

VENUS NUNCA ES LO QUE PARECE

DURANTE LOS ÚLTIMOS QUINCE AÑOS, LAS MISIONES *VENUS EXPRESS* (ESA) Y *AKATSUKI* (JAXA) HAN REVOLUCIONADO TODO LO QUE SABÍAMOS DEL PLANETA VENUS. REPASAMOS LAS SORPRESAS QUE NOS HA REVELADO VENUS, DESDE LAS MAYORES ONDAS ESTACIONARIAS DEL SISTEMA SOLAR HASTA EL APASIONANTE DEBATE SOBRE LA PRESENCIA DE BIOINDICADORES EN SUS NUBES.

JAVIER PERALTA Y ALEJANDRO CARDESÍN



Artículo exclusivo
colaboración
de la Sociedad
Española
de Astronomía

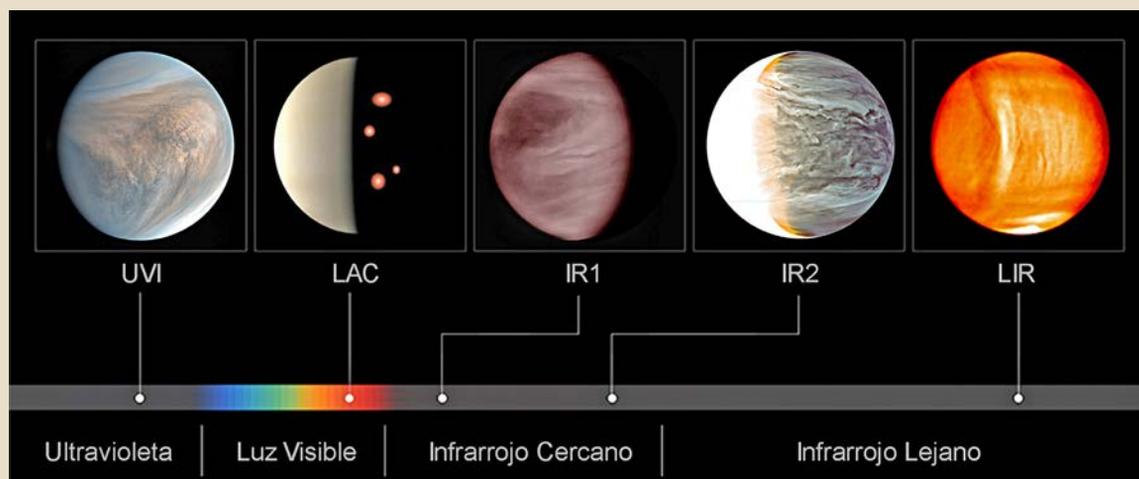


FIGURA 1. Rango del espectro electromagnético cubierto por las cámaras a bordo de la nave *Akatsuki*. En ultravioleta, la cámara UVI puede observar las nubes superiores en el lado diurno de Venus. En el visible, LAC observa relámpagos y emisiones de fluorescencia en el lado nocturno. En infrarrojo cercano, IR1 observa las nubes intermedias (lado diurno) y la emisión térmica de la superficie (lado nocturno, no se muestra), e IR2 las nubes profundas (lado nocturno) y una banda del CO₂ que permite derivar la altura de las nubes (lado diurno, no se muestra). Finalmente, en infrarrojo lejano el bolómetro LIR observa la emisión térmica de las nubes superiores. (JAXA, Planet-C)

En Venus, las apariencias engañan. La historia de los avances científicos en Venus es un laberinto repleto de hipótesis equivocadas que tarde o temprano son refutadas cuando se hacen nuevas observaciones. Este laberinto empezó ya desde las primeras observaciones humanas. Dado que Venus es tan brillante como una estrella y unas veces se ve al amanecer y otras al atardecer, algunas civilizaciones antiguas creían que, en vez de un planeta, estaban viendo dos estrellas. Con el transcurrir de los siglos, cuando los primeros científicos empezaban a usar telescopios, se vieron influenciados por el hecho de que la mayoría de los planetas del Sistema Solar tienen sus propias lunas, y algunos astrónomos como Cassini defendieron que Venus también las tenía. Este debate duró más de 120 años, y solo acabó cuando las observaciones de los tránsitos solares en 1761 y 1769 descartaron esta posibilidad. También, el hecho de que Venus estuviese permanentemente cubierto por una gruesa capa de nubes llevó a pensar que su superficie estaría helada, hasta que las primeras observaciones con radiotelescopios desvelaron que Venus tenía la superficie más caliente del Sistema Solar, debido a un efecto invernadero desbocado. Por si fuera poco, Venus es además el planeta con rotación más lenta del Sistema Solar (243 días terrestres frente a las 24 horas de la Tierra), por lo que se podría esperar que su atmósfera rotara también lentamente... Pero estaríamos equivocados una vez más. La atmósfera rota sesenta veces más rápido que la superficie, en un fenómeno llamado «superrotación» que hoy en día

sigue sin una explicación satisfactoria y que es clave para entender procesos similares en otros cuerpos de lenta rotación como la luna de Saturno Titán y algunos exoplanetas.

VUELTA A VENUS

Cuando la Agencia Espacial Europea (ESA) lanzó la misión *Venus Express* en 2005, Venus llevaba más de una década sin recibir visitas. Las últimas misiones dedicadas al estudio de la atmósfera habían sido la *Pioneer Venus*, lanzada a finales de los 70, y los globos sonda rusos *VEGA* que sobrevolaron las nubes altas durante un par de días en el año 1985. En los años 90 la misión *Magallanes* de la NASA se dedicó principalmente a la superficie, consiguiendo un mapa global del planeta que desveló gran variedad de volcanes, falta de placas tectónicas y muy pocos cráteres de impacto. Esta señal de «juventud» geológica era uniforme en todo el planeta, lo que desvelaba un misterioso cataclismo a escala planetaria hace menos de 600 millones de años, aún sin explicar.

Venus Express retomó el estudio de la atmósfera de Venus, y observó el planeta durante nueve años (2006-2014), con una órbita polar de 24h específicamente diseñada para el estudio de la atmósfera. El pericentro a 250 km del polo norte de Venus permitía observar detalles atmosféricos de apenas unos centenas de metros en el hemisferio norte, y el apocentro a 66 000 km sobre el polo sur permitía observar la morfología y dinámica global del hemisferio sur durante varias horas. La instrumentación científica estaba basada en otros instrumentos de *Rosetta* y *Mars Express*, y

fue seleccionada específicamente para el estudio de la atmósfera en tres dimensiones, desde la emisión térmica de la superficie hasta las altas capas de la ionosfera y su interacción con el viento solar en la magnetosfera.

Más recientemente, la misión japonesa *Akatsuki* de la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (JAXA) fue diseñada para estudiar la superrotación, la estructura térmica, aerosoles y la posible existencia de relámpagos. A bordo de *Akatsuki* hay cámaras para observar los movimientos de las nubes a diversas alturas, un oscilador ultra-estable (USO) para experimentos de radio-oculación, y una cámara de gran sensibilidad (LAC) para detectar relámpagos y fluorescencia atmosférica. La llegada de *Akatsuki* a Venus fue un desafío sin precedentes ya que un fallo en el motor principal no permitió la inserción orbital prevista en diciembre de 2010, y dejó a la nave en órbita alrededor del Sol durante cinco años. Tras una larga estrategia de maniobras, JAXA hizo uso de la épica y logró realizar la inserción orbital en diciembre de 2015 sin tener que usar el motor principal. La misión había sido diseñada para tener una órbita ecuatorial con un periodo de rotación de unas 30 horas para observar mejor el movimiento de las nubes. La nueva órbita era más elíptica y con un periodo de unos 10 días, pero ha permitido seguir observando los detalles de la atmósfera hasta nuestros días.

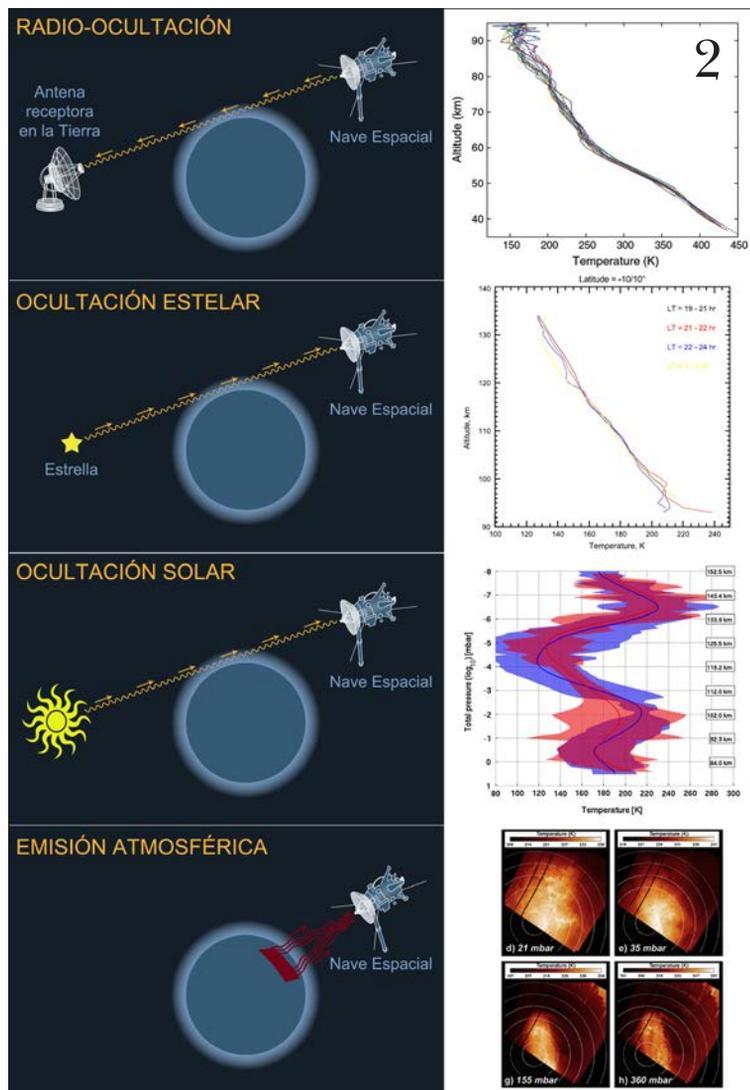
LA TEMPERATURA DE LA ATMÓSFERA DE VENUS

Uno de los mayores misterios de Venus es el régimen de temperaturas de su atmósfera, cuyo efec-

to invernadero ha sido clave para la evolución de todo el planeta. Por ello los innovadores instrumentos a bordo de *Venus Express* fueron diseñados para caracterizar las temperaturas de la atmósfera, cubriendo un rango de alturas entre 40 y 170 km. De forma general, podemos decir que las temperaturas de Venus fueron medidas de dos maneras: usando la ocultación y la emisión atmosférica.

La ocultación consiste en obtener información de la atmósfera observando cómo se comporta la radiación electromagnética emitida por un objeto externo al atravesar la atmósfera, ya sea la radiación de una estrella que aparece o se esconde detrás de las nubes, o la propia señal de radio comunicación con la Tierra que se ve alterada. Gracias a este método podemos obtener el perfil vertical de la temperatura sobre una determinada región geográfica. En el caso de la radio-ocultación, observamos desde la Tierra una señal de radio emitida desde la nave cuando –desde el punto de vista de nuestro planeta– esta se esconde y reaparece detrás de Venus. En la ocultación estelar y solar, es la nave la que observa la emisión de luz de una estrella (con el instrumento SPICAV) o del Sol al amanecer y anochecer (con el instrumento SOIR).

Por otro lado, cuando estudiamos la emisión atmosférica, la nave toma imágenes o espectros de la atmósfera de Venus en el rango infrarrojo (VIRTIS en *Venus Express*, LIR en *Akatsuki*). A diferencia de la ocultación, este método permite obtener la temperatura sobre un área extensa del planeta, usando un método de «inver-



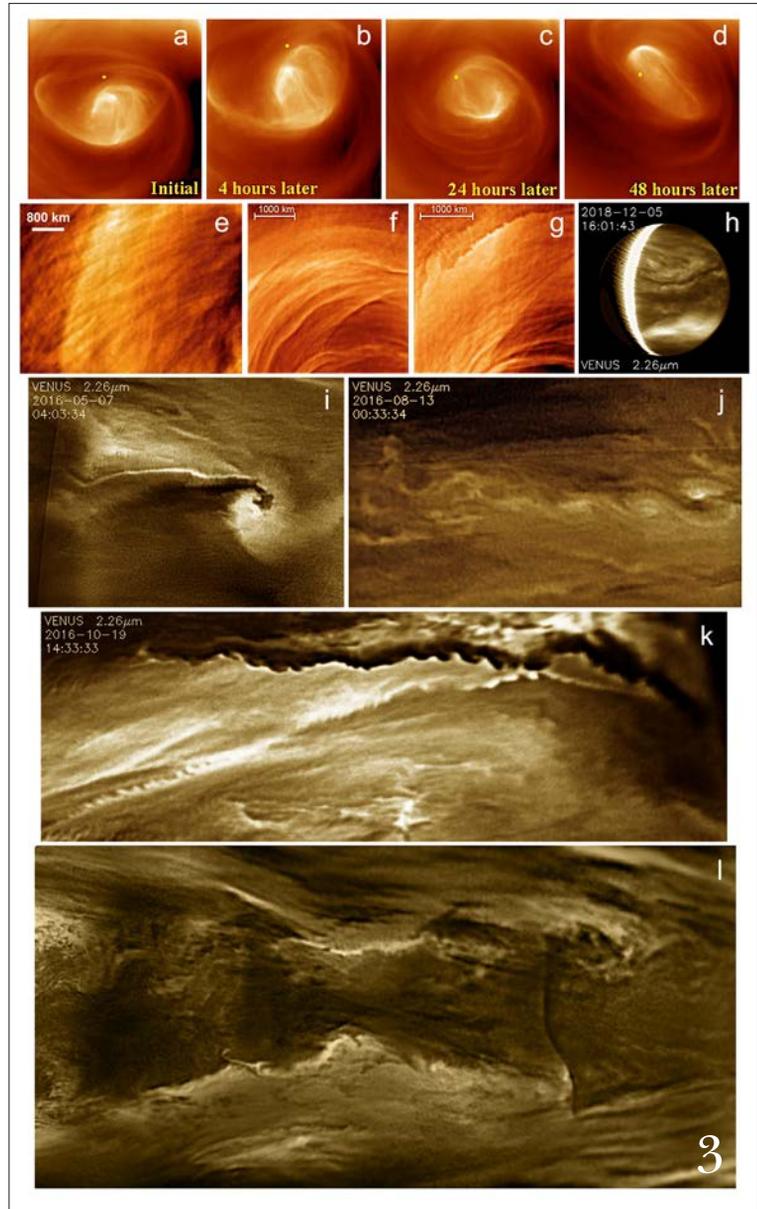
sión» para comprobar qué valor de temperatura de los modelos teóricos reproduce mejor los valores observados a distintas alturas, construyendo mapas de temperatura tridimensionales.

Con *Venus Express* y *Akatsuki*, hemos ampliado enormemente los datos de temperatura en la región de la troposfera y baja mesosfera de Venus (40-100 km), combinando radio-ocultación y estudios de emisión atmosférica con imágenes de las nubes superiores y espectros del lado noctur-

no. Los centenares de perfiles de radio-ocultación acumulados con las dos misiones permiten una cobertura sin precedentes, que permiten estudiar variaciones de temperatura en escalas verticales de apenas 150 metros, así como de las ondas que se propagan en la atmósfera. Por otro lado, los mapas tridimensionales de la temperatura nocturna han sido claves para caracterizar el vórtice que hay en cada uno de los polos y el «collar frío» de densas nubes que lo envuelve. *Venus Express* fue

FIGURA 2. Técnicas de medición de la temperatura y ejemplos de perfiles obtenidos para la atmósfera de Venus: Radio-Ocultación (Imamura *et al.* 2017), Ocultación Estelar (Piccialli *et al.* 2015), Ocultación Solar (Mahieux *et al.* 2015) y Emisión Atmosférica (Garate-López *et al.* 2015). (NASA, ESA)

FIGURA 3. Nuevos fenómenos atmosféricos descubiertos en las nubes superiores (a-g) y profundas (h-l) de Venus: evolución temporal del vórtice del polo sur (a-d), ondas estacionarias (e), veloces filamentos (f), inestabilidades Kelvin-Helmholtz (g-k), el extenso filamento oscuro (h), vórtices a bajas latitudes (i-j), y la discontinuidad ecuatorial (l). Las imágenes fueron tomadas por VIRTIS (a-g), el telescopio de NASA IRTF en Hawái (h), y la cámara IR2 (i-l). (ESA, JAXA, Planet-C)



también determinante para caracterizar las capas altas de la mesosfera y baja termosfera (100-170 km). En el lado diurno las emisiones de fluorescencia del CO_2 y CO captadas por VIRTIS permitieron obtener la temperatura entre 100-150 km, y en el lado nocturno, datos de ocultación estelar con SPICAV proporcionaron perfiles de temperatura entre 90-140 km.

Todos estos descubrimientos nos han ayudado a entender mejor la termodinámica de la atmósfera a todos los niveles, pero han surgido nuevas preguntas, como las ocultaciones solares del instrumento SOIR en el amanecer y anoecer de Venus, que desvelaron que a 120 km existe una región a -173°C donde teóricamente sería posible encontrar nieve de CO_2 . Un nuevo desafío para las futuras misiones.

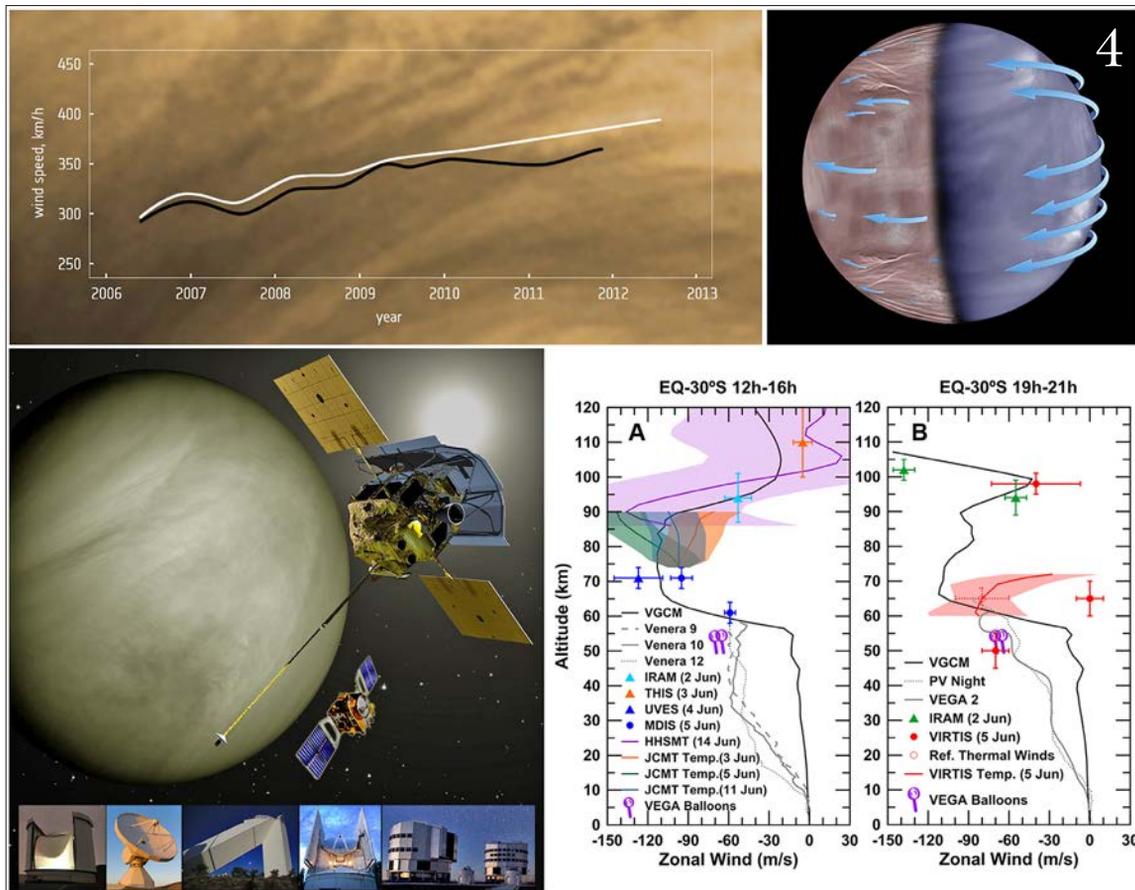
FENÓMENOS INESPERADOS EN LAS NUBES

La atmósfera de Venus está formada principalmente por CO_2 , pero una de las características

principales es que todo el planeta está cubierto por densas nubes de ácido sulfúrico, situadas entre 47 y 70 km de altura, que son claves para el flujo térmico del planeta, reflejando la luz solar y bloqueando la radiación infrarroja de la superficie. Las nubes superiores (56-70 km) suelen observarse en el lado diurno de Venus con imágenes ultravioleta, y son de gran

interés para los astrónomos porque en ellas: Venus absorbe la mayor parte de la energía que le llega del Sol, el viento alcanza su máxima velocidad, y albergan un aerosol que absorbe más de la mitad de esta energía solar (y cuya identidad sigue siendo un misterio tras más de medio siglo).

Gracias a la órbita polar de *Venus Express*, las imágenes visi-



bles y ultravioletas de la cámara VMC desvelaron nuevas estructuras nubosas, una inesperada variedad de ondas atmosféricas con complejas interacciones, y el primer indicio de lo que podría haber sido un cambio climático fuera de nuestro propio planeta: un fuerte cambio en el albedo de las nubes a lo largo de los años, probablemente causado por variaciones en la concentración del absorbente misterioso, y que podrían estar alterando la energía que Venus absorbe del Sol.

Las nubes superiores también pueden observarse en imágenes infrarrojas que han desvelado los sorprendentes cambios de forma del vórtice del polo sur, con movimientos imitando a un tío-

vivo, veloces filamentos y centenares de ondas estacionarias, la mayor de ellas (también la onda estacionaria más grande del Sistema Solar) formándose sobre los montes de Afrodita. Esto ha dado lugar a nuevas preguntas ya que estas ondas misteriosamente no se observan en niveles de nubes intermedios, a pesar de que son generadas en la superficie y se propagan hasta las nubes superiores.

Por último, las nubes profundas (47-50 km) pueden observarse en el lado nocturno en función de su opacidad/transparencia a la emisión térmica proveniente de la atmósfera profunda. Las imágenes infrarrojas de estas han desvelado la existencia

de misteriosos filamentos oscuros que se extienden más de 9000 km de longitud, abundantes fenómenos ondulatorios, inestabilidades Kelvin-Helmholtz y vórtices de hasta 4500 km de tamaño, un hecho sorprendente considerando que la rotación lenta de Venus no genera efecto Coriolis. La sorpresa más reciente ha sido el descubrimiento de una misteriosa discontinuidad (parecida a un «tsunami» nuboso) que se propaga a gran velocidad en el ecuador alterando las nubes profundas y la distribución de aerosoles a su paso. Además, un reanálisis de imágenes antiguas de Venus ha permitido demostrar que esta discontinuidad es un fenómeno permanente que había pasa-

FIGURA 4. Resumen de algunos resultados sobre vientos en Venus: incremento de la velocidad de los vientos superrotantes en las nubes superiores medido con imágenes de VMC (panel superior izquierdo; Khatuntsev *et al.* 2013), episodios de vientos anormalmente lentos en la superrotación del lado nocturno observado con imágenes de VIRTIS (panel superior derecho; Peralta *et al.* 2017a), reconstrucción del perfil vertical de los vientos superrotantes durante el sobrevuelo de *MESSENGER* en junio de 2007 (paneles inferiores; Peralta *et al.* 2017b). En las gráficas se comparan vientos obtenidos con seguimiento de estructuras atmosféricas (MDIS, VIRTIS), vientos Doppler (IRAM, THIS, UVES, HHSMT) y vientos térmicos (JCMT, VIRTIS). Como referencia, también se muestran las medidas *in situ* de los globos *VEGA* en 1985, de algunos módulos de descenso de misiones rusas *Venera* y *VEGA*, y el perfil de vientos predicho con el modelo numérico del Laboratoire de Météorologie Dynamique de París (VGCM). (ESA/NASA)

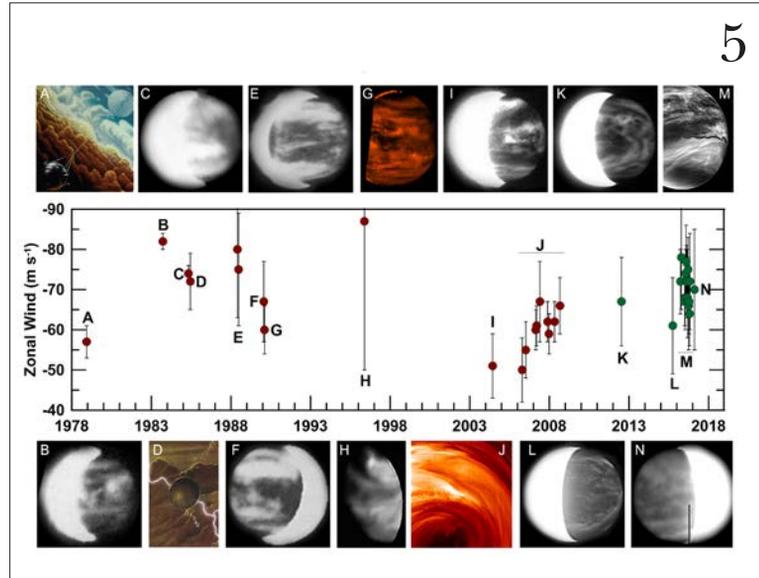


FIGURA 5. Reconstrucción de la variación de los vientos en las nubes profundas de Venus (Peralta *et al.* 2018) combinando datos de mediciones *in situ* de módulos de aterrizaje (A) y globos (D), y mediciones con seguimiento de trazadores nubosos en imágenes captadas desde observatorios terrestres (B, C, E, F, H, I, K, L, N) y las misiones espaciales *Galileo* (G), *Venus Express* (J) y *Akatsuki* (M). (NASA, ESA, JAXA, Planet-C, TNG)

do desapercibido durante más de 35 años, y sospechamos que juega un papel crítico suministrando energía a la superrotación desde la región más profunda de la atmósfera.

REGIONES NUEVAS, VIENTOS NUEVOS

La dinámica de los vientos en la atmósfera es clave para entender el movimiento de superrotación que controla el clima del planeta. Para medir los vientos de forma remota, usamos tres técnicas principales: (a) el se-

guimiento de patrones atmosféricos en imágenes separadas por un intervalo de tiempo, calculando el viento promedio; (b) midiendo el desplazamiento Doppler en espectros de la atmósfera, para obtener la velocidad instantánea del viento (vientos Doppler); y (c) usando la ecuación del viento térmico que permite calcular la velocidad del viento representativo del equilibrio dinámico de la atmósfera a partir de la variación horizontal de la temperatura.

Gracias al elevado número de imágenes de *Venus Express* y *Akatsuki*, se han realizado más de 4 millones de mediciones de viento, lo que ha repercutido en el desarrollo de modelos numéricos y en una mejor comprensión del importante papel que juegan las mareas solares (ondas de escala planetaria excitadas por el calentamiento periódico del Sol) en alimentar la superrotación. Las medidas de viento en el lado nocturno han mostrado episodios en los que la superrotación se vuelve «caótica» en las nubes superiores.

La aparición de un jet ecuatorial en las nubes profundas podría explicar la formación de las inestabilidades y vórtices observados. Imágenes de VIRTIS a 1,27 μm permitieron observar las emisiones de fluorescencia del oxígeno en la parte nocturna y medir los vientos a 95-100 km.

La larga duración de estas misiones ha revelado que los vientos de las nubes superiores aumentaron de 300 a 380 km/h entre los años 2006-2013 y se ralentizaron en 2016, mientras que en el caso de las nubes profundas la combinación con estudios anteriores ha permitido reconstruir los vientos a lo largo de 38 años (desde 1978 hasta 2017), descubriendo variaciones de hasta 100 km/h y aportando más evidencias de un cambio climático en Venus.

UN NUEVO MISTERIO: ¿VIDA EN VENUS?

Si bien Venus y la Tierra probablemente fueron muy similares en el pasado, una evolución tan radicalmente distinta con un efecto invernadero desbocado ha

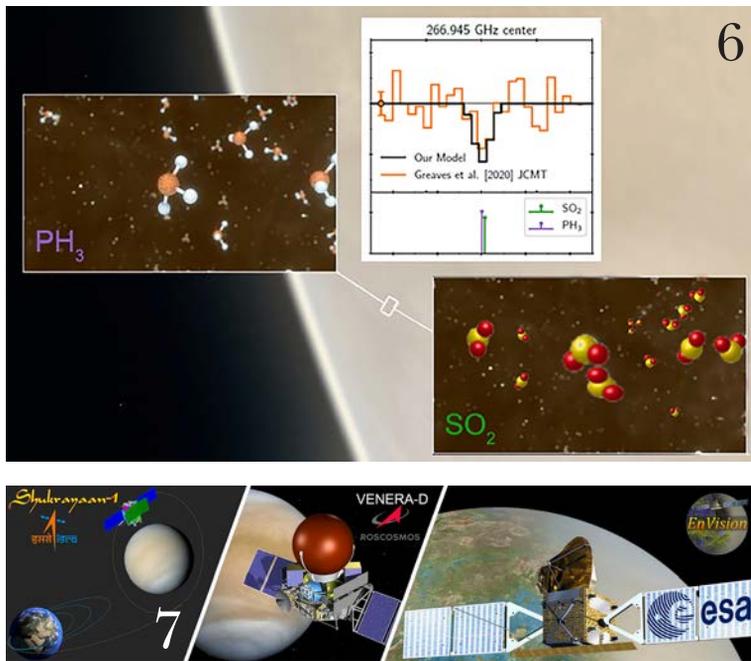


FIGURA 6. Dudas sobre la existencia de fosfano en las nubes de Venus. Un nuevo estudio (Lincowski *et al.* 2021) explica que el fosfano (PH₃) detectado en Venus por el equipo británico (Greaves *et al.* 2020) es probablemente dióxido de azufre (SO₂) ya que las líneas de absorción de ambos compuestos están muy próximas en la región espectral estudiada. (ESO/M. Kornmesser/L. Calçada y NASA/JPL/ Caltech)

FIGURA 7. Algunas propuestas de misiones espaciales a Venus que podrían despegar en los próximos años: la misión india *Shukrayaan-1* (ISRO), la misión *Venera-D* (ROSCOSMOS y NASA) y *EnVision* (ESA). (ISRO, ROSCOSMOS, ESA)

convertido a Venus en uno de los lugares más inhóspitos para la vida en nuestro Sistema Solar, por lo que raramente ha tenido un fuerte interés astrobiológico. Sin embargo, en 2020 saltaron todas las alarmas cuando la publicación de las observaciones desde dos radiotelescopios desveló la presencia de fosfano (PH₃) en la atmósfera de Venus.

La producción de fosfano en la Tierra suele estar asociada a seres vivos, lo que es considerado en astrobiología como un «biomarcador» muy prometedor. Un equipo de investigadores del Reino Unido estaba usando Venus como modelo de «planeta sin vida» para caracterizar futuros exoplanetas, cuando les sorprendió ver en los espectros de Venus una banda de absorción asociada al fosfano. Este gas de producción compleja no debería estar en la atmósfera de Venus y, de aparecer, debería ser destruido por los procesos químicos de las nubes.

Este descubrimiento inesperado y apasionante fue acogido con escepticismo y cautela por parte de la comunidad planetaria y astrobiológica, ocasionando un gran debate que motivó el reanálisis de las observaciones, procesos instrumentales y modelos químicos y biológicos. Solo en el último año han aparecido al menos una decena de publicaciones (algunas todavía en revisión) dudando del procesado de los datos y la interpretación de sus conclusiones. En particular, un efecto conocido como «dilución de la línea espectral» que afecta a las observaciones con los radiotelescopios de ALMA (Chile) puede haber causado una infraestimación de la cantidad de dióxido de azufre (SO₂) en Venus, un gas cuya línea espectral está muy próxima a la del fosfano. Por ahora todo parece indicar que es SO₂ y no fosfano lo que aparece en las observaciones y que el descubrimiento de vida extraterres-

tre tendrá que esperar. Este debate guarda cierto paralelismo con el ocasionado por el metano en Marte, donde la controversia se mantiene después más de quince años. Por tanto, habrá que tener paciencia.

¿QUÉ ES LO PRÓXIMO?

A pesar del impresionante legado de descubrimientos que nos han dejado *Venus Express* y *Akasuki*, Venus sigue siendo un enorme misterio por resolver y hemos avanzado muy poco en el conocimiento de la superficie del planeta. Las imágenes infrarrojas mostraron anomalías térmicas que indican una posible actividad volcánica, pero seguimos sin entender el enorme cataclismo planetario ocurrido hace 600 millones de años y cómo era el planeta antes. Todavía existen lagunas muy importantes en lo que sabemos de la estructura y dinámica de la atmósfera y desconocemos qué ocurre por debajo de los 40 km de altura, una región que supone más del 75 % de la masa total de la atmósfera y donde se acumula la mayor parte de su momento angular y ocurren

procesos químicos aún desconocidos. Tampoco sabemos si existen mecanismos de interacción entre la superficie y la atmósfera de Venus, de gran interés no solo desde el punto de vista geoquímico, sino para entender como la atmósfera puede haber «frenado» o invertido la propia rotación del planeta, ya que la comparación entre imágenes de la misión *Magallanes* y *Venus Express* muestra una reducción en la velocidad de rotación aún por explicar.

El futuro próximo es prometedor. La misión india *Shukrayaan-1* (ISRO) se enviará en 2024 con un orbitador para estudiar la superficie y la atmósfera, y dos globos que circularán en las nubes. La misión *EnVision* es una de finalistas en el proceso de selección M5 de ESA, y consiste en un

orbitador para estudiar la actividad geológica de Venus, e instrumentos específicos para estudios atmosféricos. Por último, la agencia rusa Roscosmos y la NASA colaboran en la misión conjunta *Venera-D*, cuyo lanzamiento está previsto para 2026 o 2031. Esta ambiciosa misión incluye un orbitador para estudiar la superficie y la atmósfera, un módulo de aterrizaje que estudiará la superficie durante al menos 24 horas, y microsátélites que podrían monitorizar continuamente el día y la noche de Venus desde los puntos de Lagrange.

Estas nuevas misiones, y otros muchos proyectos actualmente en estudio, tendrán instrumentación de última generación y harán medidas *in situ* que no se han realizado desde hace más de cua-

renta años. Se prevén nuevos retos tecnológicos y científicos que desafiarán de nuevo las ideas sobre nuestro misterioso vecino. Al fin y al cabo, en Venus *las apariencias engañan*. (A)



Javier Peralta es investigador afiliado al Instituto de Astrofísica e Ciências do Espaço (IA, Portugal), y miembro de las misiones espaciales *Akatsuki*, *Venus Express* y *ARIEL*.

Alejandro Cardesin Moinelo es investigador en el Centro Europeo de Astronomía Espacial (ESAC/ESA), miembro de la misión *Venus Express* y de la Agrupación Astronómica Ío.

SOPORTE KEPLER PARA BUSCADOR POLAR EN LAS MONTURAS AZGTI DE SKY-WATCHER

Kepler
Referencia: KE434

ENVÍOS GRATIS

📍 Calle San Agustín 23, Los Realejos, S/C de Tenerife
☎ 922 34 30 38
📞 676 26 45 38
✉ info@alphacygni.com

Alpha Cygni
ASTRONOMÍA

¡TU TIENDA DE ASTRONOMÍA!
YOUR ASTRONOMY STORE!
www.alphacygni.com