieblas circumpolares de las imágenes tomadas con los filtros metano y ultravioleta de los años de estudio. Con todo ello ha sido posible realizar un estudio de la evolución en el tiempo de las ondas circumpolares de 1996, 2015, 2016, 2017, 2018 y 2019. Además, al tener acceso a los datos de las características obtenidas desde 1993 hasta 2000 (Barrado-Izagirre et al., 2008) y desde 2012 hasta 2014 (Ochoa-Maruri, 2015), se ha podido completar el estudio haciendo una comparación de las características obtenidas desde 1993 hasta 2019.

La mayoría de las características principales de las ondas circumpolares son constantes en el tiempo, excepto la velocidad de fase y la velocidad zonal del viento a la latitud a la que se encuentra la onda. Las velocidades de fase de las ondas en general son pequeñas, por lo que se podría decir, que son ondas cuasi-estacionarias. Por otro lado, éstas ondas existen permanentemente en la zona polar de la atmósfera de Júpiter y aunque son cuasi-estacionarias presentan desplazamiento hacia el oeste respecto al viento zonal promedio, lo que hace pensar que podrían tratarse de ondas de Rossby, como se ha sugerido en trabajos previos.

En el filtro del metano, la latitud de la onda norte se encuentra entre  $55^\circ$  y  $64^\circ$ , siendo la onda del 2015 y 2018 las que se encuentran a menor latitud, y la latitud de la onda sur entre  $-62.1^\circ$  y  $-64^\circ$ . La amplitud de la onda norte permanece más constante que la de la onda sur, la cual sufre variaciones de unos años a otros excepto de 2018 a 2019. Por otro lado, la velocidad zonal relativa al viento promedio ( $c - \langle u \rangle$ ) en el norte cambia de signo de unos años a otros debido al cambio en la latitud, sin embargo, en el sur siempre es negativo pero cambia significativamente de magnitud desde 2016 hasta 2019.

## Capítulo 6. Conclusiones y trabajo futuro

---

En el filtro del ultravioleta, la latitud de la onda norte es similar entre 1996 y desde 2015 hasta 2018, pero cambia drásticamente en el 2019. En el caso del sur la latitud es bastante similar en todos los años. La amplitud tanto en el norte como en el sur es bastante similar, en un rango de  $3^\circ$  en el caso del norte y de  $1^\circ$  en el caso sur. Por otro lado, la velocidad zonal relativa al viento promedio ( $c - \langle u \rangle$ ) en el norte es igual en los años 2015, 2016 y 2019 pero es muy diferente en magnitud y signo en el año 1996, y en el sur cambia de signo de unos años a otros excepto entre 2018 y 2019 donde no cambia de signo y además tiene el mismo valor. También observamos que el número de onda en el caso de la onda del sur va en aumento de unos años a otros, comenzando en 10 en el año 2015 y llegando a 14 en el año 2019. En este caso la velocidad de fase también es muy estacionaria.

La onda mejor definida y de la que tenemos más datos fiables es la onda sur del metano que además siempre es hacia el oeste, es por esto que hacemos una interpretación en términos de onda de Rossby. Además, concluimos que los resultados obtenidos son compatibles con dicha interpretación y es posible confinar las ondas circumpolares sur tanto meridional como verticalmente.

Por último, observamos que los perfiles de vientos obtenidos por correlación automática son muy similares al perfil de referencia de 2016. Esto es debido a que los vientos del planeta Júpiter están arraigados en el interior del planeta y se mantienen invariantes frente a los cambios que se puedan producir por fenómenos atmosféricos o exteriores.

En resumen, gracias a este trabajo se ha podido comprobar el comportamiento estacionario de los vientos de Júpiter con el paso del tiempo, se ha aprendido a manejar los software que se utilizan en el Grupo de Ciencias Planetarias y se han podido entender y comparar las características de las ondas circumpolares así como su evolución temporal. La línea de investigación futura sería realizar la interpretación como onda Rossby pero para el filtro del ultravioleta, en los casos que se cumplan las condiciones necesarias para que pueda tratarse de una onda Rossby. También sería interesante obtener por correlación automática los perfiles de vientos en los filtros del metano y el ultravioleta. Y por último, sería interesante investigar si es posible ampliar el análisis con imágenes de Juno.

# Bibliografía

- Alfonso-Garzón, J., Galadí-Enríquez, D., and Morales-Durán, C. (2009). 100 conceptos básicos de Astronomía.
- Allison, M. (1990). Planetary waves in Jupiter's equatorial atmosphere. *Icarus*, 83:282–307.
- Antuñano, A., Fletcher, L., Orton, G., Melin, H., Rogers, J., Harrington, J., Donnelly, P., Rowe-Gurney, N., and Blake, J. (2018). Infrared characterisation of jupiter's equatorial disturbance cycle. *Geophysical Research Letters*.
- Arregi, J., Rojas, J. F., Sánchez-Lavega, A., and Morgado, A. (2006). Phase dispersion relation of the 5-micron hot spot wave from a long-term study of Jupiter in the visible. *Journal of Geophysical Research (Planets)*, 111:9010.
- Barrado-Izagirre, N., Sánchez-Lavega, A., Pérez-Hoyos, S., and Hueso, R. (2008). Jupiter's polar clouds and waves from Cassini and HST images: 1993-2006. *Icarus*, 194:173–185.
- Choi, D. S., Showman P., Vasavada, A., R., A., and Simon, A. (2013). Meteorology of jupiter's equatorial hot spots and plumes from cassini. *Icarus*, 223.
- Connerney, J., Benn, M., Bjarno, J., Denver, T., Espley, J., Jorgensen, J., Jorgensen, P., Lawton, P., Malinnikova, A., Merayo, J., Murphy, S., Odom, J., Oliverson, R., Schnurr, R., Sheppard, D., and Smith, E. (2017). The Juno Magnetic Field Investigation. *Space Science Reviews*.
- Davies, M. E., Abalakin, V. K., Bursa, M., Lederle, T., Lieske, J. H., Rapp, R. H., Seidelman, P. K., Singclair, A. T., Tejfel, V. G., and Tjuffin, Y. S. (1986). Report of the IAUIAG COSPAR working group on cartographic coordinates and rotational elements of the planets and satellites: 1985. *Celestial Mechanics*, 39:102–113.
- Dressel, L. (2019). Wide Field Camera 3 Instrument Handbook, Version 11.0.
- Fraknoi, A., Morrison, D., and Wolff, S. (2016). *Astronomy (The Textbook)*.
- García-Melendo, E. and Sánchez-Lavega, A. (2000). A Study of the Stability of Jovian Zonal Winds from HST Images: 1995-2000. *Icarus*, 152.
- Holton, J. R. (2004). *An introduction to dynamic meteorology*. International geophysics series, San Diego, New York: Academic Press, c2004, 4rd ed.

## Bibliografía

---

- Hueso, R., Legarreta, J., García-Melendo, E., Sánchez-Lavega, A., and Pérez-Hoyos, S. (2009). The Jovian anticyclone BA: II. Circulation and interaction with the zonal jets. *Icarus*, In Press, Accepted Manuscript.
- Hueso, R., Legarreta, J., Rojas, J., Peralta, J., Perez-Hoyos, S., Río-Gaztelurrutia, T., and Sánchez-Lavega, A. (2010). The Planetary Laboratory for Image Analysis (PLIA). *Advances in Space Research*, 46:1120–1138.
- Hueso, R., Sánchez-Lavega, A., Iñurriagarro, P., Rojas, J., Pérez-Hoyos, S., Mendikoa, I. n., Gómez-Forrellad, J., go, C., Peach, D., Colas, F., and Vedovato, M. (2017). Jupiter cloud morphology and zonal winds from ground-based observations before and during Juno's first perijove: Jupiter Cloud Morphology Before Juno. *Geophysical Research Letters*, 44.
- Ingersoll, A., E. Dowling, T., Gierasch, P., Orton, G., Read, P., Sánchez-Lavega, A., P. Showman, A., Simon, A., and R. Vasavada, A. (2004). Dynamics of Jupiter's Atmosphere. *Jupiter. The Planet, Satellites and Magnetosphere*, pages 105–128.
- Ingersoll, A. P. (1999). *Atmospheres of the giant planets*, pages 201–220.
- Kaspi, Y., Galanti, E., Hubbard, W., Stevenson, D., Bolton, S., Iess, L., Guillot, T., Bloxham, J., Connerney, J., Cao, H., Durante, D., Folkner, W., Helled, R., Ingersoll, A., Levin, S., Lunine, J., Miguel, Y., Militzer, B., Parisi, M., and Wahl, S. (2018a). Jupiter atmospheric jet streams extend thousands of kilometres deep. *Nature*, 555.
- Kaspi, Y., Galanti, E., Hubbard, W., Stevenson, D., Bolton, S., Iess, L., Guillot, T., Bloxham, J., E. P. Connerney, J., Cao, H., Durante, D., Folkner, W., Helled, R., Ingersoll, A., M. Levin, S., I. Lunine, J., Miguel, Y., Militzer, B., Parisi, M., and Wahl, S. (2018b). Jupiter's atmospheric jet streams extend thousands of kilometres deep. *Nature*, 555:223–226.
- Lemasquerier, D., Facchini, G., Favier, B., and Le Bars, M. (2020). Remote determination of the shape of Jupiter's vortices from laboratory experiments. *Nature Physics*, 16.
- Li, L., Ingersoll, A. P., Vasavada, A. R., Simon-Miller, A. A., Achterberg, R. K., Ewald, S. P., Dyudina, U. A., Porco, C. C., West, R. A., and Flasar, F. M. (2006). Waves in Jupiter's atmosphere observed by the Cassini ISS and CIRS instruments. *Icarus*, 185:416–429.
- Oberg, K. and Wordsworth, R. (2019). Jupiter's composition suggests its core assembled exterior to the N<sub>2</sub> snowline.
- Ochoa-Maruri, I. (2015). Ondas polares en Júpiter.
- Ortiz, J. L., Orton, G. S., Friedson, A. J., Stewart, S. T., Fisher, B. M., and Spencer, J. R. (1998). Evolution and persistence of 5- $\mu$ m hot spots at the Galileo probe entry latitude. *Journal of Geophysical Research*, 103:23051–23069.
- Orton, G. S., Fisher, B. M., Baines, K. H., Stewart, S. T., Friedson, A. J., Ortiz, J. L., Marinova, M., Ressler, M., Dayal, A., Hoffmann, W., Hora, J., Hinkley, S., Krishnan,

- V., Masanovic, M., Tesic, J., Tziolas, A., and Parija, K. C. (1998). Characteristics of the Galileo probe entry site from Earth-based remote sensing observations. *Journal of Geophysical Research*, 103:22791–22814.
- Pérez-Hoyos, S., Sanz Requena, J. F., Barrado-Izagirre, N., Rojas, J., and Sánchez-Lavega, A. (2012). The 2009-2010 fade of Jupiter’s South Equatorial Belt: Vertical cloud structure models and zonal winds from visible imaging. *Icarus*, 217:256–271.
- Reese, E. and Smith, B. (1968). Evidence of vorticity in the great red spot of jupiter. *Icarus*, 9:474–486.
- Rogers, J. H. (1995). *The giant planet Jupiter*. Cambridge ; New York, NY, USA : Cambridge University Press, 1995.
- Rogers, J. H. (2008). The accelerating circulation of jupiter’s great red spot. *Journal of the British Astronomical Association*, 118:14–20.
- Rogers, J. H. (2014). The great red spot in 2013/14: Faster shrinkage and evidence for faster wind speed.
- Salby, M. L. (1996). *Fundamentals of Atmospheric Physics*, volume 61 of *International Geophysics Series*. Academic Press, San Diego, U.S.A.
- Sánchez-Lavega, A. (2010). *An introduction to planetary atmospheres*.
- Sánchez-Lavega, A. (2014). Vientos en los planetas gigantes. *Investigación y Ciencia*.
- Sánchez-Lavega, A. (2020). Spectroscopy and Composition. Apuntes Atmósferas Planetarias, Máster en Ciencia y Tecnología Espacial.
- Sánchez-Lavega, A., H. Rogers, J., Orton, G., García-Melendo, E., Legarreta, J., Colas, F., L. Dauvergne, J., Hueso, R., Rojas, J., Perez-Hoyos, S., Mendikoa, I. n., Iñurri-garro, P., Gómez-Forrellad, J., Momary, T., J. Hansen, C., Eichstaedt, G., Miles, P., and Wesley, A. (2017). A planetary-scale disturbance in the most intense Jovian atmospheric jet from JunoCam and ground-based observations: JUPITER’S NTB JET DISTURBANCE. *Geophysical Research Letters*, 44.
- Sánchez-Lavega, A., Hueso, R., and Acarreta, J. R. (1998). A system of circumpolar waves in Jupiter’s stratosphere. *Geophysical Research Letters*, 25:4043–4046.
- Sánchez-Lavega, A., Hueso, R., Eichstadt, G., Orton, G., Rogers, J., Hansen, C., Momary, T., Tabataba-Vakili, F., and Bolton, S. (2018). The Rich Dynamics of Jupiter’s Great Red Spot from JunoCam: Juno Images. *The Astronomical Journal*, 156.
- Sánchez-Lavega, A., Orton, G. S., Hueso, R., García-Melendo, E., Pérez-Hoyos, S., Simon-Miller, A., Rojas, J. F., Gómez, J. M., Yanamandra-Fisher, P., Fletcher, L., Joels, J., Kemerer, J., Hora, J., Karkoschka, E., de Pater, I., Wong, M. H., Marcus, P. S., Pinilla-Alonso, N., Carvalho, F., Go, C., Parker, D., Salway, M., Valimberti, M., Wesley, A., and Pujic, Z. (2008). Depth of a strong jovian jet from a planetary-scale disturbance driven by storms. 451:437–440.

## Bibliografía

---

- Sánchez-Lavega, A., Wesley, A., Orton, G., Hueso, R., Perez-Hoyos, S., Fletcher, L. N., Yanamandra-Fisher, P., Legarreta, J., de Pater, I., Hammel, H., Simon-Miller, A., Gomez-Forrellad, J. M., Ortiz, J. L., García-Melendo, E., Puetter, R. C., and Chodas, P. (2010). The impact of a large object on Jupiter in 2009 July. *The Astrophysical Journal*, 715(2):L155–L159.
- Sheehan, W. and Hockey, T. (2018). *Jupiter*. Reaktion Book Ltd.
- Simon-Miller, A. A., Conrath, B. J., Gierasch, P. J., Orton, G. S., Achterberg, R. K., Flasar, F. M., and Fisher, B. M. (2006). Jupiter’s atmospheric temperatures: From Voyager IRIS to Cassini CIRS. *Icarus*, 180:98–112.
- Smith, A., B., Soderblom, A., L., V. Johnson, T., Ingersoll, A., A. Collins, S., M. Shoemaker, E., E Hunt, G., Masursky, H., Carr, M., E. Davies, M., II A. F., C., Boyce, J., Edward Danielson, G., Owen, T., Sagan, C., Beebe, R., Veverka, J., Strom, R., F. McCauley, J., and E. Suomi, V. (1979). The Jupiter System Through the Eyes of Voyager 1. *Science (New York, N.Y.)*, 204.
- Vincent, M. B., Clarke, J. T., Ballester, G. E., Harris, W. M., West, R. A., Trauger, J. T., Evans, R. W., Stapelfeldt, K. R., Crisp, D., Burrows, C. J., Gallagher, J. S., Griffiths, R. E., Jeff Hester, J., Hoessel, J. G., Holtzman, J. A., Mould, J. R., Scowen, P. A., Watson, A. M., and Westphal, J. A. (2000). Jupiter’s Polar Regions in the Ultraviolet as Imaged by HST/WFPC2: Auroral-Aligned Features and Zonal Motions. *Icarus*, 143:205–222.
- Young, R. E. (2003). The Galileo probe: how it has changed our understanding of Jupiter. *New Astronomy Review*, 47:1–51.