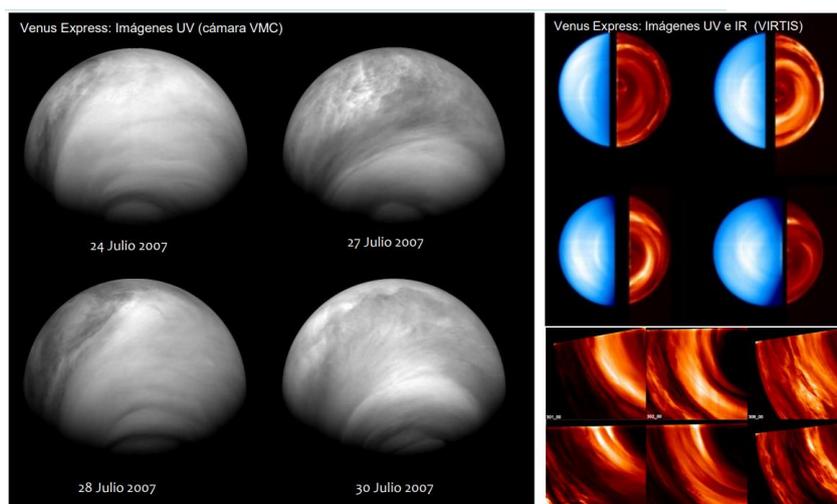


MÁSTER UNIVERSITARIO EN CIENCIAS Y TECNOLOGIAS ESPACIALES

# TRABAJO FIN DE MÁSTER

## *ESTUDIO TRIDIMENSIONAL DE LOS VIENTOS DEL VORTICE POLAR SUR DE VENUS*



**Estudiante:** Lobo Portela, Iñigo

**Director/Directora:** Garate López, Itziar

**Curso:** 2022-2023

**Fecha:** Vitoria-Gasteiz, 4 de septiembre de 2023



## **AGRADECIMIENTOS**

A mi tutora Itziar, por haberme ayudado tanto durante todo el proceso y por la paciencia que ha mostrado cuando me quedaba sin ideas.

A mis amigos del máster que me han ayudado durante todo el año y han hecho que consiga salir adelante en los momentos más difíciles.

También me gustaría agradecer a todas aquellas personas que forman parte de mi día a día sin ellos no sería la persona que soy.

## Resumen

Venus es considerado el planeta gemelo de nuestro planeta, no obstante, su atmósfera evoluciono de manera muy distinta a la nuestra. La distinta evolución de la atmósfera de Venus convierte al planeta en un gran atractivo para el estudio. La atmósfera venusiana está compuesta por una densa capa de nubes que envuelve el planeta y provoca un efecto invernadero desbocado.

La misión Venus Express realizo observaciones a uno de los vórtices polares, el ubicado en el polo sur del planeta. Utilizando el espectrómetro VIRTIS-M se realizaron varias imágenes en el infrarrojo para estudiar la dinámica del vórtice tanto en la capa alta como en la capa baja de las nubes de Venus. Para el estudio de la capa baja de las nubes se utilizaron imágenes en 1.7  $\mu\text{m}$  y para el estudio de la capa alta se utilizaron imágenes en 5.1  $\mu\text{m}$ .

Mediante el software desarrollado por el grupo de Ciencias Planetarias de la Universidad del País Vasco, PLIA, se trataron las imágenes de la misión Venus Express y con el software PICV3 desarrollado por el mismo grupo, se analizaron los vientos zonales y meridionales en la región del vórtice del polo sur de Venus.

El estudio de la dinámica del vórtice polar sur de Venus podría ayudar a comprender en mejor medida la dinámica de la atmósfera de Venus, y ayudarnos a comprender mejor nuestra propia atmósfera y su posible evolución.

## Abstract

Venus is considered the twin planet of our planet, however, its atmosphere evolved very differently from ours. The different evolution of the atmosphere of Venus makes the planet a great attraction for study. It is composed of a dense layer of clouds that envelops the planet and causes a runaway greenhouse effect.

The Venus Express mission made observations of one of the polar vortexes, the one located at the planet's south pole. Using the VIRTIS-M spectrometer, several infrared images were taken to study the dynamics of the vortex in both the upper and lower layers of Venus clouds. For the study of the lower layer of the clouds, 1.7  $\mu\text{m}$  images were used and for the study of the upper layer of the clouds, 5.1  $\mu\text{m}$  images were used.

Using the software developed by the Planetary Sciences Group of the University of the Basque Country, PLIA, the images of the Venus Express mission were processed and with the PICV3 software developed by the same group, the zonal and meridional winds in the region of the south polar vortex of Venus were analysed.

Studying the dynamics of Venus south polar vortex could help us to understand better the dynamics of Venus atmosphere and help us to understand better our own atmosphere and its possible evolution.

## **Laburpena**

Artizarra gure planetaren bikitzat hartzen da; hala ere, haren atmósfera ez da gurea bezalakoa. Artizarraren atmósferaren bilakaera desberdina izan denez, planeta oso erakargarria da azterketarako. Atmósfera planeta inguratzen duen eta berotegi-efektua eragiten duen hodei-geruza lodi batek osatzen du.

Venus Express misioak behaketak egin zizkion planetaren hegoaldeko poloan kokatutako bortizeari. VIRTIS-M espektrometroa erabiliz, zenbait irudi egin ziren infragorrian, Artizarraren hodeien goi-geruzan nahiz behe-geruzan bortizearen dinamika aztertzeke. Hodeien beheko geruza aztertzeke, 1.7  $\mu\text{m}$ -ko irudiak erabili ziren, eta goiko geruza aztertzeke, 5.1  $\mu\text{m}$ -ko irudiak.

Euskal Herriko Unibertsitateko Zientzia Planetarioen Taldeak garatutako PLIAsoftwarearen bidez, Venus Express misioaren irudiak aztertu ziren eta talde berak garatutako PICV3 softwareen bidez, Artizarraren hegoaldeko poloko bortizearen haize zonal eta meridionalak aztertu ziren.

Artizarraren hegoaldeko bortize polarraren dinamika aztertuta, Venusen atmósferaren dinamika hobeto ulertzen lagun genezake, eta baita gure atmósfera eta haren bilakaera hobeto ulertzen.



## Índice General

<b>Introducción</b> .....	13
<b>Venus</b> .....	13
<b>Vórtice sur de Venus</b> .....	16
<b>VIRTIS</b> .....	18
<b>Metodología</b> .....	22
<b>PLIA</b> .....	22
<b>PICV3</b> .....	24
<b>Metodología del análisis</b> .....	25
<b>Cálculo de errores</b> .....	33
<b>Resultados</b> .....	35
<b>Tratado de imágenes</b> .....	35
<b>Seguimiento de las nubes en PICV3</b> .....	39
<b>Mapas de viento y vorticidad</b> .....	47
<b>Conclusiones</b> .....	55



## Índice de figuras

<b>Figura 1.</b> Perfil de temperatura de la atmósfera de Venus. Los datos fueron obtenidos por la sonda Pioneer Venus [2].	13
<b>Figura 2.</b> Efecto invernadero desbocado en Venus en comparación con la Tierra [6].	14
<b>Figura 3.</b> Circulación atmosférica de Venus [6].	15
<b>Figura 4.</b> Diferentes puntos de análisis en la nube de Venus en función de la longitud de onda.	16
<b>Figura 5.</b> Perfiles de vientos zonales (izquierda) y meridionales (derecha) en la nube superior [3]. La línea continua muestra el valor promedio y las líneas discontinuas horizontales y la región sombreada la dispersión del promedio. El perfil discontinuo representa los datos obtenidos por [8].	17
<b>Figura 6.</b> Imágenes del vórtice polar sur obtenidas por el instrumento VIRTIS.	18
<b>Figura 7.</b> Principales características del instrumento VIRTIS [11].	19
<b>Figura 8.</b> Espectro infrarrojo de la atmósfera de Venus, que muestra algunas ventanas de visualización de las diferentes capas de nubes. Fuente: Garate-López, 2014. [15].	20
<b>Figura 9.</b> Espectro infrarrojo de Venus a partir de las observaciones con el instrumento VIRTIS mostrando ventanas de observación características en la atmósfera de Venus.	23
<b>Figura 10.</b> Interfaz del software PLIA.	24
<b>Figura 11.</b> Interfaz de la extensión de PLIA para en análisis de los vientos PICV3.	25
<b>Figura 12.</b> Panel de selección de longitud de onda de las imágenes obtenidas por VIRTIS en el software PLIA.	26
<b>Figura 13.</b> Ventana de información de la imagen seleccionada.	26
<b>Figura 14.</b> Panel de la selección de los valores máximos y mínimos de contraste.	27
<b>Figura 15.</b> Menú para definir las condiciones para la proyección polar de la imagen a estudiar en el software PLIA.	28
<b>Figura 16.</b> Panel de la sección de Edit Options>Map Parameters de la extensión PICV3 del software PLIA.	29
<b>Figura 17.</b> Panel de la sección de Edit Options>Algorithm Parameters de la extensión PICV3 del software PLIA.	29
<b>Figura 18.</b> Panel de la sección de Edit Options>Data Save Parameters de la extensión PICV3 del software PLIA.	30
<b>Figura 19.</b> Panel de seguimiento del análisis de los vientos en la extensión PICV3.	30
<b>Figura 20.</b> Mapa de correlación junto a las imágenes muestreadas del panel de seguimiento del análisis de los vientos en la extensión PICV3.	31

<b>Figura 21.</b> Ejemplo del archivo de texto con los resultados del seguimiento realizado en la extensión PICV3. ....	32
<b>Figura 22.</b> Velocidad del viento zonal para la nube inferior en la órbita 565. Los puntos naranjas representan las medidas de viento realizadas en este proyecto. Los puntos azules las medidas previas realizadas por [16]. ....	32
<b>Figura 23.</b> Imágenes obtenidas por VIRTIS en 1.7 micras de la órbita 565 de Venus Express procesadas con el software PLIA. ....	36
<b>Figura 24.</b> Imágenes obtenidas por VIRTIS en 5.1 micras de la órbita 565 de Venus Express procesadas con el software PLIA. ....	36
<b>Figura 25.</b> Imágenes obtenidas por VIRTIS en 1.7 micras de la órbita 567 de Venus Express procesadas con el software PLIA. ....	37
<b>Figura 26.</b> Imágenes obtenidas por VIRTIS en 5.1 micras de la órbita 567 de Venus Express procesadas con el software PLIA. ....	37
<b>Figura 27.</b> Imágenes obtenidas por VIRTIS en 1.7 micras de la órbita 571 de Venus Express procesadas con el software PLIA. ....	38
<b>Figura 28.</b> Imágenes obtenidas por VIRTIS en 5.1 micras de la órbita 571 de Venus Express procesadas con el software PLIA. ....	38
<b>Figura 29.</b> Medidas individuales obtenidas para los vientos meridionales (V) y zonales (U) del vórtice polar sur en 1.7 micras en las tres órbitas estudiadas (puntos naranjas), en comparación a estudios previos (Rodríguez-Ovalle & Garate-Lopez, 2021). ....	40
<b>Figura 30.</b> Medidas individuales obtenidas para los vientos meridionales (V) y zonales (U) del vórtice polar sur en 5.1 micras en las tres órbitas estudiadas (puntos naranjas), en comparación a estudios previos (Rodríguez-Ovalle & Garate-López, 2021). ....	41
<b>Figura 31.</b> Medidas filtradas para los vientos meridionales (V) y zonales (U) del vórtice polar sur en 1.7 micras en las tres órbitas estudiadas (puntos naranjas), en comparación a estudios previos (Rodríguez-Ovalle & Garate-Lopez, 2021). ....	42
<b>Figura 32.</b> Medidas filtradas para los vientos meridionales (V) y zonales (U) del vórtice polar sur en 5.1 micras en las tres órbitas estudiadas (puntos naranjas), en comparación a estudios previos (Rodríguez-Ovalle & Garate-López, 2021). ....	43
<b>Figura 33.</b> Mapa de los vectores de viento obtenido ejecutando la subrutina Draw_Polar_Vectors_Map en IDL utilizando los datos obtenidos en PICV3 y las imágenes tratadas en PLIA de la órbita 565. La imagen de arriba representa la imagen analizada en 1.7 micras y la de abajo en 5.1 micras. ....	44
<b>Figura 34.</b> Mapa de los vectores de viento obtenido ejecutando la extensión Draw_Polar_Vectors_Map en IDL utilizando los datos obtenidos en PICV3 y las imágenes	

tratadas en PLIA de la órbita 567 La imagen de arriba representa la imagen analizada en 1.7 micras y la de abajo en 5.1 micras. ....	45
<b>Figura 35.</b> Mapa de los vectores de viento obtenido ejecutando la extensión Draw_Polar_Vectors_Map en IDL utilizando los datos obtenidos en PICV3 y las imágenes tratadas en PLIA de la órbita 571 La imagen de arriba representa la imagen analizada en 1.7 micras y la de abajo en 5.1 micras. ....	46
<b>Figura 36.</b> Densidad de datos de la zona de estudio para las diferentes órbitas. La primera fila representa la órbita 565. La segunda fila representa la órbita 567. La tercera fila representa la órbita 571. Los paneles de la izquierda representan el estudio de la capa inferior de las nubes (1.7 micras) y los paneles de la derecha representan el estudio de la capa superior (5.1 micras). ....	48
<b>Figura 37.</b> Viento meridional de la zona de estudio para las diferentes órbitas. La primera fila representa la órbita 565. La segunda fila representa la órbita 567. La tercera fila representa la órbita 571. El panel de la izquierda representa el estudio de la capa inferior de las nubes (1.7 micras) y el panel de la derecha representa el estudio de la capa superior (5.1 micras). ....	49
<b>Figura 38.</b> Viento zonal de la zona de estudio para las diferentes órbitas. La primera fila representa la órbita 565. La segunda fila representa la órbita 567. La tercera fila representa la órbita 571. Los paneles de la izquierda representan el estudio de la capa inferior de las nubes (1.7 micras) y los paneles de la derecha representan el estudio de la capa superior (5.1micras).	50
<b>Figura 39.</b> Vorticidad de la zona de estudio para las diferentes órbitas. La primera fila representa la órbita 565. La segunda fila representa la órbita 567. La tercera fila representa la órbita 571. Los paneles de la izquierda representan el estudio de la capa inferior de las nubes (1.7 micras) y los paneles de la derecha representan el estudio de la capa superior (5.1 micras). ....	51



## Índice de Tablas

<b>Tabla 1.</b> Valores de selección en el software PLIA para el estudio de las diferentes capas de la nube de Venus.....	27
<b>Tabla 2.</b> Valores de contraste máximo y mínimo para cada imagen.....	27

## Capítulo 1

### Introducción

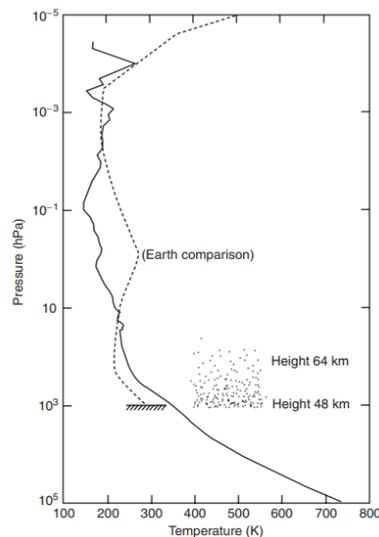
Este documento es el resumen de una investigación realizada por un alumno del Máster en Ciencia y Tecnología Espacial de la Escuela de Ingeniería de Bilbao. El objetivo de la investigación ha sido medir los vientos del vórtice atmosférico del polo sur de Venus utilizando distintas herramientas de programación.

### Venus

Para poner el trabajo en contexto es necesario definir las condiciones atmosféricas de Venus, pese a ser conocido como “el gemelo de la Tierra” debido a su similitud en tamaño y distancia al Sol, Venus cuenta con una atmósfera muy distinta a la de su planeta gemelo.

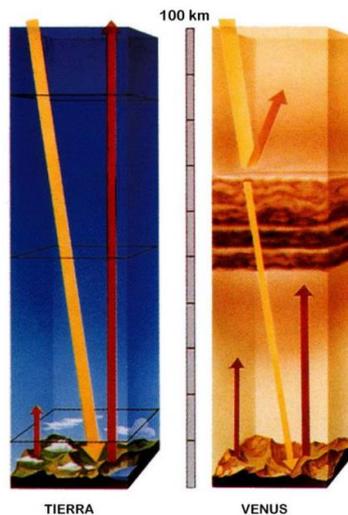
La gran densidad de la atmósfera de Venus la convierte ópticamente gruesa, lo que dificulta su estudio desde la Tierra o el espacio, y está compuesta por dióxido de carbono y nitrógeno molecular (96,5%  $CO_2$  + 3,5%  $N_2$ ) [2].

La superficie tiene una temperatura de 735 K (462 °C), tanto de día como de noche. Esto se debe al efecto invernadero desbordado por culpa de la gran densidad de su atmósfera. La atmósfera de Venus está dividida en dos regiones. Comparándola con la de la Tierra, en capas altas tiene un comportamiento isotérmico, sin contar el pico de temperatura producido en la Tierra por la absorción de la radiación solar ultravioleta por el ozono como se muestra en el perfil de temperaturas obtenido por las mediciones de la sonda Pioneer en la **fig. 1**.



**Figura 1.** Perfil de temperatura de la atmósfera de Venus. Los datos fueron obtenidos por la sonda Pioneer Venus [2].

En la zona inferior de la atmósfera la temperatura disminuye con la altura. En las capas altas el balance térmico se ha podido concluir que viene dado por la absorción de la luz solar, sin embargo, en las zonas bajas de la atmósfera todavía no se conoce bien [3]. Venus está completamente cubierta por una capa densa de nubes, esto hace que la gran parte de la luz solar recibida se refleje en las nubes, este efecto también provoca que gran parte de la radiación infrarroja quede atrapada dentro como se muestra en la **fig. 2**.



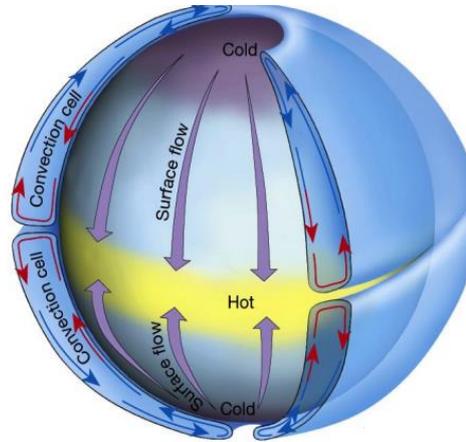
**Figura 2.** Efecto invernadero desbocado en Venus en comparación con la Tierra [6].

La atmósfera de Venus ha evolucionado de manera distinta que la de la Tierra a lo largo de los años: la proporción de D/H es 150 veces la de la Tierra [13]. Su proximidad al Sol ha hecho que absorba 1,9 veces más viento solar que la Tierra, lo que ha provocado que Venus perdiera toda su agua, prácticamente un océano global entero [5].

Las cantidades de carbono en la atmósfera de Venus son similares a las de la Tierra, sin embargo, en el planeta azul la gran mayoría se encuentra localizada en la corteza, en las rocas calizas y conchas marinas [7]. Esto se debe a que la presencia de agua líquida y las bajas temperaturas en comparación con Venus hacen que el dióxido de carbono se almacene en forma de carbonatos [2].

Venus rota de manera lenta con un periodo de 243 días y de forma contraria al resto de planetas del sistema solar. Sin embargo, Venus cuenta con una atmósfera superrotante con velocidades de viento zonales de más de 100 m/s y en la dirección de rotación del planeta [3]. Al rotar de manera lenta, las fuerzas de Coriolis son más débiles, lo cual hace que Venus cuente con dos únicas células Hadley, una por hemisferio. No obstante, la circulación de Hadley en Venus cuenta con grandes incógnitas, ya que el análisis del movimiento de las nubes no se ha podido concluir en la

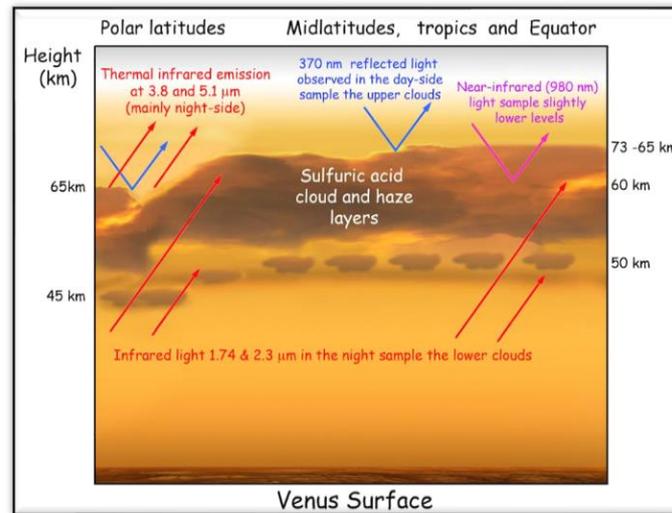
parte oscura de Venus [2]. Una de las incógnitas es la extensión final de la célula, si llega hasta el polo o si se corta antes, en latitudes subpolares.



**Figura 3.** Circulación atmosférica de Venus [6].

La capa de nubes de Venus dificulta el estudio sobre la circulación general del planeta. Dentro del mismo las condiciones son distintas a diferentes alturas, es por ello por lo que en este estudio se han analizado imágenes en distintas longitudes de ondas, que muestran diferentes alturas de la atmósfera de Venus, y así intentar comprender la dinámica de la cima de las nubes, es decir, el límite superior de las nubes, y la dinámica de las nubes más bajas. Aunque la radiación de 1.74 micras se genere por debajo de las nubes, las nubes bajas filtran esta radiación cuando pasa a través de las nubes; por lo que vemos en las imágenes son las nubes inferiores [9]. En este análisis tridimensional se trabajarán imágenes en el infrarrojo para trabajar sobre la parte nocturna del planeta, como se muestra en la **fig.4**;

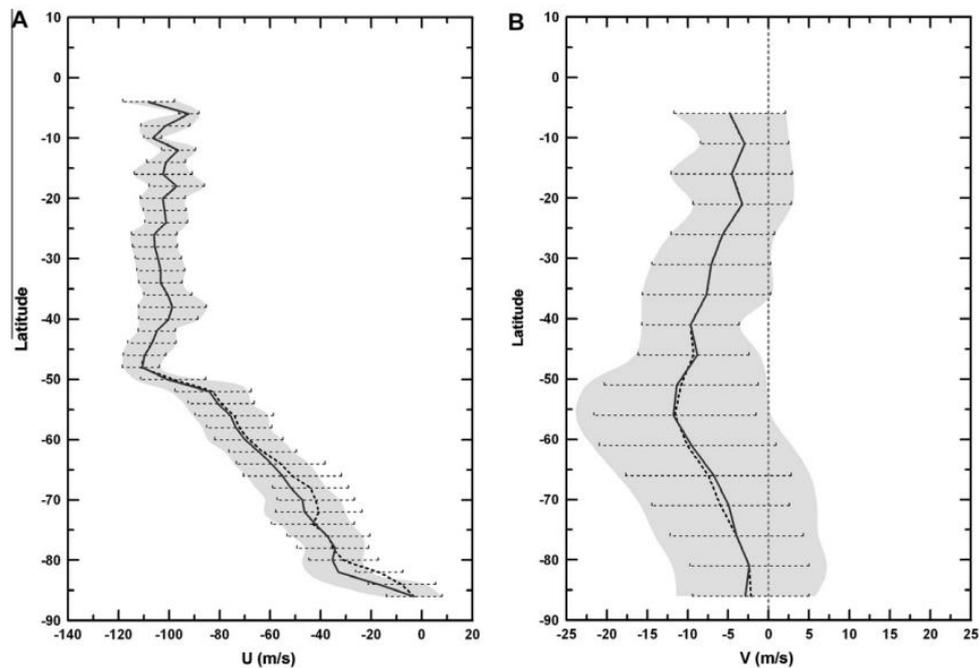
- 5.1 $\mu$ m: Emisión infrarroja de las nubes altas para el estudio de las nubes altas
- 1.7 $\mu$ m: Emisión infrarroja de la baja atmósfera, filtrada por las nubes bajas, para el estudio de las nubes bajas



**Figura 4.** Diferentes puntos de análisis en la nube de Venus en función de la longitud de onda.

#### Vórtice polar sur de Venus

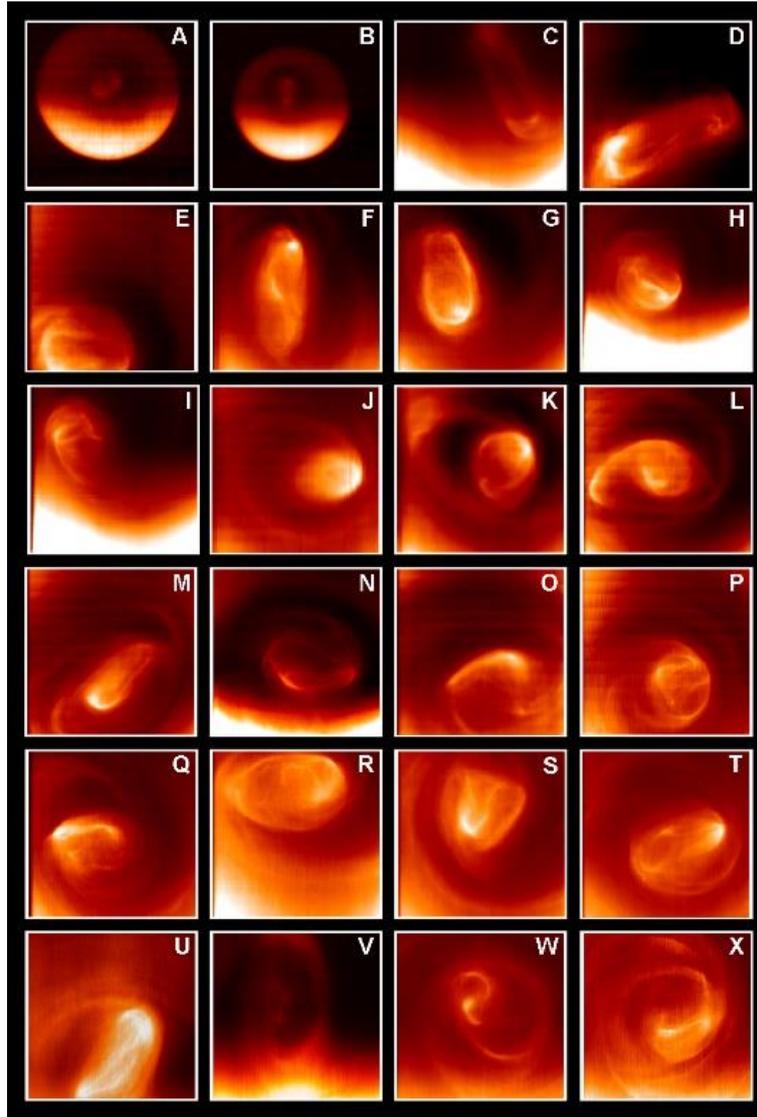
Se sabe que en la zona de las nubes de Venus a una altitud de entre 40 y 65 km el flujo está fuertemente dominado por un viento zonal en dirección este-oeste [3]. No obstante, como ya se ha mencionado anteriormente, pese a tratarse de un planeta que, rota lentamente, posee una atmósfera superrotante, la capa de las nubes llega a rotar 60 veces más rápido que el planeta [14]. Los vientos zonales pueden llegar a alcanzar velocidades superiores a los 100 m/s en las capas superiores de las nubes [3]. La **fig. 5** representa el perfil latitudinal de los vientos zonales y meridionales a una altura de entre 66-73 Km. En ella se aprecia como el flujo dominante se trata del viento zonal. También se ve como los vientos meridionales, a diferencia de los zonales no decrecen tan bruscamente de latitudes ecuatoriales hasta la zona del vórtice polar.



**Figura 5.** Perfiles de vientos zonales (izquierda) y meridionales (derecha) en la nube superior [3]. La línea continua muestra el valor promedio y las líneas discontinuas horizontales y la región sombreada la dispersión del promedio. El perfil discontinuo representa los datos obtenidos por [8].

Venus cuenta con dos grandes vórtices ubicados en sus polos, descubiertos gracias a la misión Pioneer Venus de la NASA [12] y confirmados por la misión Venus Express de la ESA [10]. Las observaciones mostraron un brillante vórtice con forma de dipolo rodeado por un flujo de aire frío que circula alrededor del vórtice. Según [10] el dipolo característico podría provenir del hundimiento de material de mayor densidad debajo de material de menor densidad.

El vórtice polar sur de Venus fue observado por el espectrómetro VIRTIS-M en el canal infrarrojo desde la inserción a la órbita de Venus en abril de 2006 hasta octubre de 2008. A partir de esa fecha, solo el canal visible del espectrómetro VIRTIS-M y el instrumento VMC (Venus Monitoring Camera) pudieron tomar imágenes [9]. Las primeras imágenes del vórtice sur de Venus obtenidas por VIRTIS indicaron que tenía un periodo de rotación de  $-2.48 \pm 0.05$  días; el periodo es negativo ya que el vórtice sigue la dirección de rotación de la atmósfera que es la misma que la del planeta, y distinta al resto de planetas del Sistema Solar [10]. Este valor indicó que el vórtice del polo sur rota más rápido que el del polo norte, el cual lo hace con un periodo de aproximadamente 3 días [10]. Cuenta con un tamaño de aproximadamente  $2,200 \times 1400 \text{ Km}^2$  orientada por el flujo zonal y cuya estructura esta continuamente destruyéndose y recuperándose [9].



**Figura 6.** Imágenes del vórtice polar sur obtenidas por el instrumento VIRTIS.

La dinámica del vórtice de Venus cuenta con numerosas incógnitas, no obstante, su observación y su análisis poco a poco empiezan a dar frutos y se empieza a comprender su naturaleza. Las atmósferas cuentan con fenómenos muy distintos en los distintos planetas del sistema solar, pero su estudio nos permite conocer más nuestra propia atmósfera. Venus y la Tierra en épocas pasadas contaban con atmósferas muy similares, sin embargo, la evolución de ambas tomo rumbos distintos. Los estudios científicos dan a entender que Venus ha perdido gran parte del agua debido al impacto del plasma solar [5]. Cuanto más sepamos de la atmósfera de Venus, más sabremos sobre COMO puede evolucionar nuestra atmósfera, dándonos ventaja para poder actuar ante cualquier anomalía.

### **VIRTIS**

El espectrómetro VIRTIS (*Visible and InfraRed Thermal Imaging Spectrometer*) se diseñó para la misión Rosetta de la Agencia Espacial Europea. Los descubrimientos de los vórtices en la

misión Pioneer Venus abrieron una nueva ventana de estudio, la observación en el infrarrojo de la superficie Venusiana. La misión Venus Express contaba con una gran capacidad de mapeo a diferentes resoluciones espectrales, por ejemplo, VIRTIS-M para resoluciones espectrales bajas y VIRTIS-H para resoluciones espectrales altas. Para este trabajo se usaron imágenes de baja resolución espectral en el infrarrojo (VIRTIS-M infrared) [11].

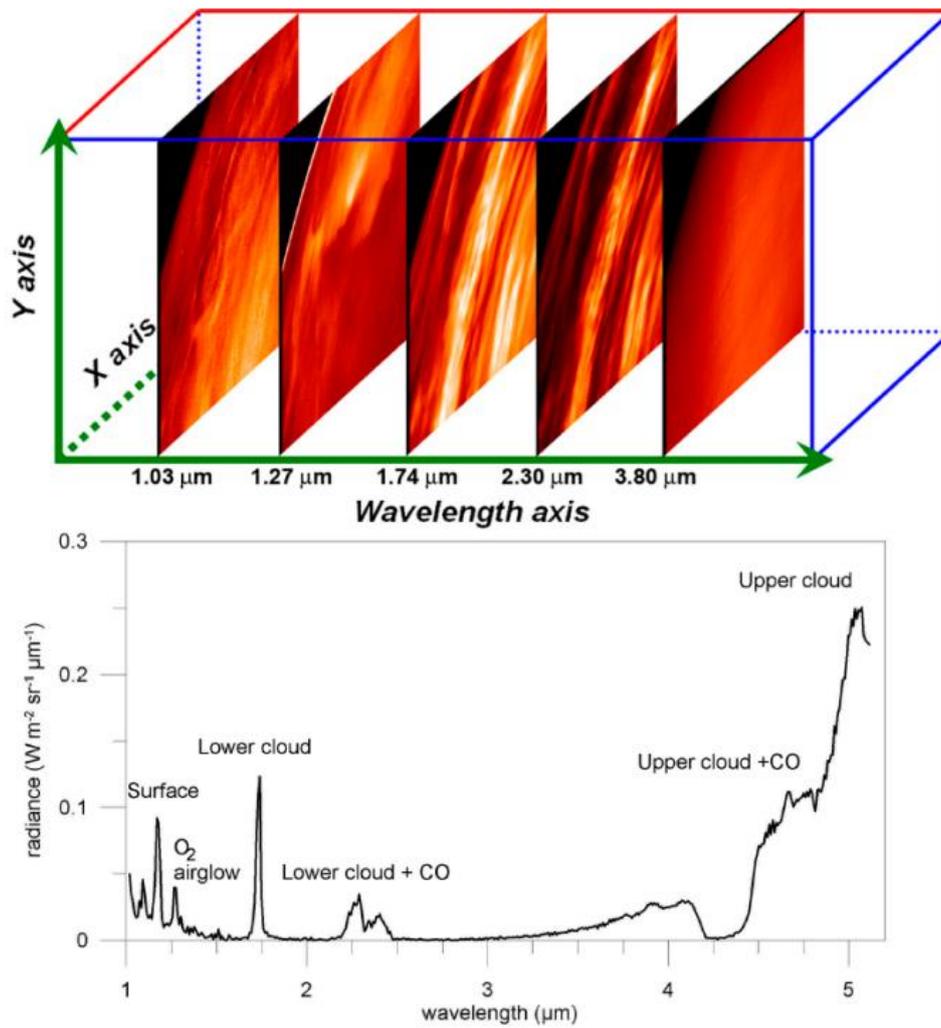
Table 1. VIRTIS principal characteristics.			
	VIRTIS-M Visible	VIRTIS-M Infrared	VIRTIS-H
Spectral range (nm)	280 – 1100	1050 – 5130	1840 – 4990
Spectral resolution $\lambda/\Delta\lambda$	150 – 500	100 – 500	1300 – 3000
Spectral sampling (nm) [note 1]	1.89	9.47	0.6
Field of view (mrad x mrad)	64 (slit) x 64 (scan)		0.44 x 1.34
Max spatial resolution ( $\mu$ rad)	250 (slit) x 250 (scan)		–
Image size, full FOV high resolution (pixels)	256 x 256		–
noise equivalent spectral radiance (central band, $Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$ )	$1.4 \times 10^{-2}$	$1.2 \times 10^{-4}$	$1.2 \times 10^{-4}$
Telescope	Shafer Telescope	Shafer Telescope	off-axis parabolic mirror
Pupil diameter (mm)	47.5		32
Imaging F#	5.6	3.2	2.04
Etendue ( $m^2 sr$ )	$4.6 \times 10^{-11}$	$7.5 \times 10^{-11}$	$0.8 \times 10^{-9}$
Slit dimension (mm)	0.038 x 9.53		0.029 x 0.089
Spectrometer	Offner Relay	Offner Relay	Echelle spectrometer
Detectors	Thomson TH7896 CCD	HgCdTe [note 2]	HgCdTe [note 2]
Sensitivity area format	508 x 1024	270 x 436	270 x 436
Pixel pitch (mm)	19	38	38
Operating temperature (K)	150 – 190	65 – 90	65 – 90
Spectral range ( $\mu m$ )	0.25 – 1.05	0.95 – 5.0	0.95 – 5.0
Mean dark current	< 1 e/s	< 2 fA @ 90K	< 2 fA @ 90K

Notes. 1: depends on selected mode of operation; the maximum value is shown. 2: VIRTIS-M and VIRTIS-H use identical IR detectors.

**Figura 7.** Principales características del instrumento VIRTIS [11].

VIRTIS-M es el espectrómetro de mapeo de VIRTIS. Cuenta con la cabeza óptica M, dicha cabeza está constituida por un telescopio y un espectrómetro que se combinan en el visible y en el infrarrojo y que están alineados en un mismo eje óptico [11].

Las imágenes espectrales aportan información de una misma zona espacial en diferentes longitudes de onda, es por eso, que para el estudio de la dinámica del vórtice en la capa alta o baja de las nubes, estas imágenes son de muy alto valor. Con un simple cubo espectral se puede obtener información de distintas capas de la nube. Los cubos de datos que se obtienen mediante VIRTIS-M, se compilan como imágenes monocromáticas en 2-D, en las direcciones espaciales X-Y. El tercer eje formado por la compilación es el eje espectral, que abarca el rango de entre 0.25 y  $5\mu m$  [11].



**Figura 8.** Espectro infrarrojo de la atmósfera de Venus, que muestra algunas ventanas de visualización de las diferentes capas de nubes[15].



## Capítulo 2

### Metodología

Como ya se ha mencionado anteriormente en la introducción de este trabajo, el estudio de Venus, a diferencia de otros planetas del sistema solar, se ve limitado hoy en día por las condiciones atmosféricas a las que se encuentra el planeta, que impiden un estudio in situ. Es por eso que a día de hoy una de las formas que se tiene de estudiar el planeta es mediante datos de imagen [4].

Para analizar y caracterizar la atmósfera de un planeta utilizando datos de imagen es necesario hacer un procesado previo de las imágenes para maximizar la utilidad de los datos, entre los distintos procesados se pueden encontrar tareas como, por ejemplo:

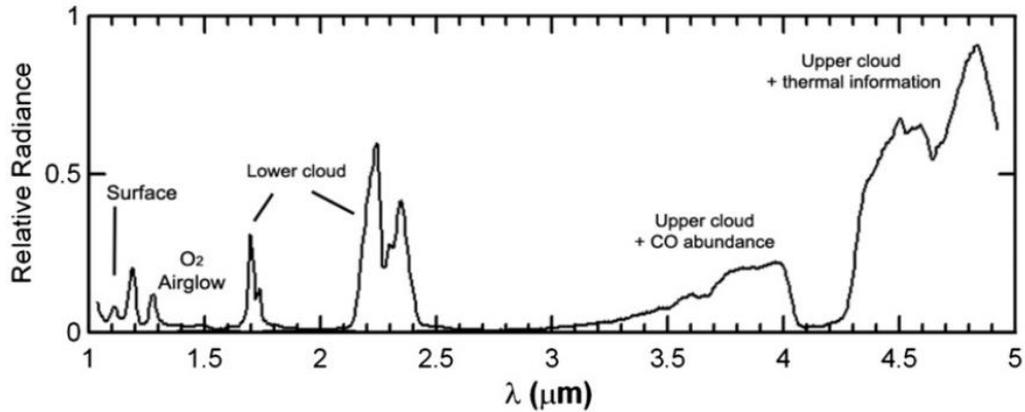
- Ajuste del contraste de la imagen
- Corrección del oscurecimiento al limbo
- Composición de imágenes en distintas longitudes de onda

En este estudio se ha utilizado el paquete de software PLIA desarrollado por algunos profesores del Máster en Ciencia y Tecnología Espacial de la Escuela de Ingeniería de Bilbao de la Universidad del País Vasco (EHU/UPV), para procesar las imágenes y para el análisis tridimensional de la región polar sur de Venus.

#### PLIA

PLIA (Planetary Laboratory Image Processing) es un conjunto de programas escritos en IDL (Interactive Data Language), un lenguaje de programación de alto nivel capaz de desarrollar interfaces gráficas. Para este proyecto en concreto se ha utilizado PLIA para el sistema operativo Windows, no obstante, funciona en cualquier sistema operativo que soporte IDL (Windows, MacOS o Linux).

En este trabajo se analizarán imágenes obtenidas por el espectrómetro de imagen VIRTIS (Visible and Infrared Thermal Imaging Spectrometer) en la misión Venus Express. El instrumento VIRTIS trabaja en el espectro visible y en el infrarrojo, como se mencionó anteriormente, pero para este proyecto se han utilizado dos longitudes de onda concretas en el espectro infrarrojo para analizar los vientos del vórtice en las nubes altas (5.1  $\mu\text{m}$ ) y bajas (1.7  $\mu\text{m}$ ). La **fig. 5** muestra las ventanas de observación más características de la atmósfera de Venus en el infrarrojo [4].

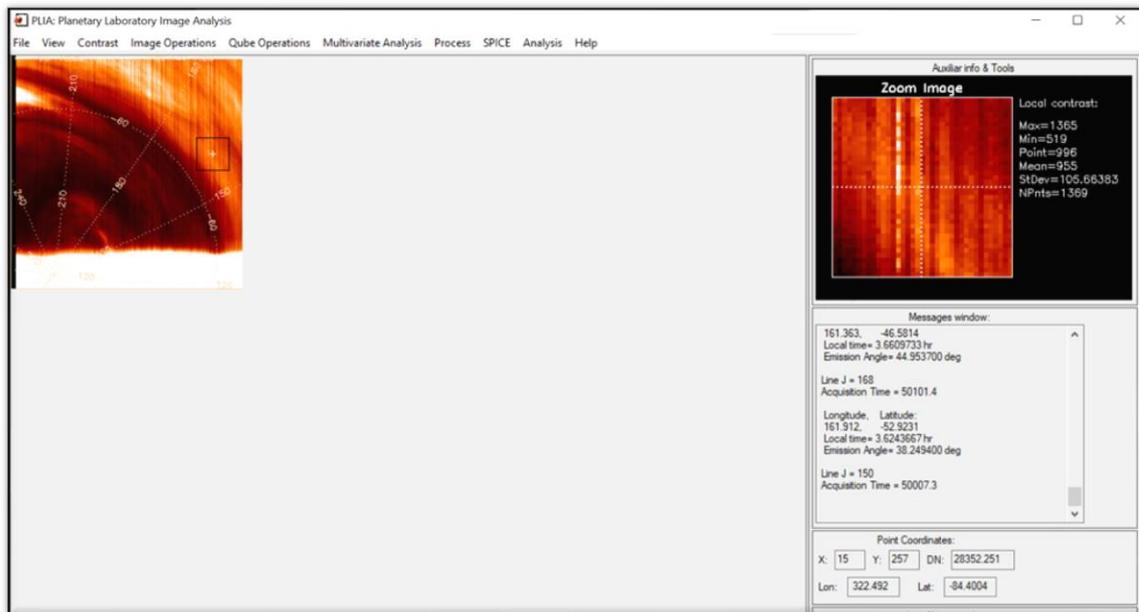


**Figura 9.** Espectro infrarrojo de Venus a partir de las observaciones con el instrumento VIRTIS mostrando ventanas de observación características en la atmósfera de Venus.

En este proyecto el software PLIA ha sido utilizado para el pre-procesado y proyección de las imágenes que muestran una zona concreta del planeta, el polo sur. PLIA cuenta con una extensión, llamada PICV3, la cual se ejecuta desde IDL, para la medida de la velocidad del viento. Para esta técnica que se basa en el seguimiento de las nubes se selecciona un área de estudio y otro de muestreo y píxel por píxel analiza el movimiento de las nubes, se puede hacer de manera automática indicando el valor máximo de la función de correlación que se quiere aceptar o de manera manual, validando cada una de las medidas.

Una vez acabado el muestreo se mostrarán las direcciones de los vectores de viento, así como su módulo. Los intervalos de tiempo deben de definirse antes, después de tratar las imágenes en PLIA.

La interfaz de PLIA cuenta con una variedad de secciones como se muestra en la **fig. 10**. Se puede ver COMO una vez importada la imagen dentro del programa a la derecha hay una sección que proporciona una imagen más ampliada de la región seleccionada (cuadrado negro) dentro de la imagen principal. En ella se aprecian datos como los valores máximos y mínimos de contraste o el número de píxeles del zoom. Debajo del apartado de zoom se especifica información extraída de la cabecera de la imagen o de los datos previamente especificados que vienen con la imagen.



**Figura 10.** Interfaz del software PLIA.

Dentro de la sección *Contrast*, en la barra superior de la interfaz se pueden seleccionar los valores máximos y mínimos de contraste en función de la imagen que se haya seleccionado para contrastar bien la imagen que se quiere estudiar. Esta herramienta es bastante útil ya que, para este trabajo al tratarse de imágenes espectrales en varias longitudes de onda, estos valores de luminosidad varían dentro del rango espectral que se estudia.

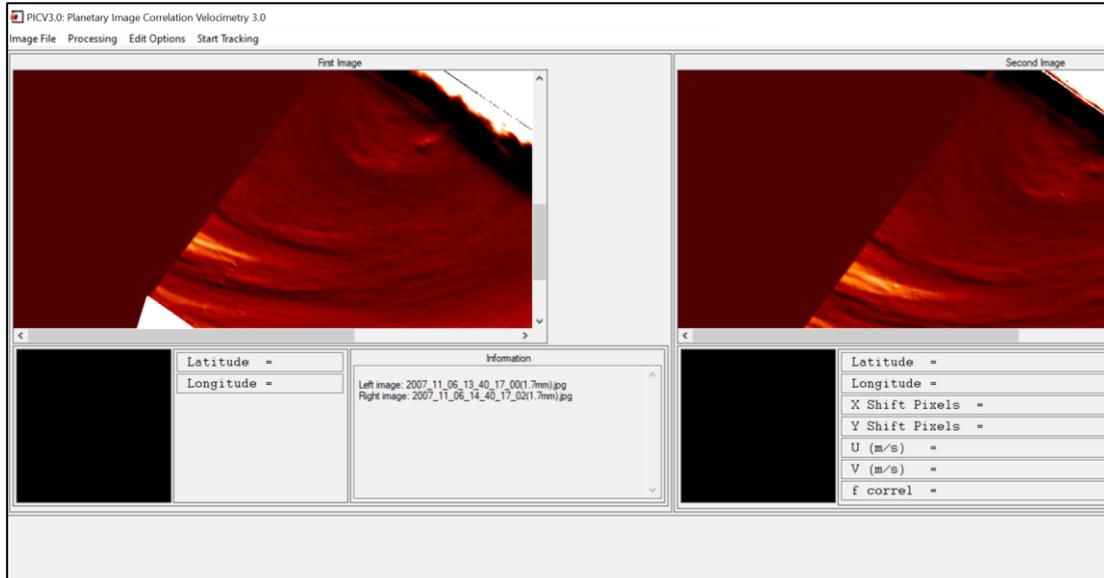
Por otro lado, en la misma barra de la interfaz se encuentra el apartado *Qube operations*. En este apartado se van a poder realizar varias operaciones sobre la imagen. Para este proyecto se han utilizado los distintos filtros que se pueden aplicar dependiendo de la altitud que se quiera estudiar en las nubes de Venus (parte alta de las nubes o parte baja). También se ha utilizado para seleccionar distintas longitudes de onda para una misma imagen.

El último paso del procesado de la imagen es realizar la proyección polar de la imagen dentro del apartado *Analysis*. La proyección es polar debido a que el polo sur es la región de estudio, dicha proyección es la misma para todas las imágenes, de  $0.1^\circ/\text{píxel}$ , hasta los  $45^\circ$  de latitud en el hemisferio sur.

### PICV3

Una vez el tratamiento de las imágenes a estudiar ha concluido y las imágenes se han guardado de manera correcta, se procede a abrir la extensión PICV3 para la medida de los vientos, la **fig. 11** muestra como se ve la interfaz de PICV3.

Una vez insertadas las imágenes, se definen las condiciones para comenzar con el análisis en el apartado *Edit Options*. Una vez definidas, se selecciona en la propia imagen la región a estudiar y se comienza el seguimiento pulsando en la sección *Start Tracking*.



**Figura 11.** Interfaz de la extensión de PLIA para en análisis de los vientos PICV3.

## Metodología del análisis

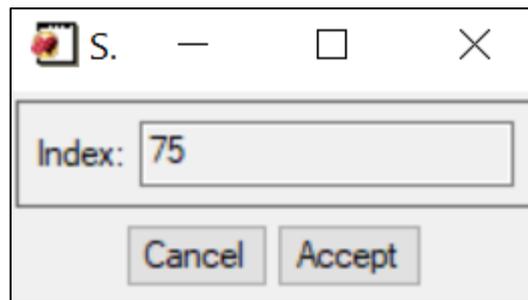
Antes de comenzar con la primera parte del análisis, el tratamiento de las imágenes en PLIA, es importante seleccionar cuales van a ser las imágenes para estudiar, para ello se requiere una selección previa. Las imágenes se obtuvieron de la página web del Planetary Science Archive (<http://www.rssd.esa.int/PSA>). Se obtuvieron imágenes de tres órbitas distintas (órbitas 565, 567 y 571). Debido a que la nave Venus Express tardaba 24 horas en completar una órbita alrededor del planeta, cada órbita representa un día distinto. Para cada órbita se seleccionó una pareja de dos imágenes en dos longitudes de onda distintas para la parte superior e inferior de las nubes.

Los archivos de imágenes vienen distinguidos por órbitas, cada órbita tiene tres tipos de archivos distintos;

- Calibrated
- Geometry
- Raw

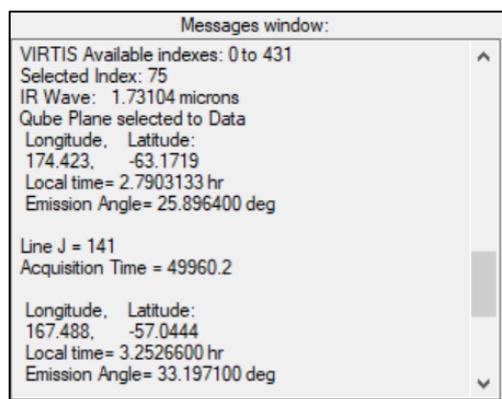
Una vez ejecutado el software PLIA desde IDL lo primero que hay que hacer es seleccionar la imagen para su consiguiente tratado, para ello en la barra superior se selecciona la sección *File>Open>Venus Express>Calibrated VIRTIS* y se selecciona una imagen dentro del archivo de *Calibrated (.CAD)*.

Una vez tengamos la imagen en la interfaz, se selecciona la longitud de onda en la que se quiere trabajar. Para ello en la barra superior se selecciona el apartado *Qube Operations>Select Data Plane*; se abrirá un panel como el que se muestra en la **fig. 8**.



**Figura 12.** Panel de selección de longitud de onda de las imágenes obtenidas por VIRTIS en el software PLIA.

Para comprobar si la longitud de onda seleccionada es la correcta, una vez indicado el valor en el index, en el panel que aparece en la sección de abajo a la derecha de la interfaz de PLIA, se muestra información adicional de la imagen, en el que se encuentra el valor de la longitud de onda como se muestra a continuación en la **fig. 13**.



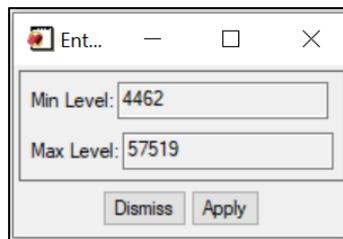
**Figura 13.** Ventana de información de la imagen seleccionada

Los valores de índice seleccionados en este proyecto son las correspondientes a dos ventanas de observación en el espectro infrarrojo y que permiten estudiar las nubes altas y las nubes bajas, tal y como muestra la siguiente tabla:

Índex	Longitud de onda ( $\mu\text{m}$ )	Zona de estudio
75	1.73	Nube superior
431	5.11	Nube inferior

**Tabla 1.** Valores de selección en el software PLIA para el estudio de las diferentes capas de la nube de Venus.

Después de haber seleccionado la longitud de onda se procede a contrastar la imagen de la mejor manera posible, cuanto más contrastada sea la imagen, mejor van a ser los resultados en el análisis de los vientos. El contraste se modifica en la sección *Contrast>Specify Visualization Levels*, se abrirá un panel como el que se muestra en la **fig. 14**.



**Figura 14.** Panel de la selección de los valores máximos y mínimos de contraste.

Cada imagen tiene unos valores distintos de contraste, incluso dentro de las mismas longitudes de onda. Para cada imagen los valores máximos y mínimos de contraste han sido:

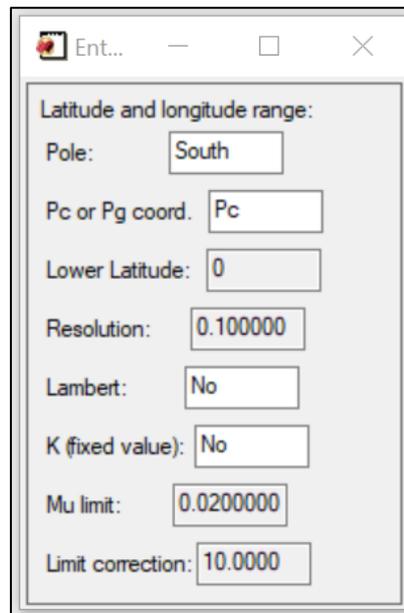
Imagen	Longitud de onda ( $\mu\text{m}$ )	Max	Min
VI0565_00	1.7	1500	-150
VI0565_00	5.1	5700	500
VI0565_02	1.7	1500	-150
VI0565_02	5.1	5700	500
VI0567_00	1.7	1400	-400
VI0567_01	5.1	1500	300
VI0567_02	1.7	1400	-400
VI0567_03	5.1	1500	300
VI0571_01	1.7	1400	-400
VI0571_01	5.1	2100	300
VI0571_03	1.7	1400	-400
VI0571_03	5.1	2100	300

**Tabla 2.** Valores de contraste máximo y mínimo para cada imagen.

Después de realizar el ajuste de contraste de la imagen, se le aplica un filtro dependiendo de la longitud de onda con la que se esté trabajando. Para ello, en la misma sección de la selección de

longitud de onda se pulsa en Qube *Operations>VIRTIS Low Cloud Filtering* o en Qube *Operations>VIRTIS Upper Cloud Night (5.0mm) Filtering*. Para las imágenes en longitudes de 1.7 mm se usa el filtro *VIRTIS Low Cloud Filtering*, mientras que para las imágenes de 5.1 mm se usa el filtro *VIRTIS Upper Cloud Night (5.0mm) Filtering*.

Una vez aplicado el ajuste de contraste y el filtro a la imagen a estudiar, se procede a realizar la proyección polar, para ello es importante entrar en el archivo de las imágenes *Geometry* y pasar el .GEO que contiene las coordenadas de las imágenes a la carpeta donde está el archivo *Calibrated*. Una vez estén todos los archivos en orden para realizar la proyección polar, se selecciona; *Analysis>Geometrical Projections>Polar Projection*. Se abrirá un menú como se muestra en la **fig. 15**. Como el estudio va a realizarse sobre el vórtice polar sur de Venus no hace falta estudiar todas las latitudes por lo que se acotará el rango y se definirá en el apartado *Lower latitude* de la **fig. 15** a 45°.



**Figura 15.** Menú para definir las condiciones para la proyección polar de la imagen a estudiar en el software PLIA.

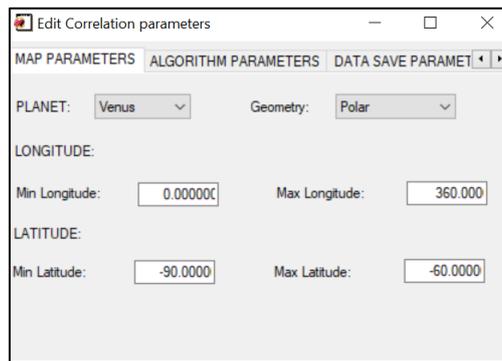
Antes de concluir con el tratado de la imagen, las imágenes que se hayan procesado deben de guardarse con un nombre específico. Esto se debe a que la extensión PICV3 cuando abre una imagen lee los intervalos de tiempos del título de la imagen que abre, por lo que la imagen procesada debe guardarse con el siguiente nombre;

$2022\_XX_{Mes}\_XX_{Dia}\_XX_{Hora}\_XX_{Min}\_XX_{Seg}\_Nombre$

Una vez la imagen ha sido tratada y guardada correctamente, desde IDL se ejecuta la extensión PICV3. Una vez aparezca la interfaz de PICV3 hay que abrir la pareja de imágenes que se quiera

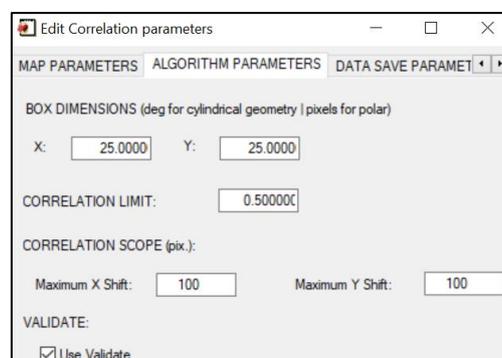
estudiar, para ello en la barra superior de la interfaz se selecciona *Image File>Open Images>Left Image* o *Image File>Open Images>Right Image*. No importa qué imagen seleccionar primero.

A continuación, se definen los parámetros para comenzar con la medida de los vientos, pero antes se deben definir las condiciones, en la sección *Edit Options* se abrirá un panel como el que se muestra en la **fig. 16**.



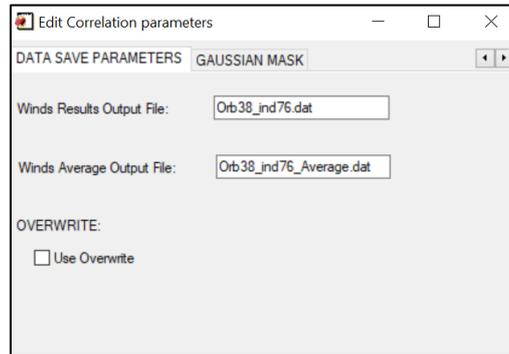
**Figura 16.** Panel de la sección de *Edit Options>Map Parameters* de la extensión PICV3 del software PLIA.

El menú desplegado cuenta con varias pestañas: en la primera, *Map Parameters*, se definirá como en la sección de la proyección polar, una latitud máxima de 45°. En la siguiente pestaña, *Algorithm Parameters*, se definen las dimensiones del cuadrado que va a realizar el muestreo, cuanto más pequeño sea menos pixeles va a abarcar, por lo que dependiendo de qué zonas se van a estudiar es conveniente modificar este parámetro. Para cada pareja de imágenes se han realizado dos mediciones, una en el centro del vórtice y otra en las zonas alejadas del vórtice. Para las zonas más próximas, las dimensiones del cuadrado eran más pequeñas ya que había zonas más turbulentas y era importante tener un análisis más preciso. Sin embargo, en las zonas más alejadas, el movimiento del vórtice seguía un movimiento menos caótico por lo que se podía agrandar el cuadrado de muestreo.



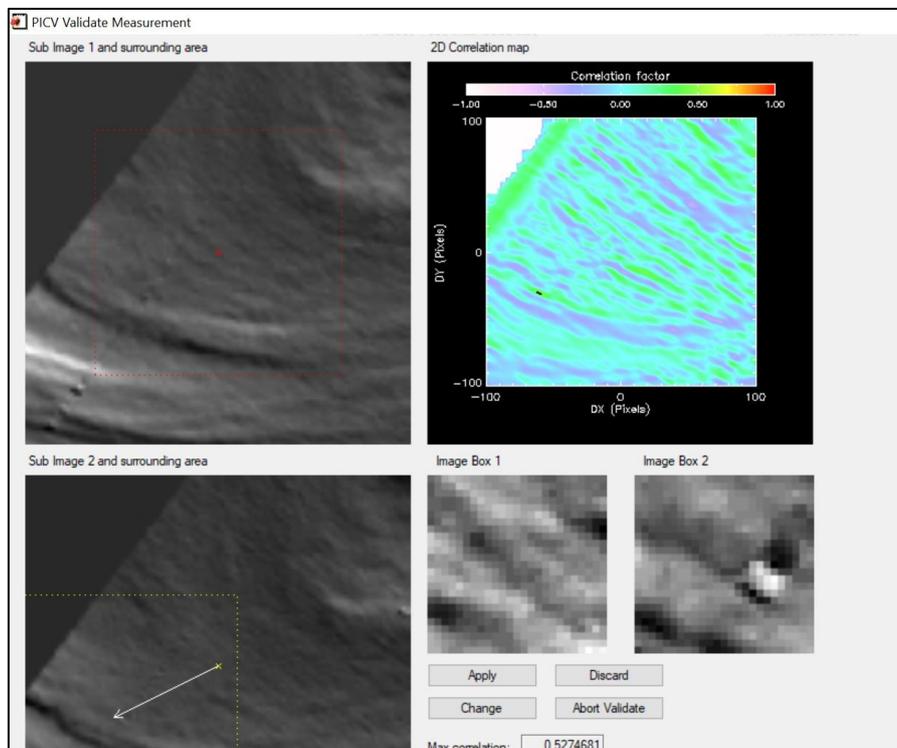
**Figura 17.** Panel de la sección de *Edit Options>Algorithm Parameters* de la extensión PICV3 del software PLIA.

Una vez definidas las condiciones, en la última pestaña del panel se renombran los ficheros que se van a guardar con los valores de los vectores de viento. La **fig. 18** muestra la sección Data Save Parameters en el que se pueden definir dos nombres distintos para dos archivos, uno son los datos obtenidos y el otro hace una media de los datos, para este proyecto solamente se ha utilizado el *Wind Results Output File*.



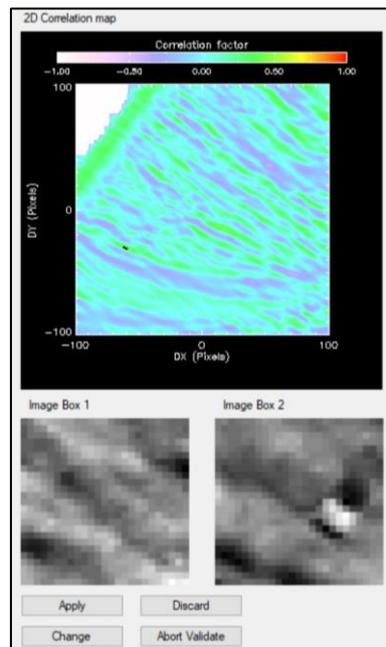
**Figura 18.** Panel de la sección de Edit Options>Data Save Parameters de la extensión PICV3 del software PLIA.

Para finalizar con el uso de PICV3 para el análisis de los vientos, se realiza el seguimiento en la última pestaña de la barra superior de la interfaz: *Start Tracking>Simple 2D Correlation*. Se abrirá una ventana como la que se muestra en la **fig. 19**.



**Figura 19.** Panel de seguimiento del análisis de los vientos en la extensión PICV3.

Para conseguir unos resultados óptimos es necesario que el seguimiento se realice de manera manual, de esta manera la persona que analice los vientos debe validar cada vector. Para ello en el panel de seguimiento de la **fig. 19** se muestran diferentes ventanas. La ventana de la parte superior derecha muestra un mapa de correlación entre las dos imágenes que se están estudiando, el tamaño de esa ventana es el que se ha definido en la sección *Edit Options>Algorithm Parameters*. Este mapa de correlación viene justificado en la parte inferior por dos imágenes, estas dos imágenes son sobre las que se realiza la correlación, por lo que podemos contrastar si se asemejan o no.



**Figura 20.** Figura 20. Mapa de correlación junto a las imágenes muestreadas del panel de seguimiento del análisis de los vientos en la extensión PICV3.

Por último, en la sección inferior de izquierda del panel de seguimiento se muestra la dirección del vector en la imagen real, sabiendo que el vórtice rota en la dirección de la atmósfera es fácil validar los vectores. Sin embargo, al tratarse de un régimen turbulento en algunas regiones, si algún vector se escapa del movimiento lógico del vórtice, pero tiene buena correlación es importante seleccionarlo, ya que más adelante se hará una limpieza de las medidas comparándolas con resultados obtenidos por otros autores.

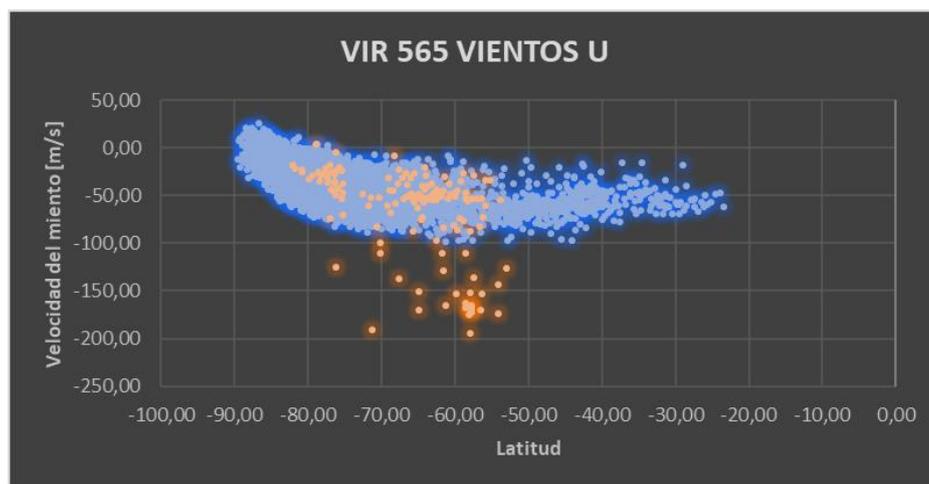
Una vez realizado el seguimiento de todas las órbitas para las dos longitudes de onda y para la zona central del vórtice y zonas más alejadas, se obtendrá un archivo de texto con distintos valores para distintas longitudes y latitudes como se muestra en la siguiente figura.

	Pc_Latitude	Pg_Latitude	Longitude	u	v	correl
1						
2	-60.23055	-60.23055	215.49001	-80.32684	-11.80475	0.86158
3	-60.86394	-60.86394	213.09000	-53.53312	0.75257	0.79029
4	-62.22270	-62.22270	207.86000	-30.60767	10.49664	0.68956
5	-65.60438	-65.60438	192.48000	-146.83344	-35.24758	0.72860
6	-65.76164	-65.76164	182.11000	-74.98278	-10.56219	0.83705
7	-65.75254	-65.75254	178.59000	-69.92028	-9.47676	0.85250
8	-64.82672	-64.82672	164.86000	-89.89485	-6.13842	0.54945
9	-61.50501	-61.50501	217.23000	-82.65544	-15.73827	0.69720
10	-67.23718	-67.23718	185.98000	-71.51206	-15.56209	0.82256
11	-67.26275	-67.26275	182.25000	-72.35858	-10.69263	0.87441
12	-67.24607	-67.24607	178.50000	-70.22144	-9.12210	0.86502
13	-67.09264	-67.09264	174.75999	-50.13198	-5.25809	0.82461
14	-66.95938	-66.95938	171.07001	-72.54178	-8.33345	0.79327
15	-68.38042	-68.38042	194.16000	-104.32382	-26.73952	0.82355
16	-67.62267	-67.62267	162.86000	-24.65900	-1.02623	0.78957
17	-64.73878	-64.73878	221.17000	-149.63504	-69.51655	0.63856
18	-65.49925	-65.49925	218.62000	-132.13000	-57.55463	0.70280
19	-65.34838	-65.34838	215.89000	-27.98502	5.21661	0.76372
20	-66.17150	-66.17150	212.95000	-27.74296	6.70248	0.87686
21	-69.84894	-69.84894	195.17999	-101.41229	-27.76916	0.89296
22	-69.99538	-69.99538	191.09000	-80.00144	-16.23394	0.89910
23	-69.83332	-69.83332	186.88000	-15.35795	7.25831	0.90925
24	-69.96151	-69.96151	169.75000	-127.57792	-10.93498	0.75090
25	-69.04183	-69.04183	161.64999	-24.75340	-0.45947	0.64200
26	-64.44435	-64.44435	223.39999	-49.94491	13.71065	0.89311
27	-67.80237	-67.80237	215.03000	-75.17554	-16.23196	0.95068
28	-72.72637	-72.72637	191.97000	-140.55430	-90.97515	0.88976
29	-71.83241	-71.83241	178.13000	-83.76040	-14.35254	0.91583

**Figura 21.** Ejemplo del archivo de texto con los resultados del seguimiento realizado en la extensión PICV3.

Estos valores se transfieren a un programa de cálculo para poder realizar diferentes acciones sobre los datos, en este caso se ha utilizado Excel.

Una vez transferido los datos a Excel se comparan todos los datos obtenidos con las medidas realizadas previamente por miembros del Grupo de Ciencias Planetarias. Al tratarse de un seguimiento manual, algunos vectores están mal, es por eso por lo que hay que contrastar la nube de puntos obtenida en este trabajo con resultados publicados. La siguiente gráfica muestra un ejemplo de dicha comparación, pero los resultados obtenidos serán descritos e interpretados en detalle en el siguiente capítulo.



**Figura 22.** Velocidad del viento zonal para la nube inferior en la órbita 565. Los puntos naranjas representan las medidas de viento realizadas en este proyecto. Los puntos azules las medidas previas realizadas por [16].

Los puntos que aparecen fuera de la nube se seleccionan y se eliminan del archivo de notas, para finalmente ejecutar las extensiones que van a proporcionar los distintos mapas con información sobre la dinámica del vórtice polar sur de Venus.

### Cálculo de errores

Para calcular la velocidad de los vientos con el software PICV3 mediante el uso de imágenes espaciales, se estudia el desplazamiento de las nubes entre imágenes, entendiendo que las nubes se mueven a través del flujo de viento con su misma velocidad. Este análisis trae consigo un error ligado a la resolución de las imágenes. De esta manera los vientos se calculan de la siguiente forma [9].

$$u = (R + H) \cos \phi \frac{\Delta \lambda}{\Delta t} \frac{\pi}{180}; \quad v = (R + H) \frac{\Delta \phi}{\Delta t} \frac{\pi}{180}$$

En donde  $\Delta \lambda$  y  $\Delta \phi$  son los desplazamientos de la nube medidos en grados de longitud y latitud, respectivamente.  $\Delta t$  es el intervalo de tiempo entre la primera imagen y la segunda.  $R$  es el radio de Venus y  $H$  la altitud asociada al nivel de observación [9]. Los datos se pueden reescribir de la siguiente manera.

$$u = \frac{\Delta X}{\Delta t}; \quad v = \frac{\Delta Y}{\Delta t}$$

Donde  $\Delta X$  y  $\Delta Y$  son los desplazamientos horizontal y vertical de las nubes, respectivamente, en el plano de la imagen, de las nubes en metros. El error asociado a la resolución espacial de las imágenes originales se puede escribir de la siguiente manera.

$$\delta u \approx \frac{\delta(\Delta X)}{\Delta t}; \quad \delta v \approx \frac{\delta(\Delta Y)}{\Delta t}$$

En donde  $\delta(\Delta X)$  y  $\delta(\Delta Y)$  son las incertidumbres espaciales. La incertidumbre temporal se puede despreciar ya que las imágenes obtenidas por VIRTIS-M cuentan con una precisión de milésimas de segundos [9]. Sabiendo que la resolución de la imagen es de 16 km/píxel, que el error de navegación es de unos 2.3 km y que todas las imágenes tienen 1h de diferencia entre sí, el error cometido en la medición de los vientos es de unos  $4 \text{ ms}^{-1}$ .



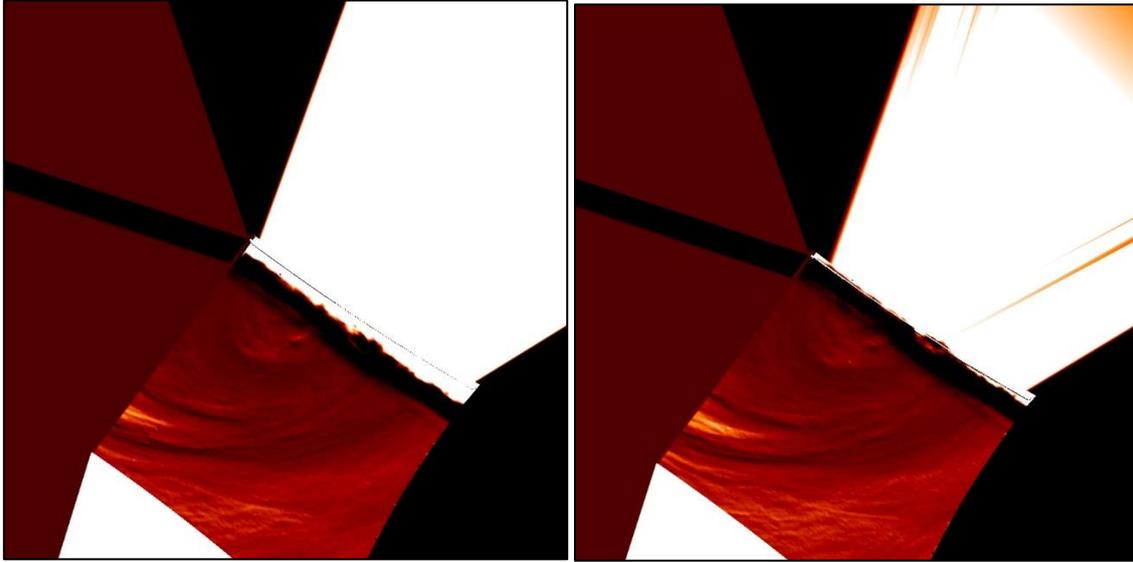
## Capítulo 3

### Resultados

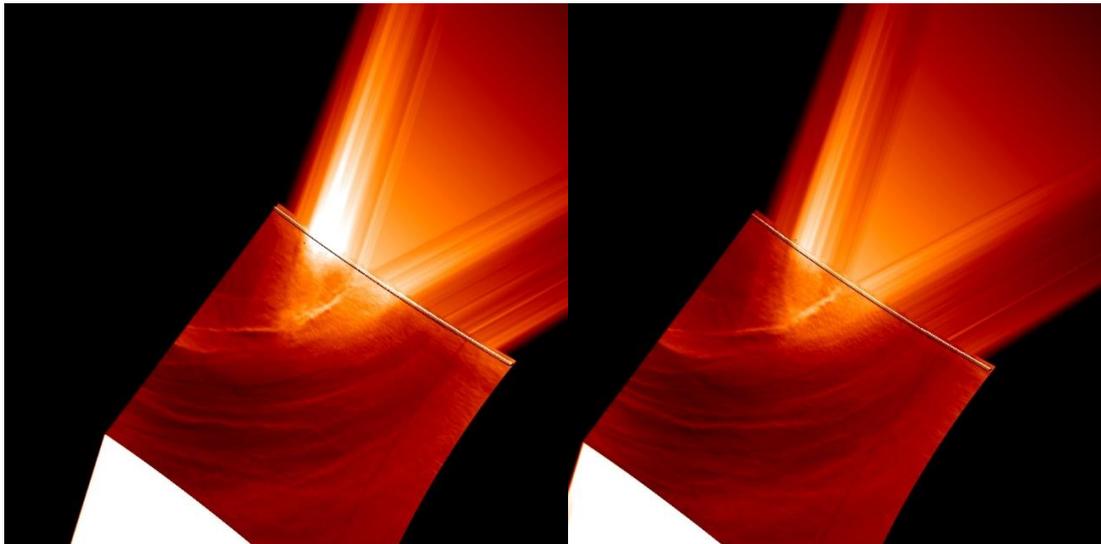
En este capítulo se mostrarán todos los resultados obtenidos durante el proceso, desde el tratado de las imágenes, hasta los perfiles de viento de las distintas órbitas. Algunos resultados se contrastarán con los datos de [15] y [16]. Para facilitar la comprensión se mostrarán y explicarán los resultados siguiendo el índice de la metodología.

### Tratado de imágenes

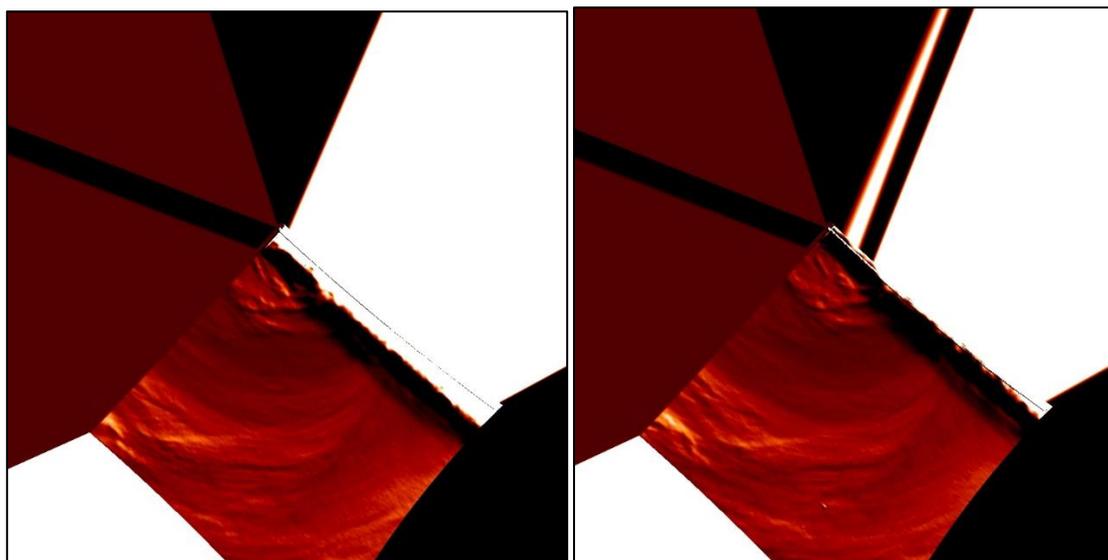
Como ya se mencionó en la metodología, el primer paso es tratar las imágenes para sacar la mayor cantidad de información científica posible. Para ello, desde el software PLIA y aplicando los contrastes de brillo de la **tabla. 2** a las imágenes que se mencionan en la misma tabla, se obtuvieron las siguientes proyecciones polares del vórtice polar sur de Venus. Todas las parejas tienen aproximadamente una hora de diferencia entre la primera imagen y la segunda, ya que este intervalo de tiempo es lo suficientemente corto para poder identificar estructuras en ambas imágenes, y lo suficientemente largo para que el error cometido en las medidas sea aceptable.



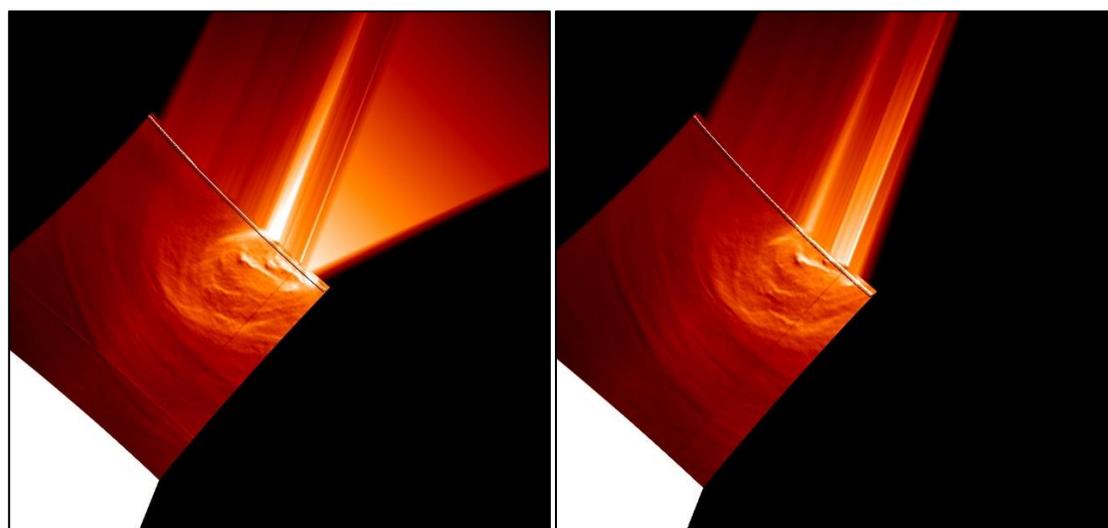
**Figura 23.** Imágenes obtenidas por VIRTIS en 1.7 micras de la órbita 565 de Venus Express procesadas con el software PLIA.



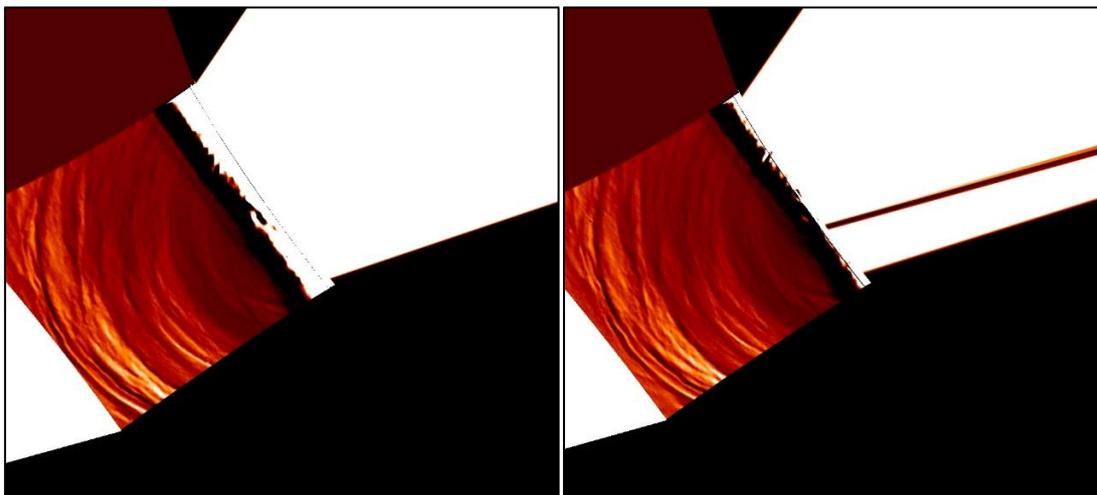
**Figura 24.** Imágenes obtenidas por VIRTIS en 5.1 micras de la órbita 565 de Venus Express procesadas con el software PLIA.



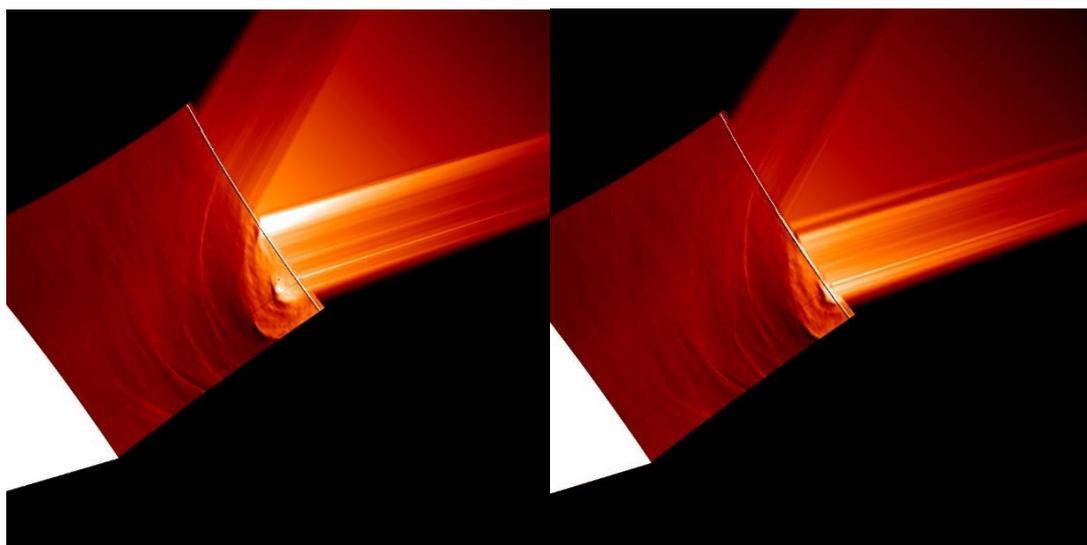
**Figura 25.** Imágenes obtenidas por VIRTIS en 1.7 micras de la órbita 567 de Venus Express procesadas con el software PLIA.



**Figura 26.** Imágenes obtenidas por VIRTIS en 5.1 micras de la órbita 567 de Venus Express procesadas con el software PLIA.



**Figura 27.** Imágenes obtenidas por VIRTIS en 1.7 micras de la órbita 571 de Venus Express procesadas con el software PLIA.



**Figura 28.** Imágenes obtenidas por VIRTIS en 5.1 micras de la órbita 571 de Venus Express procesadas con el software PLIA.

## Seguimiento de las nubes en PICV3

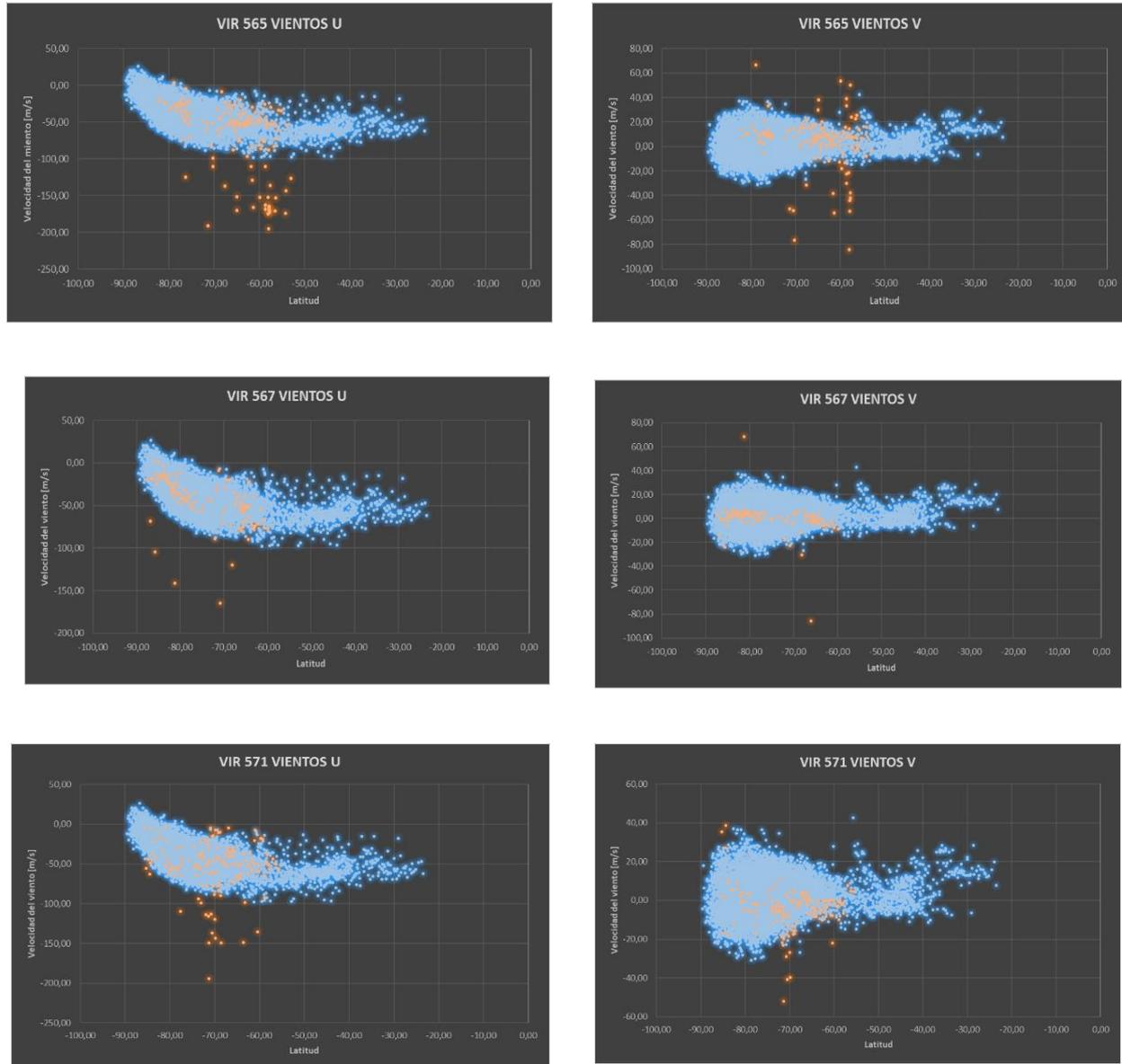
Después de guardar las imágenes es importante asegurarse que se aprecia un desplazamiento del vórtice entre imagen e imagen antes de realizar el seguimiento en PICV3.

Una vez las imágenes han sido tratadas, se realiza el seguimiento de los vientos en PICV3. Los resultados de los análisis vienen dados en archivos de texto por lo que es importante traspasarlos a algún programa que permita trabajar con los datos obtenidos, para este proyecto se ha utilizado Excel.

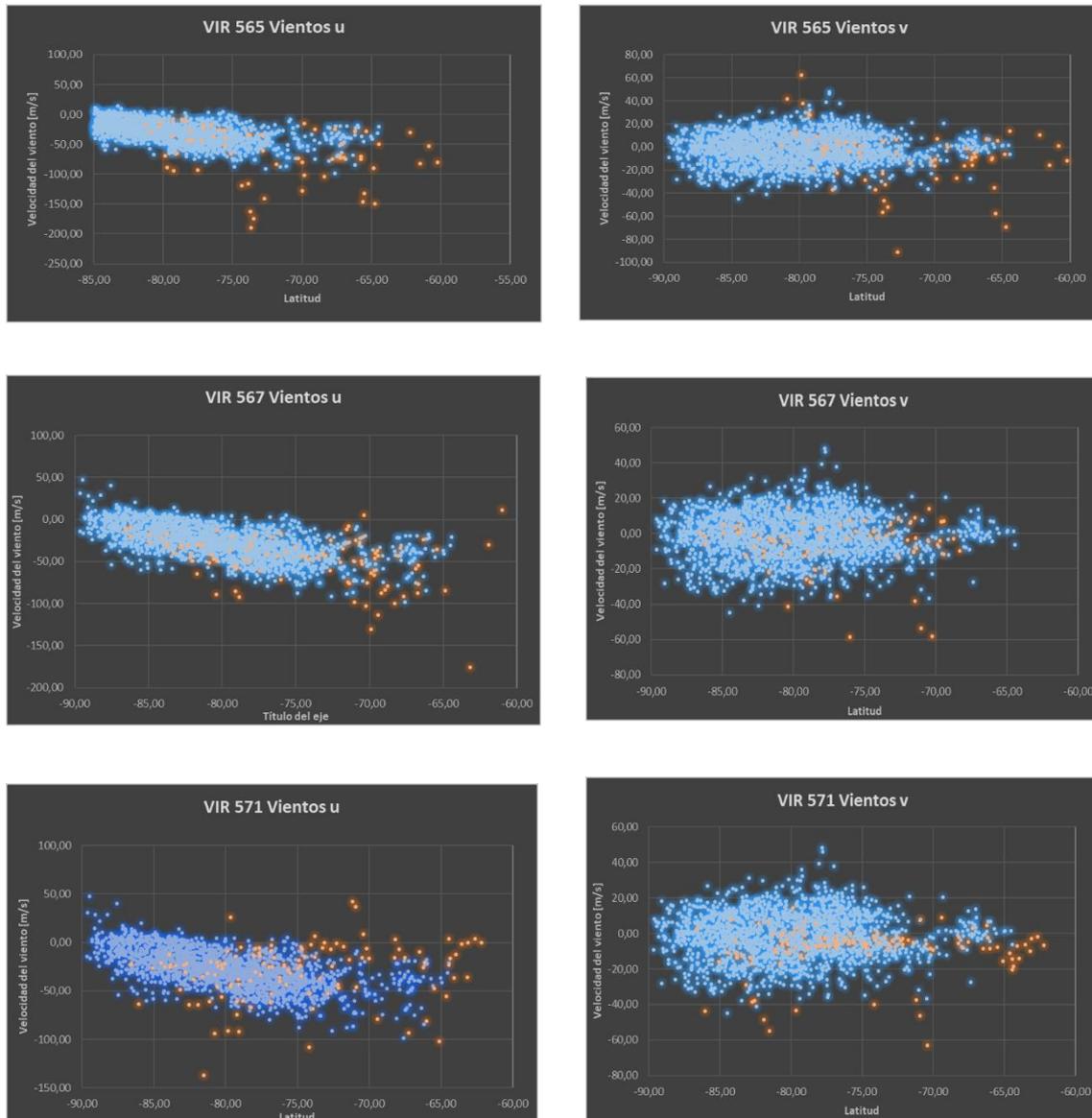
Los resultados de los análisis se contrastan con los datos obtenidos previamente por [16] con la misma metodología.

Las **figuras 29 y 30** muestran las medidas realizadas tanto en la zona central del vórtice como en el borde para las diferentes órbitas y longitudes de onda.

Se mostrarán primero los resultados obtenidos en el estudio de la dinámica de los vientos, tanto zonales (U) como meridionales (V), de la zona baja de las nubes, observada a 1.7 micras.

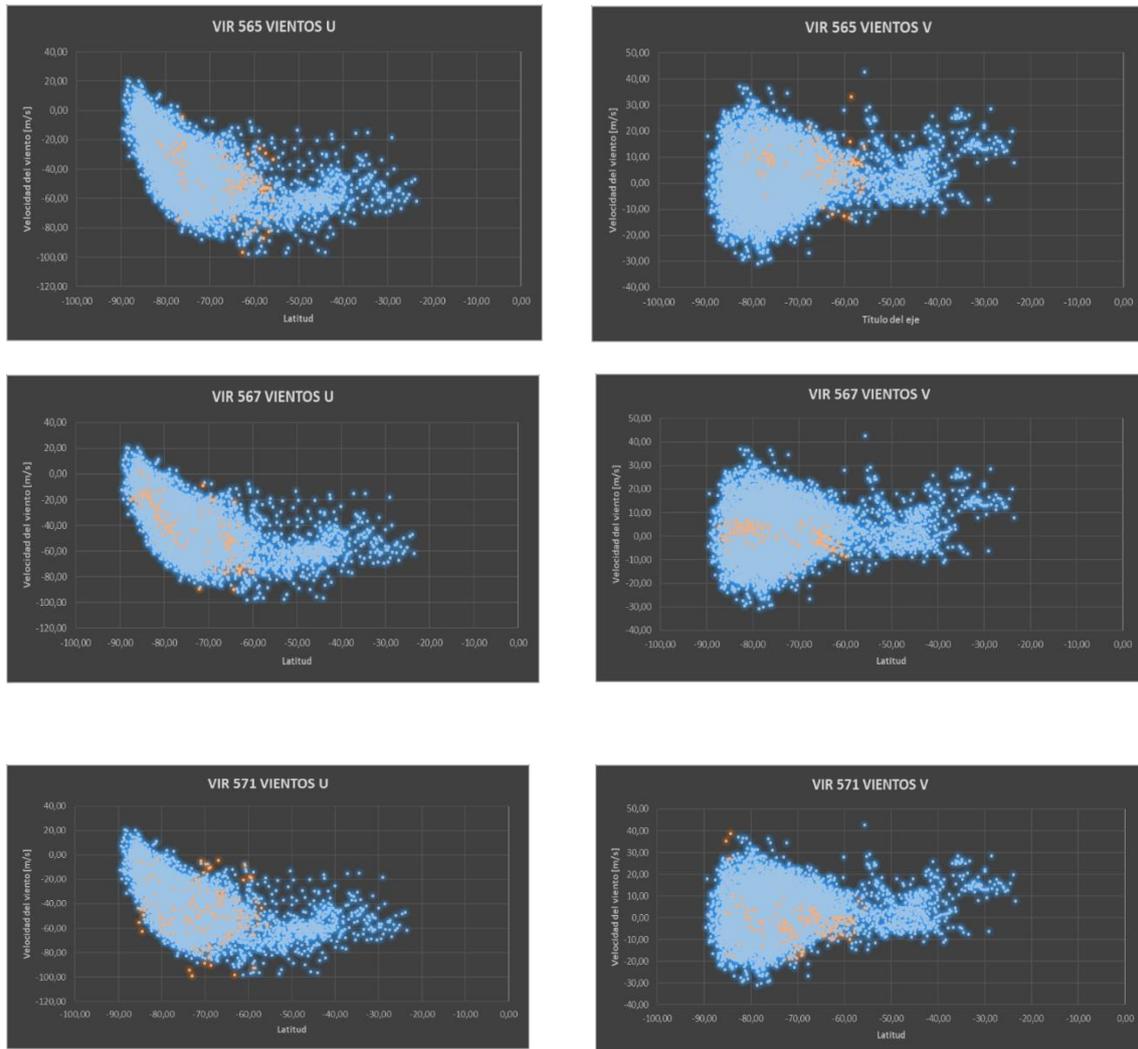


**Figura 29.** Medidas individuales obtenidas para los vientos meridionales (V) y zonales (U) del vórtice polar sur en 1.7 micras en las tres órbitas estudiadas (puntos naranjas), en comparación a estudios previos ([16]).

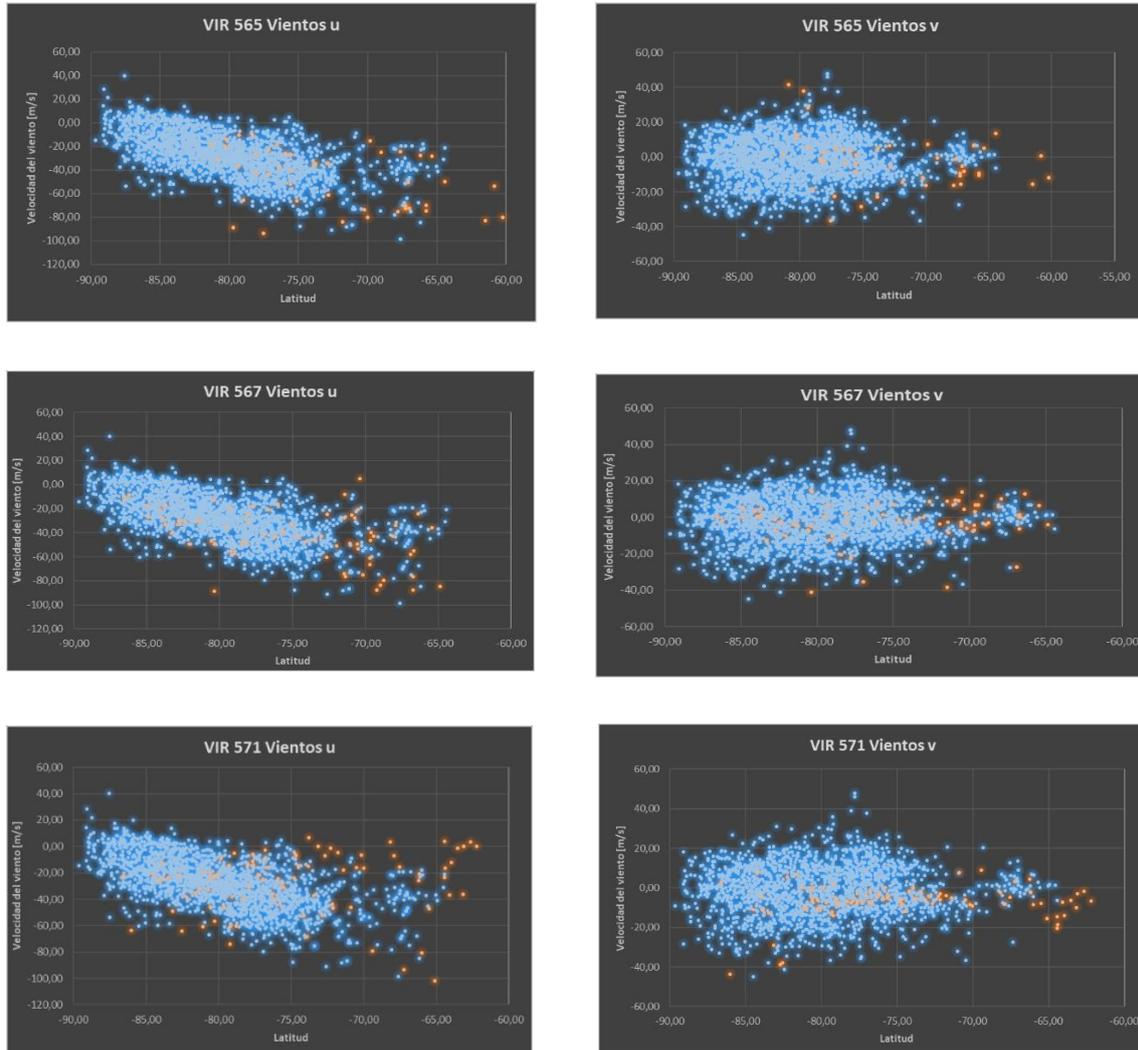


**Figura 30.** Medidas individuales obtenidas para los vientos meridionales (V) y zonales (U) del vórtice polar sur en 5.1 micras en las tres órbitas estudiadas (puntos naranjas), en comparación a estudios previos [16].

Como se puede apreciar en los resultados obtenidos en las **figuras 27 y 28**, existen puntos aislados que se alejan bastante de los resultados obtenidos previamente. Esos puntos se identifican uno a uno y, tras verificarlo en el mapa de vientos, se eliminan del archivo de datos original obtenido de los análisis en PICV3, por considerar que no siguen la misma tendencia que las medidas de su alrededor. Una vez eliminados se vuelven a representar las gráficas, pero esta vez sin los datos erróneos.

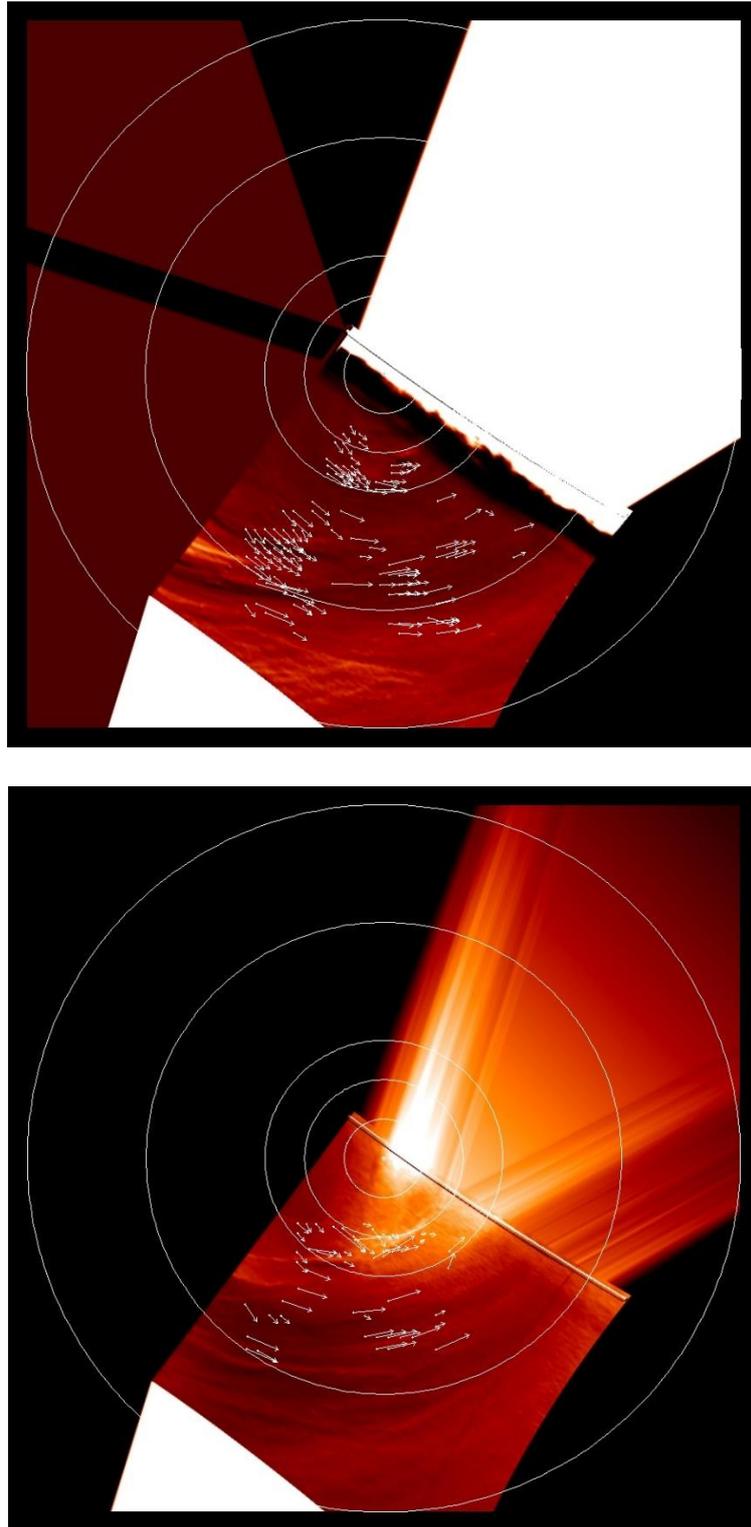


**Figura 31.** Medidas filtradas para los vientos meridionales (V) y zonales (U) del vórtice polar sur en 1.7 micras en las tres órbitas estudiadas (puntos naranjas), en comparación a estudios previos [16].

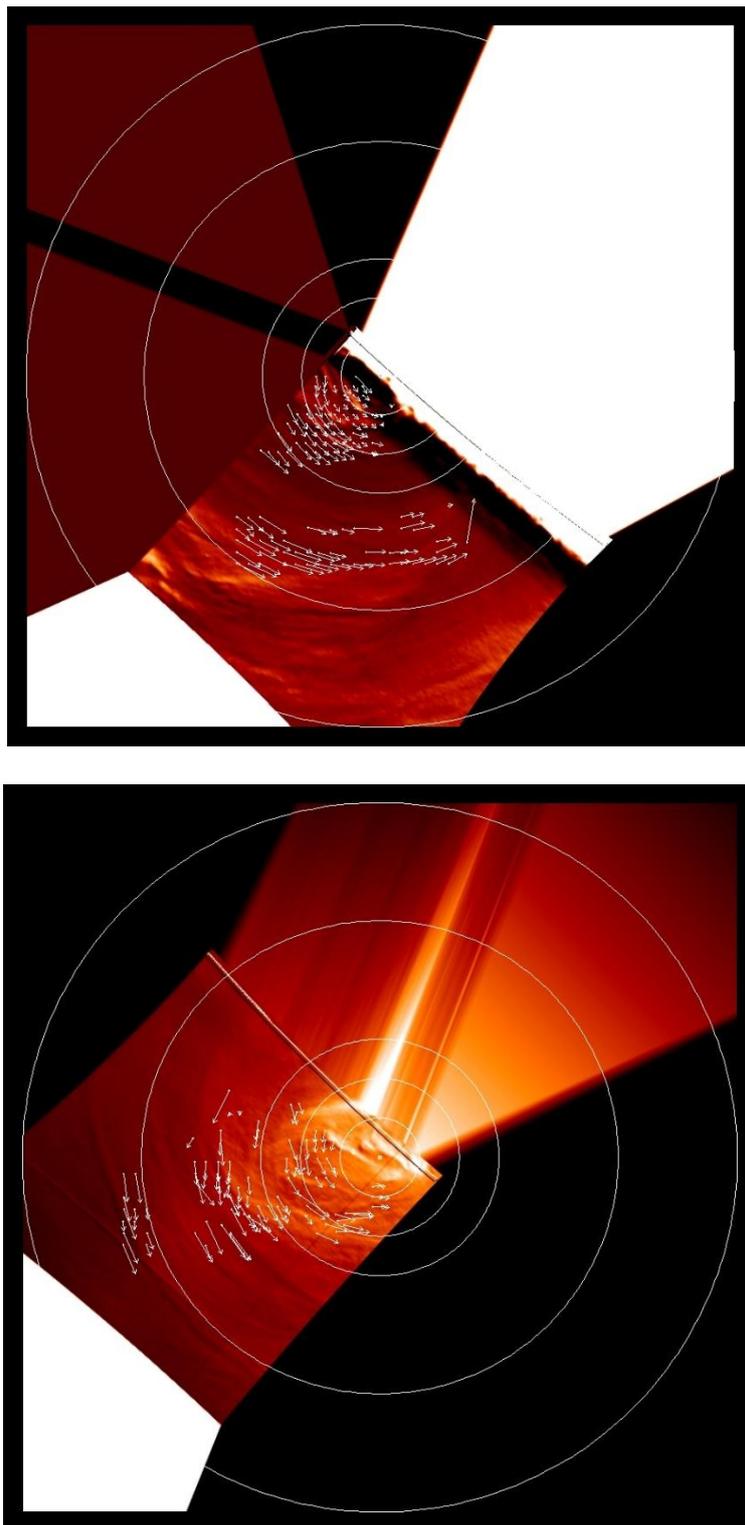


**Figura 32.** Medidas filtradas para los vientos meridionales (V) y zonales (U) del vórtice polar sur en 5.1 micras en las tres órbitas estudiadas (puntos naranjas), en comparación a estudios previos [16].

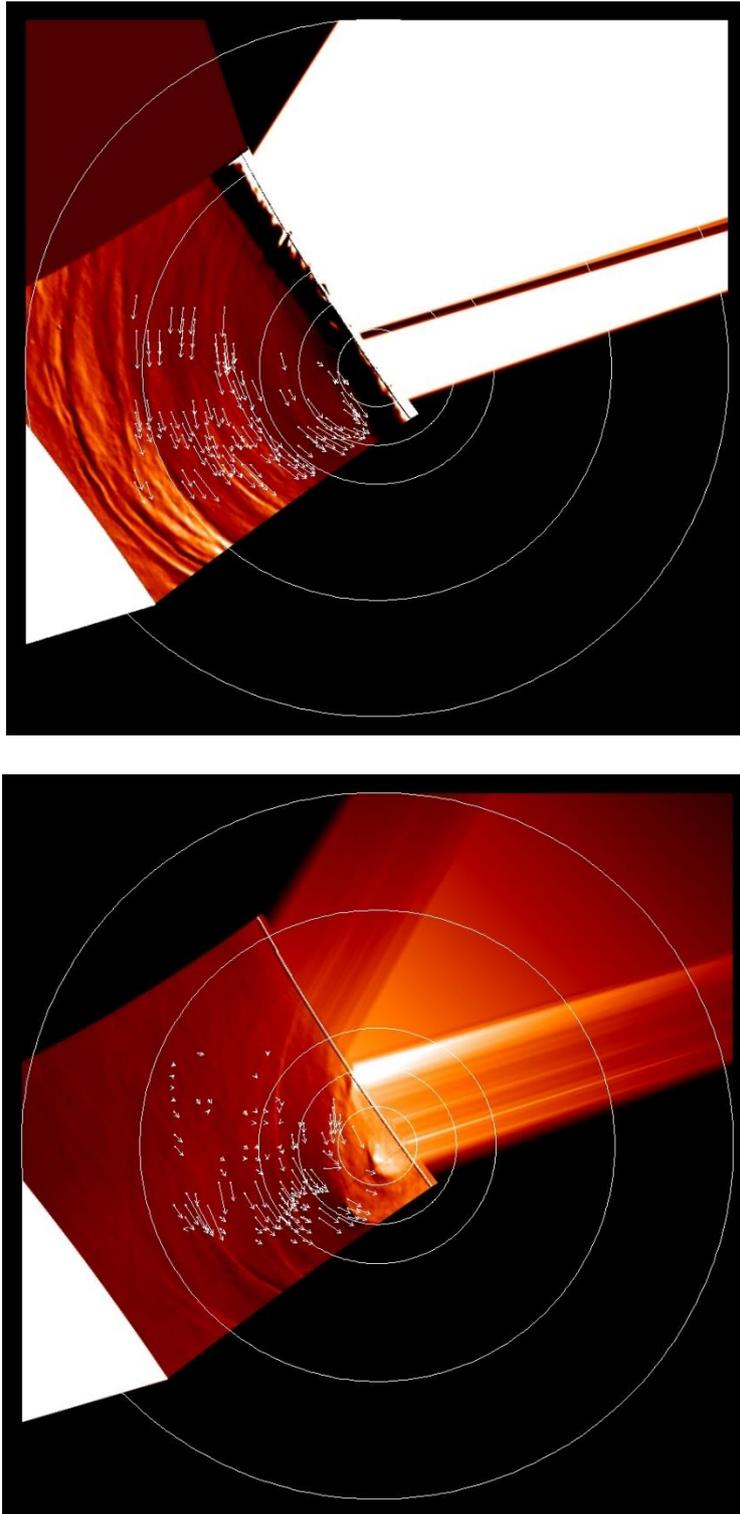
Una vez la limpieza de puntos ha concluido y, por tanto, tenemos nuestro conjunto de medidas fiables, se reinsertan los datos en un archivo de notas de tal manera que el programa *Draw\_Polar\_Vectors\_Map* pueda leer los valores de vientos zonales y meridionales con sus respectivos valores de longitud y latitud. Esta subrutina de IDL dibuja el mapa de las imágenes procesadas con los vectores de viento en ella. Los vectores indican la dirección del viento y su tamaño representa el módulo, es decir, la velocidad del viento.



**Figura 33.** Mapa de los vectores de viento obtenido ejecutando la subrutina Draw\_Polar\_Vectors\_Map en IDL utilizando los datos obtenidos en PICV3 y las imágenes tratadas en PLIA de la órbita 565. La imagen de arriba representa la imagen analizada en 1.7 micras y la de abajo en 5.1 micras.



**Figura 34.** Mapa de los vectores de viento obtenido ejecutando la extensión Draw\_Polar\_Vectors\_Map en IDL utilizando los datos obtenidos en PICV3 y las imágenes tratadas en PLIA de la órbita 567 La imagen de arriba representa la imagen analizada en 1.7 micras y la de abajo en 5.1 micras.



**Figura 35.** Mapa de los vectores de viento obtenido ejecutando la extensión Draw\_Polar\_Vectors\_Map en IDL utilizando los datos obtenidos en PICV3 y las imágenes tratadas en PLIA de la órbita 571 La imagen de arriba representa la imagen analizada en 1.7 micras y la de abajo en 5.1 micras.

## Mapas de viento y vorticidad

Observando los vectores de viento del vórtice polar sur de Venus, se puede ver como los vectores siguen la dirección de la rotación del planeta como se mencionó en la introducción.

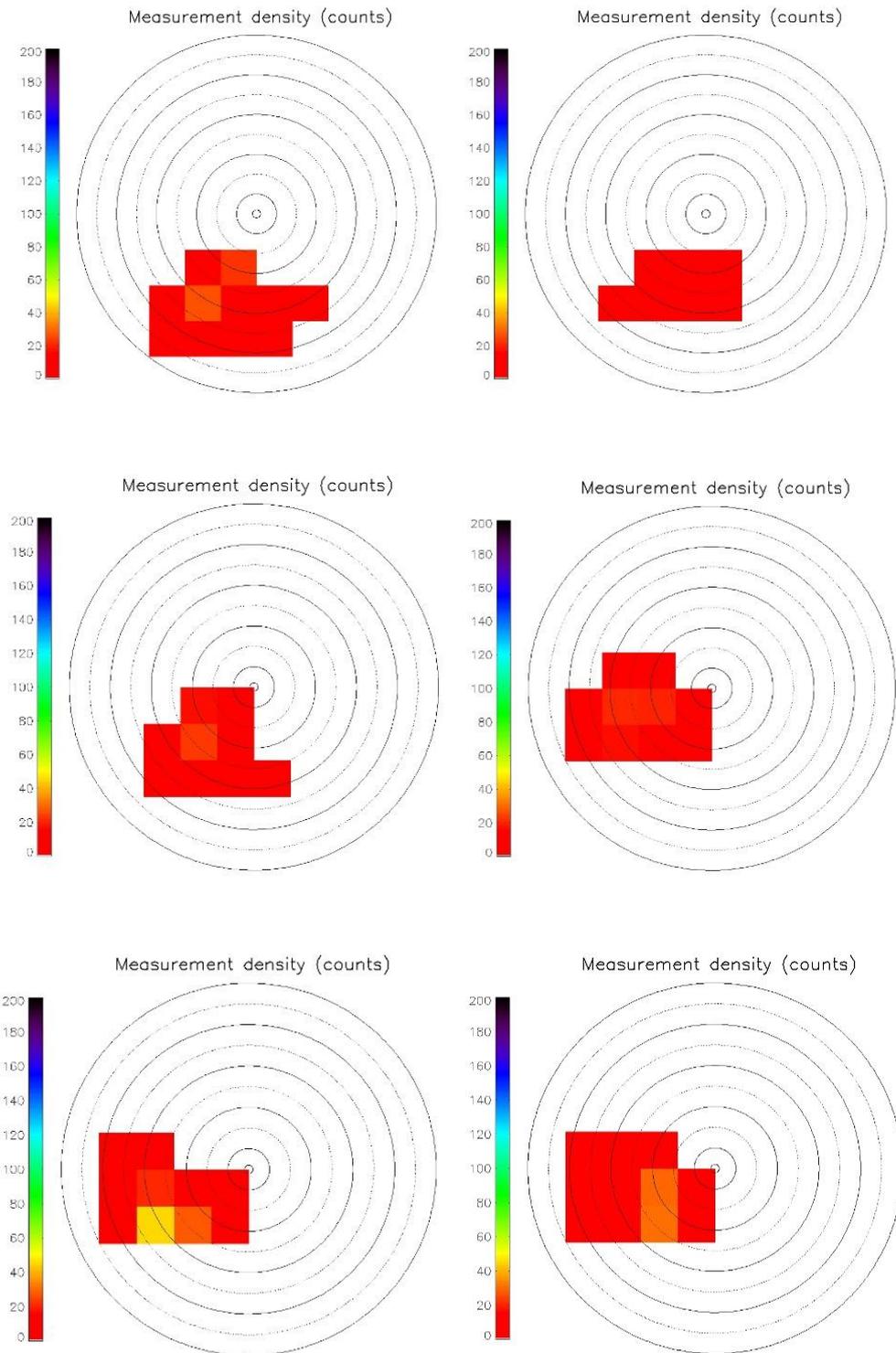
En las imágenes nocturnas en 1.7 micras se observa la dinámica de las nubes a 44-48 Km [3]. Los resultados obtenidos muestran como el flujo está dominado por un viento zonal con dirección hacia el oeste, el cual crece a medida que nos alejamos del centro del vórtice hacia el borde, llegando a tener velocidades de hasta 100 m/s en latitudes de unos 60-50°. Los vientos meridionales sin embargo se mantienen más estables a lo largo del vórtice.

En el análisis de las imágenes nocturnas en 5.1 micras también se aprecia COMO crece la velocidad del viento zonal a medida que nos aproximamos a latitudes más ecuatoriales, sin embargo, estos vientos zonales de la capa superior de las nubes son más rápidos que en la capa inferior de las nubes en latitudes alejadas al polo.

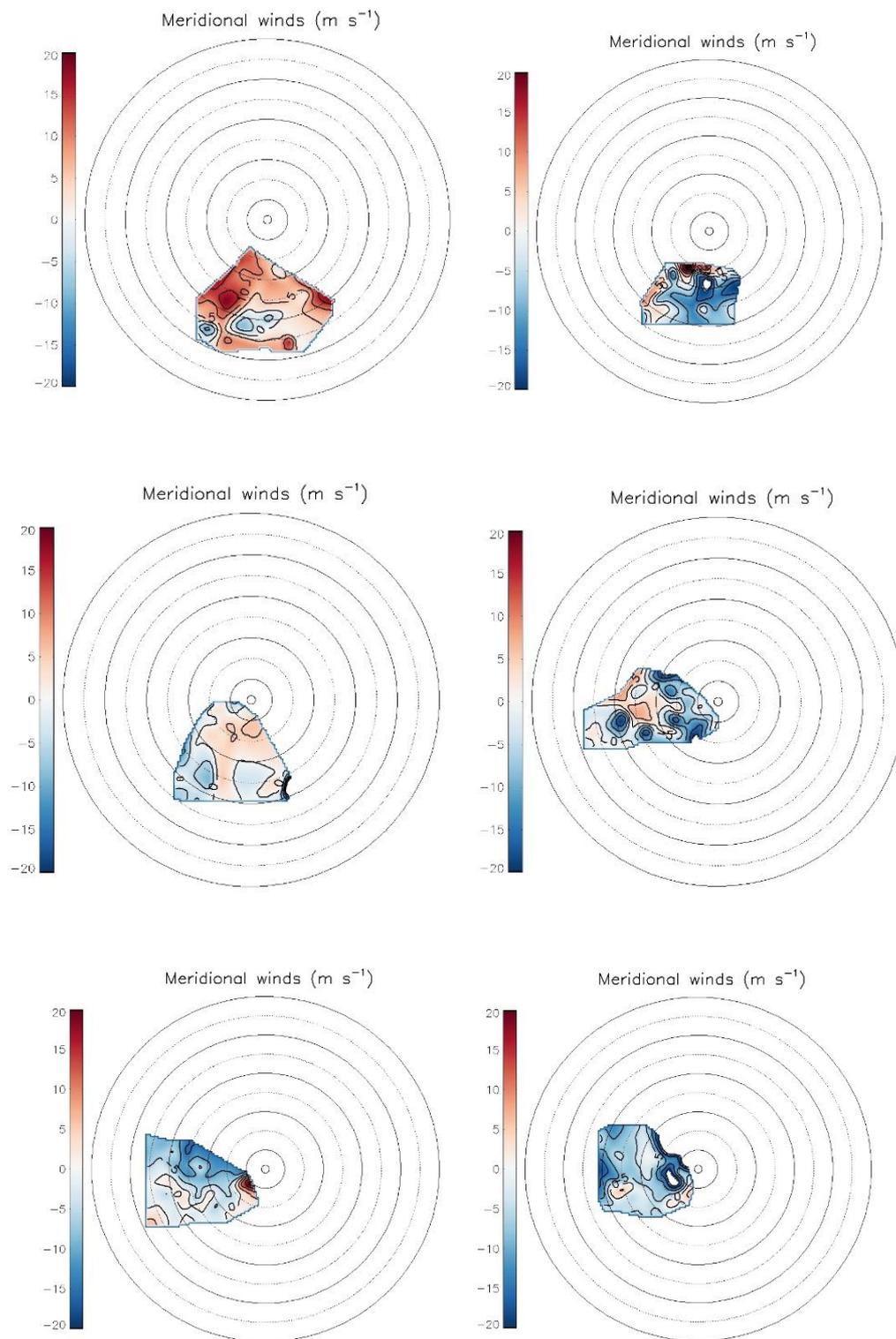
La nube superior presenta un viento meridional estable, con valores de hasta los  $\pm 20$  m/s en latitudes de unos 70-60° y sin grandes fluctuaciones. En las capas inferiores, sin embargo, aun cuando la intensidad del viento es similar que, en la capa superior, los valores cuentan con variaciones más bruscas. Esta característica podría interpretarse como un régimen meridional más turbulento en las capas bajas.

Una vez obtenidos los perfiles de viento con el programa PICV3, se pueden calcular otros parámetros físicos y obtener mapas con más información, aportando los archivos de notas con los valores de los vientos meridionales y zonales para las distintas longitudes y latitudes.

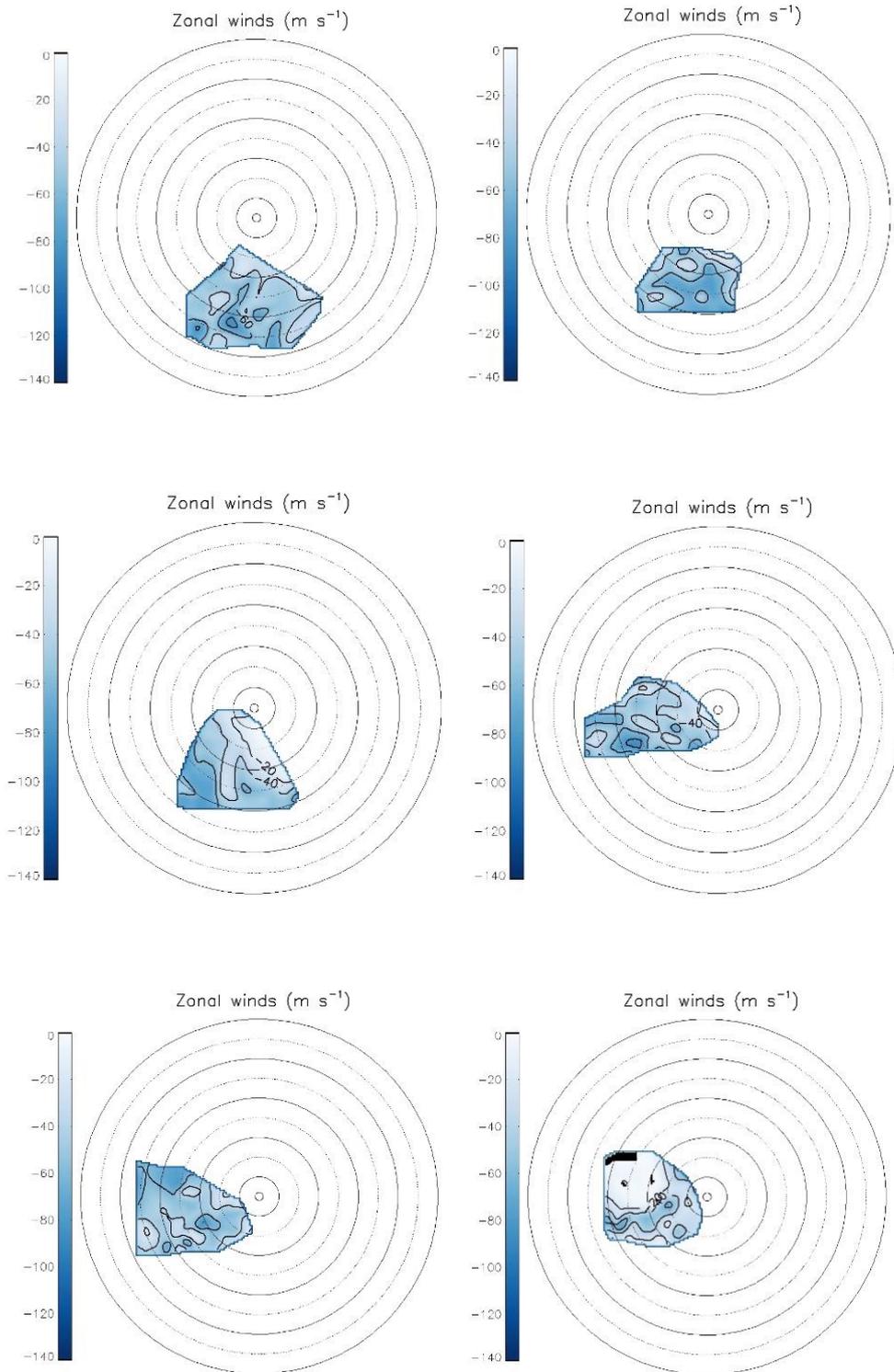
En este proyecto se ha calculado la vorticidad relativa, es decir, el grado de rotación local de la atmósfera, en la región polar sur de Venus y a dos alturas, correspondientes a la nube inferior y a la cima de nubes. Para ello, se ha hecho uso de la subrutina Polar\_Winds\_Analysis escrita en IDL por miembros del Grupo de Ciencias Planetarias de la UPV/EHU.



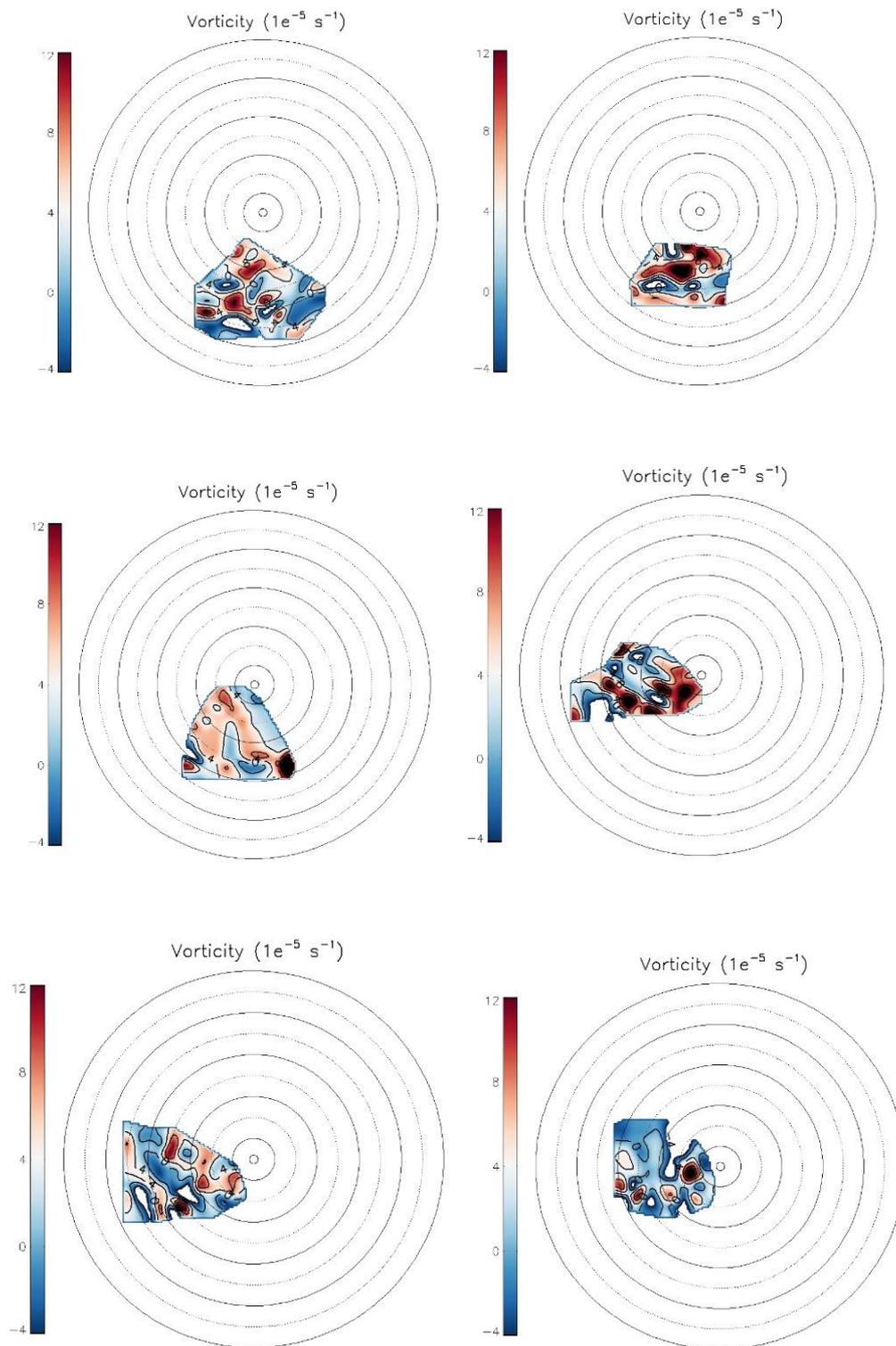
**Figura 36.** Densidad de datos de la zona de estudio para las diferentes órbitas. La primera fila representa la órbita 565. La segunda fila representa la órbita 567. La tercera fila representa la órbita 571. Los paneles de la izquierda representan el estudio de la capa inferior de las nubes (1.7 micras) y los paneles de la derecha representan el estudio de la capa superior (5.1 micras).



**Figura 37.** Viento meridional de la zona de estudio para las diferentes órbitas. La primera fila representa la órbita 565. La segunda fila representa la órbita 567. La tercera fila representa la órbita 571. El panel de la izquierda representa el estudio de la capa inferior de las nubes (1.7 micras) y el panel de la derecha representa el estudio de la capa superior (5.1 micras).



**Figura 38.** Viento zonal de la zona de estudio para las diferentes órbitas. La primera fila representa la órbita 565. La segunda fila representa la órbita 567. La tercera fila representa la órbita 571. Los paneles de la izquierda representan el estudio de la capa inferior de las nubes (1.7 micras) y los paneles de la derecha representan el estudio de la capa superior (5.1micras).



**Figura 39.** Vorticidad relativa de la zona de estudio para las diferentes órbitas. La primera fila representa la órbita 565. La segunda fila representa la órbita 567. La tercera fila representa la órbita 571. Los paneles de la izquierda representan el estudio de la capa inferior de las nubes (1.7 micras) y los paneles de la derecha representan el estudio de la capa superior (5.1 micras).

## Mapa densidades

Este mapa representa la cantidad de datos que se han obtenido en la región estudiada, sirve para evaluar la fiabilidad de las interpretaciones. Las regiones que cuentan con una baja densidad de datos serán menos fiables que las basadas en un gran número de medidas. Es decir, si vemos que el viento acelera en una zona, esa conclusión será más contundente si se basa en 10 medidas que en 1.

## Viento meridional

La definición de meridional se basa en alejarse o acercarse del polo planetográfico, es por eso por lo que existe tanta variación de valores positivos y negativos, ya que como se aprecia en la **figura 37** hay gran variedad de valores positivos y negativos. En los datos de la órbita 565 se puede apreciar como en el estudio de la capa inferior los valores de viento son en gran mayoría positivos, por el contrario, en la capa superior los valores son negativos, dando a entender que los flujos meridionales en las capas altas y bajas de la nube van en dirección contraria.

La misma conclusión se podría sacar de la órbita 567 ya que se puede apreciar como en el estudio de la capa inferior, la velocidad del viento es positiva, y en la capa superior se aprecian regiones donde el flujo va en dirección contraria.

Este resultado da a entender que la dinámica de los vientos meridionales es distinta en las diferentes capas de la nube, no se mueven ni a la vez ni de la misma manera.

## Viento zonal

Al contrario de lo que se esperaría, no se observa un mapa zonal con valores creciendo según se alejan del polo (tal y como sí sucede en la órbita 567, nube inferior). Esto podría indicar un cambio en la atmósfera de Venus (algo poco probable debido a la consistencia observada en los últimos años), o podría sugerir errores en la medida del viento. No se ha podido verificar esta última posibilidad por falta de tiempo.

## Vorticidad

No se observan estructuras o regiones dominantes, sino más bien una mezcla de estructuras pequeñas con valores fluctuantes. Esto parece indicar que toda la atmósfera tiene una misma rotación, la general, y, por tanto, en estos mapas no se distinguen movimientos propios del

vórtice. No hay regiones (como los brazos exteriores o el centro) que tengas más rotación que otras.



## Capítulo 4

### Conclusiones

En este proyecto se ha estudiado la dinámica del vórtice polar sur de Venus utilizando distintos softwares desarrollados por el grupo de Ciencias Planetarias de la Universidad del País Vasco. Mediante PLIA se trataron las imágenes para obtener la mejor calidad posible para su análisis, no obstante, no todas las imágenes se trataron de la misma manera. Las imágenes tratadas en  $1.7\mu\text{m}$  cuentan con un mayor número de estructuras visibles que las imágenes tratadas en  $5.1\mu\text{m}$ , esta característica facilita la obtención de más vectores de viento para un mismo seguimiento en PICV3, al tener un mayor valor del factor de correlación a la hora del muestreo entre imágenes.

En cuanto a los resultados obtenidos en el análisis de viento, cabe destacar que por circunstancias ajenas al proyecto el tiempo con que se ha contado para realizar este trabajo ha sido muy corto. Es por eso por lo que la densidad de datos en los análisis de las 3 órbitas es bastante baja. Aun así, en la comparación con los datos obtenidos en *Garate-López et al. (2013)*, los perfiles de viento obtenidos en este trabajo encajan dentro de la nube de puntos de los estudios previos. Se aprecia como el flujo está dominado por un viento zonal en dirección hacia el oeste. En la capa de las nubes altas ( $5.1\mu\text{m}$ ) tiene velocidades ligeramente mayores en latitudes más alejadas del polo  $60-50^\circ$ , dando a entender que a medida que nos acercamos al ecuador esta diferencia será algo mayor. La velocidad de los vientos zonales en ambas capas de la nube decrece a medida que se acercan al vórtice, siendo casi nula en la región del polo sur. Estas características coinciden con las ya observadas en estudios previos.

Los vientos meridionales parecen mantenerse más estables que los zonales, puesto que no se aprecian decrecimientos bruscos como en los vientos zonales. En el estudio de las nubes altas ( $5.1\mu\text{m}$ ), los valores de viento meridional se mantienen más estables entre  $-2\text{ ms}^{-1}$  y  $-8\text{ ms}^{-1}$ , pero siempre en la misma dirección. Sin embargo, el flujo de viento zonal en las capas inferiores tiene más variaciones que en la capa alta, los valores de velocidad son menores y la dirección también cambia, tal y como puede apreciarse en la **figura 2**. Una de las incógnitas actuales sobre la atmósfera de Venus es la extensión de la célula de Hadley, que podría llegar hasta el centro del vórtice o tan solo hasta la parte exterior del vórtice, a la zona conocida como cold collar.

Analizar las condiciones de temperatura y presión atmosférica de la región polar, podría dar más información al respecto. De esa manera uniríamos la información cinemática obtenida en este trabajo con la información térmica y podríamos estudiar la dinámica atmosférica al completo.

## Bibliografía

- [2]. Hopkins, N. B. and Irvine, W. M. : 1971, in C. Sagan, T. C. Owen, and H. J. Smith (eds.), 'Planetary Atmospheres', IAU Symp. 40, 349.
- [3]. Hueso et al. (2012). Assessing the long-term variability of Venus winds at cloud level from *virtis-venus express*. *Icarus*, 217 (2), 585–598. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2011.04.020>
- [4]. Hueso, R., Legarreta, J., Rojas, J.F., Peralta, J., Pérez-Hoyos, S., del Río-Gaztelurrutia, T., & Sánchez-Lavega, A. (2010). The planetary laboratory for image analysis (plia). *Advances in Space Research*, 46 (9), 1120–1138. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.05.016>
- [5]. Barabash et al. (2007). The loss of ions from Venus through the plasma wake. *Nature*, 450, <https://www.nature.com/articles/nature06434>
- [6]. J. Kelly Beatty, Carolyn Collins Petersen, Andrew Chaikin, (1999). *The new solar system*. ISBN 0-521-64183-7 <https://www.cambridge.org/es/universitypress/subjects/physics/planetary-systems-and-astrobiology/new-solar-system-4th-edition?format=PB&isbn=9780521645874>
- [7]. F. W. Taylor, H. Svedhem and J. W. Head III (2017). *Venus: The Atmosphere, Climate, Surface, Interior and Near-Space Environment of an Earth-Like Planet*. [https://www.researchgate.net/publication/322668645\\_Venus\\_The\\_Atmosphere\\_Climate\\_Surface\\_Interior\\_and\\_Near-Space\\_Environment\\_of\\_an\\_Earth-Like\\_Planet](https://www.researchgate.net/publication/322668645_Venus_The_Atmosphere_Climate_Surface_Interior_and_Near-Space_Environment_of_an_Earth-Like_Planet)
- [8]. Sánchez-Lavega, A. et al. (2008). Variable winds on Venus mapped in three dimensions. *Geophys. Res. Lett.* 35, L13204. <https://doi.org/10.1029/2008GL033817>
- [9]. Garate-Lopez et al. (2013). A chaotic long-lived vortex at the southern pole of Venus. *Nature Geoscience*, 6 (4), 254–257. <https://doi.org/10.1038/ngeo1764>
- [10]. Piccioni, G., Drossart, P., Sanchez-Lavega, A., Hueso, R., Taylor, F., Wilson, C., Grassi, D., Zasova, L., Moriconi, M., Adriani, A., et al. (2007). South-polar features on Venus similar to those near the north pole. *Nature*, 450 (7170), 637–640. <https://doi.org/10.1038/nature06209>
- [11]. Drossart, P., Piccioni, G., Adriani, A., Angrilli, F., Arnold, G., Baines, K. H., Bellucci, G., Benkhof, J., Bezard, B., Bibring, J.-P., Blanco, A., Blecka, M. I., Carlson, R. W., Coradini, A., di Lellis, A., Encrenaz, T., Erard, S., Fonti, S., Formisano, V., Fouchet, T., Garcia, R., Haus, R., Helbert, J., Ignatiev, N. I., Irwin, P. G. J., Langevin, Y., Lebonnois, S., Lopez-Valverde, M. A., Luz, D., Marinangeli, L., Orofino, V., Rodin, A. V., Roos-Serote, M. C., Saggin, B., Sánchez-Lavega, A., Stam, D. M., Taylor, F. W., Titov, D., Visconti, G., Zambelli, M., Hueso, R., Tsang, C. C. C., Wilson, C. F., and Afanasenko, T. Z. (2007a). *Scientific goals for*

*the observation of Venus by VIRTIS on ESA/Venus express mission. Planetary and Space Science* 55, 1653-1672.

[12]. Taylor, Beer, R., Chahine, M., Diner, D., Elson, L., Haskins, R., McCleese, D., Martonchik, J., Reichley, P., Bradley, S., et al. (1980). *Structure and meteorology of the middle atmosphere of venus: Infrared remote sensing from the pioneer orbiter. Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 85 (A13), 7963–8006. <https://doi.org/10.1029/JA085iA13p0796>

[13]. A. Fedorova, O. Korablev, A.-C. Vandaele, J.-L. Bertaux, D. Belyaev, A. Mahieux, E. Neefs, W. V. Wilquet, R. Drummond, F. Montmessin, and E. Villard (2008). *HDO and H2O vertical distributions and isotopic ratio in the Venusmesosphere by Solar Occultation at Infrared spectrometer on board Venus Express. Journal of Geophysical Research: Planets*, 113 (E5), E00B22. <https://doi.org/10.1029/2008JE003146>

[14]. D. Luz, et al. (2011). *Venus's Southern Polar Vortex Reveals Precessing Circulation. Science* 332, pp. 577-580. <https://doi.org/10.1126/science.1201629>

[15]. Garate-Lopez. (2014). *Dynamics of the south polar vortex of Venus (Doctoral dissertation). Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU).* <https://addi.ehu.es/handle/10810/54035>

[16] Rodriguez-Ovalle, P., and Garate-Lopez, I.. *More on the dynamics of Venus' South Polar Vortex from VIRTIS-Vex observations. EPSC2021-552, EuroPlanet Science Congress 2021, Virtual Meeting. Septiembre 2021.*