

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN
CIENCIA Y TECNOLOGÍA ESPACIAL**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

***ESTUDIO DE LA ATMÓSFERA DE MARTE CON
IMÁGENES MARCI/MRO Y VMC/MEX DESDE LA
LLEGADA DEL ROVER PERSEVERANCE (M2020)***

Estudiante	<i>Larsen Adiego, Ethan James</i>
Director/a	<i>Sánchez Lavega, Agustín</i>
Departamento	
Curso académico	<i>1^{er} curso</i>

Bilbao, 1 de septiembre de 2022

Índice

1. Introducción	1
1.1. Objetivos	2
2. Marte	3
2.1. Características	3
2.2. Atmósfera	4
3. Misiones a Marte	7
3.1. Mars Express (MEX)	7
3.1.1. Visual Monitoring Camera (VMC)	8
3.2. Mars Reconnaissance Orbiter (MRO)	10
3.2.1. Mars Color Imager (MARCI)	12
4. Análisis de las imágenes	14
4.1. Elkano	14
4.2. MeteoMars	16
4.3. QGIS	17
4.4. Mars Climate Database (MCD)	19
4.5. Métodos de medición	20
5. Resultados	22
5.1. Tormentas identificadas	23
5.2. Tormentas observadas más importantes	26
5.2.1. Tormentas NM1b y AB1a	26
5.2.2. Tormenta VA1	27
5.2.3. Tormenta VA2	29
5.2.4. Tormentas del 30 de marzo	30
5.2.5. Tormentas del 31 de marzo	32
5.2.6. Tormenta NB10+11	34
5.2.7. Tormenta AB12	34
5.2.8. Tormenta VN6	35
5.2.9. Tormenta EB18	36
5.2.10. Tormenta EB22+23	37
5.2.11. Tormenta EB25	38
5.2.12. Tormenta UB27	39
5.3. Distribución de las Tormentas	40
5.3.1. Tormentas más cercanas a Jezero	41
5.3.2. Números de onda	42
6. Interpretación teórica	45
7. Conclusiones	52
8. Apéndice	55

Abstract

En este trabajo se identifican y estudian las tormentas de polvo que se produjeron en el hemisferio norte del planeta Marte durante los primeros meses de estudio del rover Perseverance. Para la identificación de las tormentas se han empleado las imágenes del Visual Monitoring Camera (VMC) a bordo del Mars Express (MEX) y del Mars Color Imager (MARCI) a bordo del Mars Reconnaissance Orbiter (MRO). El objetivo principal de este trabajo es la búsqueda en las imágenes obtenidas por estas cámaras de las inestabilidades producidas en el hemisferio norte del planeta desde la llegada del rover Perseverance (18 de febrero de 2021) hasta el 31 de agosto del mismo año ($L_s = 5.4^\circ - 92.8^\circ$ del año 36 en Marte). En las imágenes estudiadas se han identificado numerosas tormentas de polvo de todo tipo: nubes compactas, espirales de polvo, arcos abiertos, etc. Estos fenómenos atmosféricos observados se mueven hacia el este evolucionando de manera rápida y diaria. Además de identificar y medir estas estructuras, se ha realizado un análisis teórico para entender las inestabilidades que causan estos fenómenos meteorológicos.

1. Introducción

Marte lleva mucho tiempo maravillando al ser humano. A lo largo de milenios, el planeta era otro de los astros del cielo, diferenciado por su color rojizo, cuya luminosidad variaba con el paso de los meses, pero ahora es un planeta al que podemos enviar naves y que podemos estudiar. Este asombro por el planeta vecino nos ha llevado a hacernos varias preguntas: ¿hay o ha podido haber vida en Marte? ¿cómo es la atmósfera del planeta hoy día y por qué ha cambiado tanto con el tiempo?

Para poder dar respuesta a estas preguntas se han enviado numerosas misiones a Marte en las que se han mandado orbitadores, plataformas y rovers. La información obtenida por estas misiones da pie a nuevas ideas relacionadas con la atmósfera del planeta y su clima, a la vez que da más información sobre los ciclos de polvo y las interacciones que se producen entre la atmósfera y la superficie. Además de esto, la información obtenida permite conocer la evolución de la atmósfera del planeta a lo largo de su historia.

Entre los numerosos orbitadores enviados se encuentran los orbitadores Mars Express (MEX) y Mars Reconnaissance Orbiter (MRO). Estas dos naves son importantes para nosotros, ya que para estudiar los fenómenos meteorológicos producidos en la atmósfera marciana se han empleado las imágenes obtenidas por dos de sus instrumentos: el Visual Monitoring Camera (VMC) del MEX y el Mars Color Imager (MARCI) del MRO.

El estudio de las atmósferas de otros planetas es muy importante, ya que aunque se puede estudiar el clima y la meteorología terrestre sin estudiar otros planetas, realizar comparaciones con lo visto en otros planetas puede ayudar a identificar y evaluar los procesos físicos que dan lugar al clima observado y contribuyen en su cambio. Las atmósferas planetarias presentan la oportunidad de poder probar teorías planteadas y de entender los procesos e interacciones que ocurren en sus atmósferas teniendo en cuenta distintas condiciones de contorno. Debido a esto, el planeta Marte siempre ha tenido un papel importante en el estudio comparativo entre él y la Tierra, ya que comparten muchas características fundamentales (son planetas de rápida rotación, tienen una atmósfera relativamente tenue calentada principalmente mediante intercambios radiativos y convectivos con la superficie y ambos tienen estaciones). No obstante, también tienen suficientes

diferencias importantes entre sí que pueden ayudarnos a probar nuestras teorías y la capacidad de los modelos numéricos empleados. Por otro lado, entender las atmósferas de los planetas es fundamental a la hora de conocer el pasado, y por lo tanto la evolución que ha tenido nuestro Sistema Solar, ya que se puede extraer mucha información de su composición, estructura y evolución.

Para poder realizar un estudio de la atmósfera marciana a partir de las imágenes de las cámaras previamente mencionadas ha sido de gran ayuda el conocimiento adquirido en algunas asignaturas del máster en Ciencia y Tecnología Espacial de la UPV-EHU. La que más me ha ayudado en la realización del trabajo es Atmósferas Planetarias. En sus clases aprendimos acerca de las características más importantes de las atmósferas planetarias y adquirimos conocimiento de conceptos importantes que permiten entender los fenómenos observados.

Aunque Atmósferas Planetarias sea la asignatura que más relación tiene con este trabajo, no me puedo olvidar de otras como Física del Sistema Solar, donde se trataba de las características principales de los planetas y de algunas misiones realizadas para el estudio del Sistema Solar. Este conocimiento ha sido de gran utilidad para poder entender cómo ha evolucionado el planeta y cómo eso ha afectado a la atmósfera que hoy día observamos en Marte. Al mismo tiempo, han sido de gran ayuda las asignaturas que se centraban en las comunicaciones realizadas con las naves y el procesamiento de los datos realizado con las imágenes, como son Naves I y Procesado de Datos Espaciales, ya que ese conocimiento me ha permitido entender mejor cómo son las misiones espaciales y cómo se llevan a cabo. Por otro lado, la asignatura de Movimiento Orbital ha sido muy útil a la hora de entender las órbitas en las que se han colocado los orbitadores mencionados y el por qué de esas elecciones.

1.1. Objetivos

El objetivo fundamental de este trabajo es la búsqueda y el estudio de inestabilidades en el hemisferio norte de Marte desde la llegada de Perseverance al cráter Jezero (18 de febrero de 2021) hasta el 31 de agosto de 2021. Para ello, se emplearán las imágenes captadas por la cámara VMC a bordo del MEX y la cámara MARCI a bordo del MRO. Para identificar las distintas tormentas y realizar las medidas correspondientes se han empleado distintos programas y aplicaciones de los que hablaremos más adelante.

En la sección 2 se presenta una breve introducción de Marte, seguida por la sección 3 en la que se comentan brevemente las dos misiones (MEX y MRO) y los instrumentos empleados para tomar las imágenes (VMC y MARCI). En el apartado 4 se verán las aplicaciones empleadas para el análisis de las imágenes. En la sección 5 se expondrán los resultados obtenidos, mientras que en la sección 6 se realizará un estudio teórico para interpretar las tormentas identificadas. Finalmente, en la sección 7 se presentarán las conclusiones de la investigación.

2. Marte

Marte, conocido como el planeta rojo por su apariencia rojiza debido a la naturaleza de su superficie, es el cuarto planeta de nuestro Sistema Solar, y aunque es el planeta que más se ha estudiado hasta la fecha, constituye una de las prioridades en la investigación y exploración espacial. Marte es un planeta muy interesante para estudiar, ya que es un planeta rocoso como el nuestro y se encuentra a una distancia cercana. Una de las razones por las que se ha centrado más la investigación en el planeta rojo que en Venus, segundo planeta del Sistema Solar y que se encuentra más cerca de la Tierra, es la posibilidad de que en su pasado hubiese agua en abundancia en su superficie. La existencia de agua líquida en Marte ha sido y es un tema interesante de debate y tiene fuertes implicaciones en la búsqueda de vida en el Sistema Solar. Al realizar los estudios correspondientes, algunos científicos han llegado a la conclusión de que Marte ha podido tener suficiente agua líquida en su superficie como para que hubiese un sistema hidrológico complejo; y como para formar un océano en las tierras bajas del hemisferio norte que llegase a cubrir una tercera parte de la superficie del planeta [1][2][3].

A su vez, Marte tiene varios valles, volcanes y desiertos similares a los de la Tierra, así como dos casquetes polares, que a diferencia de la Tierra, están compuestos principalmente por CO_2 en estado sólido y agua (en menor cantidad). El planeta rojo también tiene dos satélites naturales de pequeño tamaño y de forma irregular llamados Deimos y Fobos.

2.1. Características

Tabla 1: Tabla comparativa de las características generales de Marte y de la Tierra. [4]

	Marte	Tierra	Relación
Radio ecuatorial (km)	3396	6378	0.53
Día solar (h)	24.66	24.00	1.027
Día sidéreo (h)	24.62	23.93	1.029
Período rotacional sidéreo, Ω ($10^{-5} s^{-1}$)	7.088	7.292	0.972
Año (días terrestres)	687.0	365.25	1.88
Excentricidad ^a	0.0935	0.0167	5.6
Inclinación del eje de rotación (deg) ^a	25.19	23.44	1.075
Aceleración gravitatoria (ms^{-2})	3.71	9.80	0.38

^a Estos parámetros orbitales varían considerablemente más en el caso de Marte que en el caso de la Tierra.

Al comparar las características del planeta rojo con las de la Tierra (tabla 1) se puede ver que Marte es considerablemente más pequeño, de manera que la aceleración gravitatoria también lo es. Por otro lado, cabe destacar que la inclinación del eje de rotación es similar para los dos planetas y que la duración de un día marciano, también denominado sol, es solamente un poco mayor que la duración de un día terrestre.

Al ser la duración del día distinta para ambos cuerpos, el sistema horario más usado en Marte es el Local True Solar Time (LTST o Lt), es decir, el tiempo local solar verdadero. Este sistema horario empleado en el planeta rojo está relacionado con la posición del Sol en el cielo, de manera que cuando éste se encuentre en su posición más alta serán las 12

del mediodía.

Por otro lado, tenemos el parámetro denominado longitud solar (L_s), que indica el ángulo formado por el planeta con el Sol desde un punto de origen situado en el equinoccio de primavera del hemisferio norte ($L_s = 0^\circ$). Por lo tanto, el comienzo del verano se da cuando la longitud solar es $L_s = 90^\circ$, el del otoño cuando $L_s = 180^\circ$ y el del invierno cuando $L_s = 270^\circ$.

Otra diferencia destacable es la excentricidad que tiene la órbita de Marte frente a la de la Tierra, ya que ésta es ~ 5.6 veces mayor que la de la Tierra. Debido a esta excentricidad en su órbita, la duración de las estaciones no es la misma en ambos hemisferios, siendo las primaveras y los veranos más largos en el hemisferio norte que en el hemisferio sur. No obstante, que el hemisferio norte tenga las primaveras y los veranos más largos no significa que estas estaciones sean más cálidas que las mismas en el sur, si no que ocurre todo lo contrario. Las primaveras y los veranos son más fríos en el hemisferio norte que en hemisferio sur, ya que el afelio se produce en $L_s = 71^\circ$ y el perihelio en $L_s = 251^\circ$ [4]. Debido a esto, las condiciones atmosféricas para las mismas estaciones son distintas en ambos hemisferios.

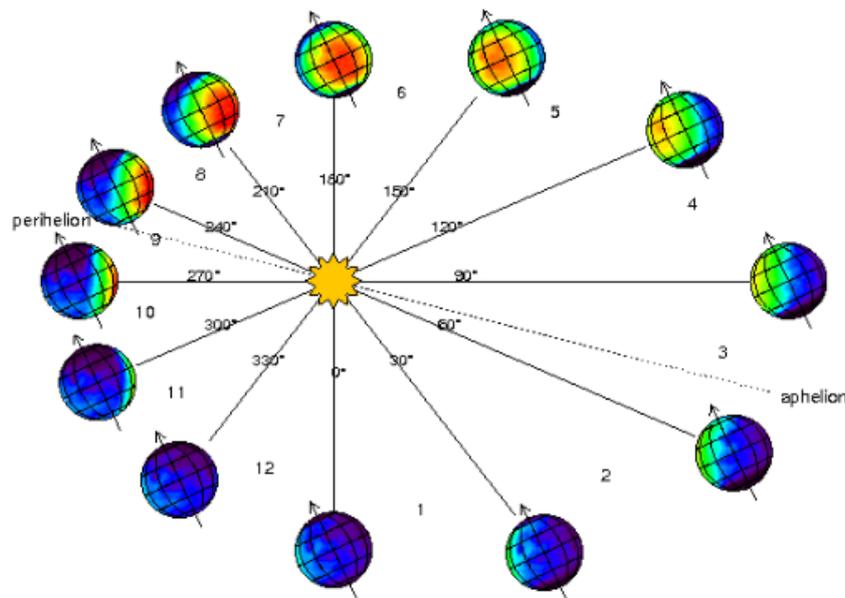


Figura 1: Esquema de la órbita de Marte alrededor del Sol en el que se puede ver la posición del planeta en cada estación y el momento en el que se producen el afelio y perihelio. Imagen sacada de http://www-mars.lmd.jussieu.fr/mars/time/solar_longitude.html.

2.2. Atmósfera

Una de las características más importantes de la atmósfera marciana que no se encuentra en la tabla 1 es la presión superficial media (6.3 hPa), que pese a ser muy variable, es unas 150 veces menor que la presión superficial media terrestre (1013 hPa). Además de esta diferencia notable en la presión superficial media, también hay una diferencia notable en la composición atmosférica del planeta, ya que en el caso de Marte el 96 % de la atmósfera está compuesta por CO_2 , siendo este gas el más abundante, mientras que en la Tierra el más abundante es el N_2 con un 78.1 %.

La dinámica de la atmósfera producida en el planeta está altamente condicionada por las diferencias de insolación entre distintas regiones. Esto se debe principalmente a la inclinación de su eje de rotación de 25.19° . Marte es un planeta rápidamente rotante, de manera que las fuerzas de Coriolis y los gradientes de presión juegan un papel fundamental. Sin embargo, la baja presión atmosférica junto a la baja inercia térmica hacen que la atmósfera esté fuertemente forzada por efectos radiativos. Estos efectos se agudizan con la presión del polvo atmosférico capaz de modificar sustancialmente el comportamiento dinámico de la atmósfera.

La distribución espacial del polvo es muy variable y es producida por un ciclo regular anual y el desarrollo de las tormentas de polvo. Marte es un planeta con una interacción superficie-atmósfera muy importante en la que se ven involucrados 3 ciclos estacionales principales: CO_2 , H_2O y polvo [5]. Las tormentas de polvo constituyen uno de los fenómenos meteorológicos más importantes del planeta y ocurren a distintas escalas, mientras que las nubes de agua y CO_2 se pueden observar en menor medida. Estos tres ciclos están relacionados entre sí, ya que la inyección de las partículas de polvo a la atmósfera presenta una fuente de opacidad frente a la radiación solar, actuando así como un núcleo de condensación para la formación de nubes. Como se puede esperar, esto altera el balance radiativo de manera regional afectando a la dinámica local o a la circulación general (dependiendo de la extensión horizontal que tenga la nube de polvo). Por otro lado, a lo largo de las estaciones la masa de la atmósfera puede variar hasta un 30 % produciendo transportes meridionales importantes de calor, momento y componentes que contribuyen en la formación de las distintas nubes [5].

El estado térmico de la atmósfera marciana es muy sensible a la cantidad y distribución del polvo en suspensión, ya que el polvo absorbe y dispersa eficientemente la energía radiante en el visible. Esta absorción y dispersión resulta en un calentamiento del polvo y a su vez de la atmósfera. Estos efectos de calentamiento y enfriamiento dan lugar a cambios en la distribución de masa, alterando los gradientes de presión produciendo vientos que levantan más polvo a la atmósfera, que se desplaza y deposita en otro lugar.

La superficie de Marte está cubierta por partículas de polvo de distintos tamaños cuyo levantamiento se puede explicar mediante dos procesos principales. Por un lado, tenemos el proceso conocido como saltación. En este proceso el polvo se levanta cuando el viento en la superficie supera un valor umbral ($\sim 4 \text{ m s}^{-1}$ para inyectar partículas de $\sim 10\text{--}100 \mu\text{m}$), levantando partículas de un tamaño superior a la media que recorren una distancia reducida y caen nuevamente. Al impactar contra la superficie, estas partículas inyectan las partículas de menor tamaño a la atmósfera [5]. En algunas ocasiones, el valor umbral no se da como la velocidad que necesita tener el viento para levantar las partículas, si no que se da como la tensión del viento superficial. Distintos modelos de levantamiento de polvo en Marte requieren que esa tensión superficial producida se encuentre en el rango de $0.01\text{--}0.06 \text{ Pa}$ [6]. El otro proceso que puede explicarlo es el levantamiento del polvo por vórtices convectivos. Esto ocurre cuando los gradientes de presión en el vórtice, o la tensión del viento en la superficie alrededor del vórtice, actúan para inyectar polvo a la atmósfera.

También hay que mencionar que las estaciones están ligadas al ciclo de polvo del planeta, de manera que hay una estación polvorienta ($Ls \sim 135^\circ\text{--}360^\circ$) y una estación no polvorienta ($Ls \sim 0^\circ\text{--}135^\circ$). Durante la estación no polvorienta la atmósfera presenta

una baja opacidad a latitudes medias y bajas. No obstante, la estación de primavera en el hemisferio norte se caracteriza por la actividad dinámica atmosférica que se produce en el borde del casquete polar, de manera que opacidades mayores pueden observarse a lo largo del borde del casquete que se reduce con el tiempo [7]. Se piensa que los vientos producidos por grandes gradientes térmicos o por frentes que se mueven a lo largo del borde del casquete juegan un papel esencial en su desarrollo [8]. Estas inestabilidades dinámicas muestran una variedad de morfologías en las imágenes tomadas por las cámaras de los orbitadores, que se pueden clasificar como espirales, arcos (abiertos o cerrados), bandas y nubes texturizadas de distintos tamaños. En ocasiones estas nubes de polvo están acompañadas de nubes de hielo [9].

3. Misiones a Marte

En esta sección hablaremos de las misiones enviadas a Marte cuyos instrumentos se han empleado para obtener las imágenes utilizadas para realizar este trabajo. En lo referente a las misiones, hablaremos de sus órbitas, objetivos y los instrumentos que tienen a bordo. Una vez comentado esto, nos centraremos en los instrumentos empleados en la adquisición de las imágenes manejadas: el Visual Monitoring Camera (VMC) y el Mars Color Imager (MARCI).

3.1. Mars Express (MEX)

La misión Mars Express no es solamente la primera misión de la Agencia Espacial Europea (European Space Agency (ESA)) en ser enviada a Marte, si no que es la primera misión enviada por la agencia a cualquier planeta. La misión constaba de un orbitador estabilizado en 3 ejes con antena de alta ganancia e instrumentos científicos y una pequeña sonda llamada Beagle 2 en memoria del barco de Charles Darwin. Fueron lanzados el 2 de junio de 2003 desde Baikonur y llegaron a Marte el 25 de diciembre del mismo año [10]. Aunque la parte de la misión correspondiente a la sonda fuese un fracaso, ya que no se recibió ninguna comunicación de ella, ésta se pudo enviar porque la ventana de lanzamiento del 2003 era particularmente favorable. Esta ventana era tan favorable que permitía enviar al planeta la máxima masa posible, situación que no se volvería a repetir en 16 años. A pesar de que la parte correspondiente a la sonda fuese un fracaso, el orbitador ha sido muy exitoso y sigue en funcionamiento en la actualidad. MEX es la primera misión “flexible” de la agencia y se desarrolló en un tiempo récord de 5 años desde el concepto al lanzamiento.

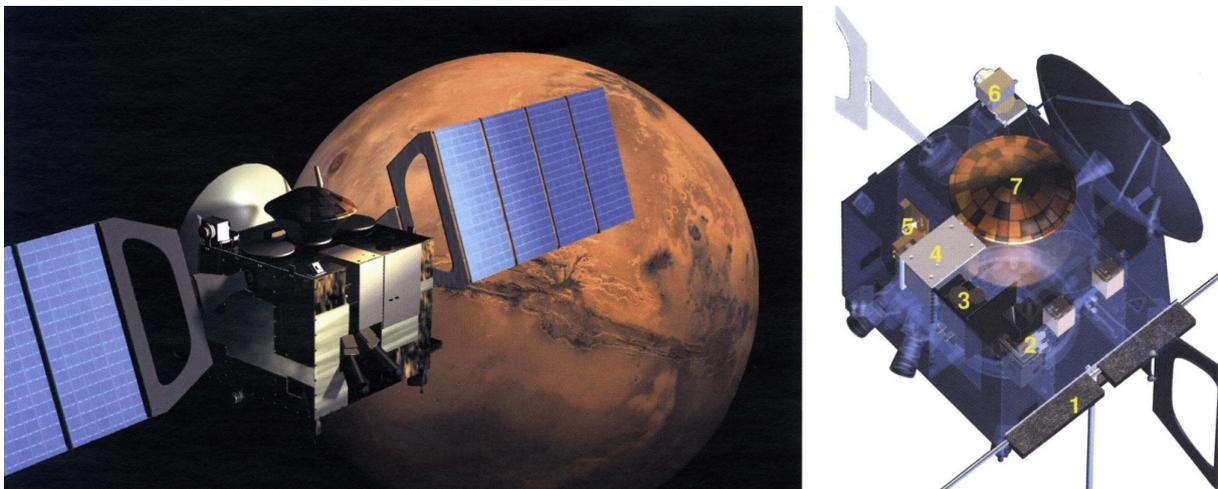


Figura 2: Imagen ilustrativa del orbitador Mars Express con la cápsula Beagle 2 todavía unida. Los números indican la posición de los instrumentos a bordo del orbitador: 1-MARSIS, 2-HRSC, 3-OMEGA, 4-PFS, 5-SPICAM, 6-ASPERA y 7-Beagle 2. [10]

Los objetivos científicos de la misión eran [10]:

- Realizar un mapeo de la superficie con una resolución de hasta 10 m por píxel y de hasta 2 m de las áreas de interés.
- Realizar un mapeo mineralógico global en el infrarrojo.

- Obtener la estructura subsuperficial mediante un radar.
- Estudiar la circulación atmosférica y realizar un mapeo de su composición.
- Estudiar las interacciones de la atmósfera con la superficie y el medio interplanetario.
- Deducir información de la atmósfera, ionosfera, superficie y el interior de Marte.

Para poder realizar esto, el orbitador se colocó en una órbita elíptica polar con un período de $\sim 7.5 h$, pericentro de $\sim 300 km$ y apocentro $\sim 10000 km$ [7]. Los instrumentos científicos que permiten estudiar la atmósfera, la superficie, la subsuperficie y el interior del planeta son [10][11]:

- HRSC (High Resolution Stereo Camera) - Permite obtener imágenes de todo el planeta en color con una resolución de 10 m por píxel y de hasta 2 m en las zonas de interés.
- OMEGA (Visible and Infrared Mineralogical Mapping Spectrometer) - Realiza un mapeo mineralógico de la superficie del planeta.
- MARSIS (Sub-surface Sounding Radar Altimeter) - Permite realizar un mapeo de la estructura subsuperficial hasta unos pocos kilómetros de profundidad.
- PFS (Planetary Fourier Spectrometer) - Determina la composición y estructura de la atmósfera marciana midiendo la luz absorbida y radiación emitida por las moléculas en el rango $1.2 - 45 \mu m$.
- SPICAM (Ultraviolet and Infrared Atmospheric Spectrometer) - Determina la composición de la atmósfera midiendo la luz que la atraviesa.
- ASPERA (Energetic Neutral Atoms Analyser) - Mide los iones, electrones y átomos energéticos neutros en la alta atmósfera para identificar el número de átomos de hidrógeno y oxígeno que interactúan con el viento solar determinando dónde se producen estas interacciones.
- MaRS (Mars Radio Science Experiment) - Permite derivar la estructura interna de la atmósfera neutra y la ionosfera a la vez que obtener información del interior del planeta.

Además de haber estudiado el planeta rojo, MEX ha podido realizar otras operaciones no previstas en el planteamiento de la misión, como la de estudiar el satélite Fobos. Debido a esto y a que la misión sigue en activo, la misión Mars Express se puede considerar como una de las misiones más exitosas de la agencia y de la exploración del planeta.

3.1.1. Visual Monitoring Camera (VMC)

El instrumento VMC es una cámara pequeña a bordo del MEX cuyo objetivo era proporcionar una telemetría visual de la separación de la sonda Beagle 2 del orbitador. Por esa razón, al no contarse como un instrumento científico (a primera instancia), una vez cumplida su función de proveer la telemetría de la sonda, la cámara fue apagada. No obstante, en el año 2007 se volvió a encender para que tuviera una finalidad divulgativa,

convirtiéndose en la “webcam de Marte” [12].

VMC es una cámara de tipo CMOS de 640×480 píxeles con una visión de campo de $30^\circ \times 40^\circ$ que emplea un sensor IRIS-1 capaz de producir imágenes de 640×480 píxeles con una profundidad de muestreo de 8 bits por píxel [12]. Estas características son muy similares a las de la webcam de un ordenador. Lo único que difiere de una webcam normal, es su localización, ya que en vez de estar en el ordenador de una vivienda se encuentra en una nave orbitando Marte.



Figura 3: Cámara VMC como la que se envió a Marte en el orbitador MEX con su protector de lente (tapón rojo) y un euro para escala. [12]

La cámara tiene una masa de 430 g y sus dimensiones son de $65 \times 60 \times 180\text{ mm}$ [12]. Al ser tan pequeña y ligera, el impacto que tiene añadir una cámara adicional de estas características a la nave se ve reducido. El tiempo de exposición de la cámara está dividido en dos rangos: por un lado está el que va de 0.4 ms a 162.8 ms con saltos de 0.8 ms , mientras que por el otro pasa de 200 ms a 95800 ms dando saltos de 400 ms [12]. Sin embargo, se encontró que el planeta era más brillante de lo esperado, de manera que al emplear los tiempos de exposición mayores las imágenes se saturaban.

Como la cámara VMC no forma parte de los instrumentos científicos principales de la misión, cuando se volvió a poner en marcha, se indicaron las condiciones que se debían cumplir para que la cámara se pudiera utilizar. Estas restricciones se pusieron para asegurarse de que las actividades de observación llevadas a cabo no afectasen a las observaciones realizadas por los otros instrumentos. Las restricciones impuestas son las siguientes [12]:

- Aunque la demanda de potencia de la cámara es muy baja (aproximadamente de 3 W) comparada con la consumición media de los otros instrumentos (típicamente de $\sim 30\text{ W}$ para cada instrumento y de $\sim 350\text{--}400\text{ W}$ para el equipo de la plataforma), la potencia consumida no debe afectar a los demás instrumentos.
- Aunque las imágenes capturadas son bastante compactas y solamente ocupan 302 kb por imagen, si se toman varias imágenes en una secuencia, el volumen de información acumulado puede ser no despreciable. Por eso, se tiene que organizar para que la memoria de la nave pueda almacenar las imágenes tomadas.

- Al tener un número reducido de oportunidades de comunicarse con MEX y al ser la memoria de la nave finita, hay un límite en el número de comandos que se le pueden enviar, ya que cada imagen requiere como mínimo un comando.
- Como la cámara se encuentra inclinada 19° con respecto a los demás instrumentos, se necesita una orientación especial para que apunte al centro del planeta. Esta orientación es incompatible con las orientaciones que se necesitan para las comunicaciones y la misión científica, de manera que hay que controlar cuándo se puede observar el planeta.
- Debido a la interferencia de datos que se produce al emplear la cámara, ésta no se puede emplear al mismo tiempo que los demás instrumentos. Esto se debe a que la cámara envía sus datos sin importar la información que esté en espera, de manera que la información del VMC bloquea la transmisión de datos de los instrumentos científicos.

Aunque desde el año 2007 la cámara VMC se emplease con un fin divulgativo, se empleó por primera vez como instrumento científico en el año 2016 gracias a la iniciativa del profesor Sánchez-Lavega [13]. Desde entonces, las imágenes tomadas por VMC han servido para complementar la información obtenida por los demás instrumentos y para realizar estudios científicos.

3.2. Mars Reconnaissance Orbiter (MRO)

El Mars Reconnaissance Orbiter es uno de los orbitadores enviados al planeta rojo que forma parte del programa de exploración espacial de la NASA. La nave se lanzó al espacio el 12 de agosto de 2005 y entró de manera exitosa en la órbita marciana el 10 de Marzo de 2006. Ese mes comenzó la fase de aerofrenado que finalizó el 30 de agosto del mismo año y permitió adquirir la órbita deseada para realizar la misión (órbita más circular y de período más corto) [14]. Después del aerofrenado, el satélite entró en una órbita heliosíncrona, casi circular y polar, de baja altura ($\sim 300 \text{ km}$), en la que la hora local observada siempre se encuentra entorno a las 15:00 [4][14].

El objetivo del MRO es estudiar la geología y el clima de Marte, a la vez que proporcionar un reconocimiento de futuros lugares de amartizaje en términos de seguridad y en términos de descubrimientos futuros. Adicionalmente, es una misión que ayudará en la transmisión de la información obtenida por misiones en la superficie del planeta [14]. Entre los objetivos relacionados al clima están el observar los ciclos estacionales, observar las variaciones diarias de agua, polvo y CO_2 , y caracterizar la estructura y circulación atmosférica global del planeta y los cambios superficiales que esclarezcan factores que controlan la distribución del agua y del polvo en los procesos de transporte eólico.

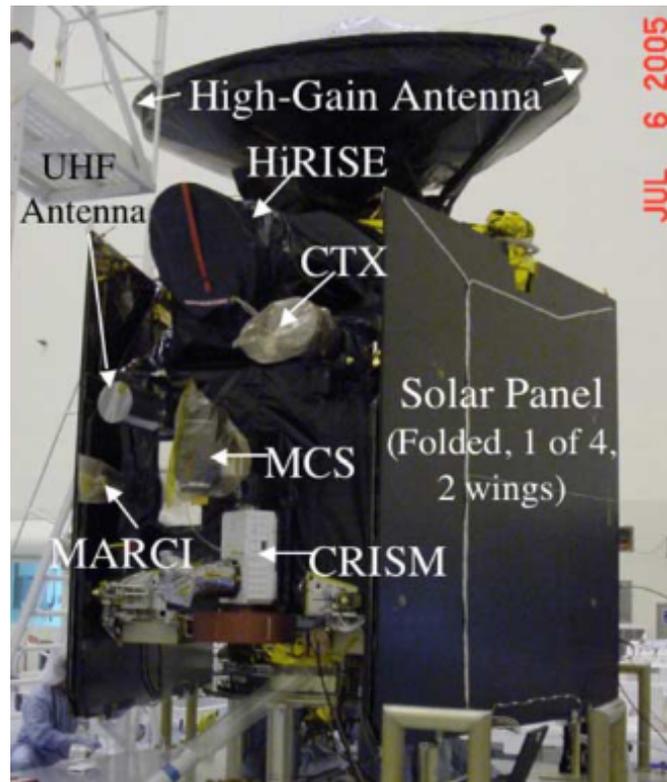


Figura 4: MRO en las instalaciones del Kennedy Space Center antes de integrarlo al lanzador ATLAS V. En la imagen se pueden ver la antena de alta ganancia, los paneles solares y los instrumentos científicos que tiene la nave. [14]

Para poder cumplir sus objetivos, el orbitador tiene seis instrumentos que sirven como complemento y extienden la capacidad de las demás misiones enviadas al planeta. Estos instrumentos son [14][15]:

- HiRISE (High Resolution Science Experiment) - Permite identificar objetos de pequeña escala en la superficie, siendo capaz de obtener imágenes de la superficie con una precisión de 0.3 m por píxel. Obtener imágenes con esta precisión revela detalles de las estructuras geológicas de los cráteres, cañones y depósitos estratificados del planeta.
- CTX (Context Camera) - Proporciona vistas con un campo amplio que permite proporcionar contexto para un análisis de alta resolución en zonas claves.
- MARCI (Mars Color Imager) - Permite monitorizar las nubes de hielo y las tormentas de polvo de la atmósfera.
- CRISM (Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars) - Emplea detectores en el visible, infrarrojo y en el infrarrojo cercano para identificar y realizar un mapeo de los minerales en la superficie. Su resolución puede ser de hasta 18.4 m por píxel.
- MCS (Mars Climate Sounder) - Observa la atmósfera en el rango del visible y del infrarrojo para medir la temperatura, la humedad y el contenido de polvo de la atmósfera en intervalos de 5 km .

- SHARD (Shallow Radar) - Permite realizar un sondeo de hasta un metro de profundidad de la superficie del planeta con la finalidad de buscar agua en estado sólido bajo la superficie.

3.2.1. Mars Color Imager (MARCI)

MARCI es una cámara con una CCD multiespectral con un campo de visión de 180° diseñada para obtener imágenes en 7 bandas espectrales de la superficie y atmósfera marciana. De estas 7 bandas, 5 se encuentran en el visible y en el infrarrojo cercano (437, 546, 604, 653, 718 nm) y dos en el ultravioleta (258, 320 nm) [16]. Por otro lado, el detector CCD empleado por el instrumento es un Kodak KAI-1001 de 1024×1024 píxeles de $9 \mu m$. Esta CCD tiene una sensibilidad baja si se compara con otras, pero al ser la óptica de la cámara lo suficientemente rápida, se puede utilizar de manera eficaz [16].

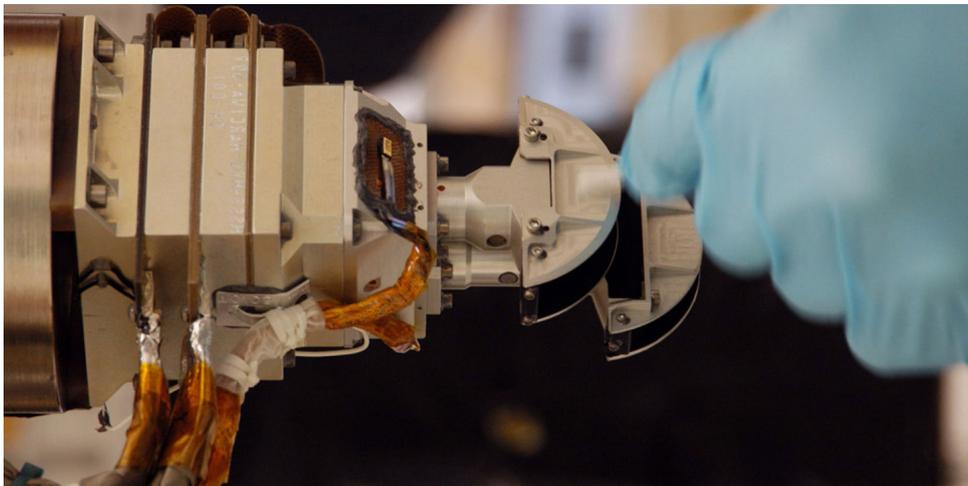


Figura 5: Ensamblaje de la cámara y la electrónica de MARCI mostrado con una mano para escala. Imagen obtenida de la página <https://mars.nasa.gov/mro/mission/instruments/marci/>.

MARCI es una cámara de baja masa (481 g), bajo consumo de potencia ($< 5 W$ teniendo en cuenta la pérdida de potencia al tomar imágenes) y de dimensiones $9.2 \times 7.2 \times 14.0 \text{ cm}$. Como se puede ver en la imagen 5, tiene dos juegos de óptica, que tienen el mismo campo de visión, pero una está optimizada para las bandas del ultravioleta, mientras que la otra está optimizada para las 5 bandas del visible y del infrarrojo cercano. Las observaciones en el ultravioleta sirven para detectar variaciones en el ozono, polvo o CO_2 en la atmósfera, mientras que las observaciones en el visible permiten observar las tormentas de polvo y los cambios en el casquete polar [16].

Los objetivos científicos de la investigación MARCI son [16]:

- Observar diariamente los procesos atmosféricos a escala global.
- Estudiar en detalle la interacción de la atmósfera con la superficie.
- Examinar características superficiales de la evolución del clima de Marte.
- Obtener una cobertura global con resoluciones de $1 - 10 \text{ km}$ por píxel.

- Distinguir las nubes de distintas composiciones (agua, hielo de CO_2 y polvo) que se forman.
- Observar el ozono de la atmósfera marciana.

Para poder realizar todo esto, cada vez que MRO orbita el planeta (~ 12 órbitas completas por día [16]), MARCI toma una imagen en las 7 longitudes de onda, de manera que al cabo del día se tienen unas 84 imágenes para analizar.

Como dato adicional, mencionar que originalmente este instrumento se había incluido a bordo del Mars Climate Orbiter (MCO). No obstante, este orbitador se perdió cuando entró en la órbita de Marte en 1999, debido a que entró a una altura demasiado baja por un error de navegación [4].

4. Análisis de las imágenes

A lo largo de esta sección veremos cuáles han sido los programas y aplicaciones que se han empleado para realizar el análisis de las imágenes obtenidas por las cámaras previamente mencionadas. A continuación hablaremos de los métodos empleados para realizar las medidas correspondientes.

4.1. Elkano

Elkano es una aplicación desarrollada en el grupo de Ciencias Planetarias [17] que permite coger las imágenes captadas por la cámara VMC y trabajar con ellas tomando posiciones y realizando medidas. No obstante, antes de trabajar con las imágenes tenemos que seleccionarlas. Para ello, disponemos de una galería que nos permite navegar por las imágenes seleccionando aquellas que nos interesan. Esta galería contiene imágenes que se han tomado desde el año 2007, pero como ya se ha mencionado anteriormente, solamente nos interesan las imágenes tomadas a partir de la llegada del rover Perseverance al planeta. Además, hay una opción que permite obtener una combinación de las imágenes tomadas en las series en las que se sacan las imágenes. Esta característica puede ser de ayuda a la hora de estudiar los fenómenos meteorológicos que captura la cámara.

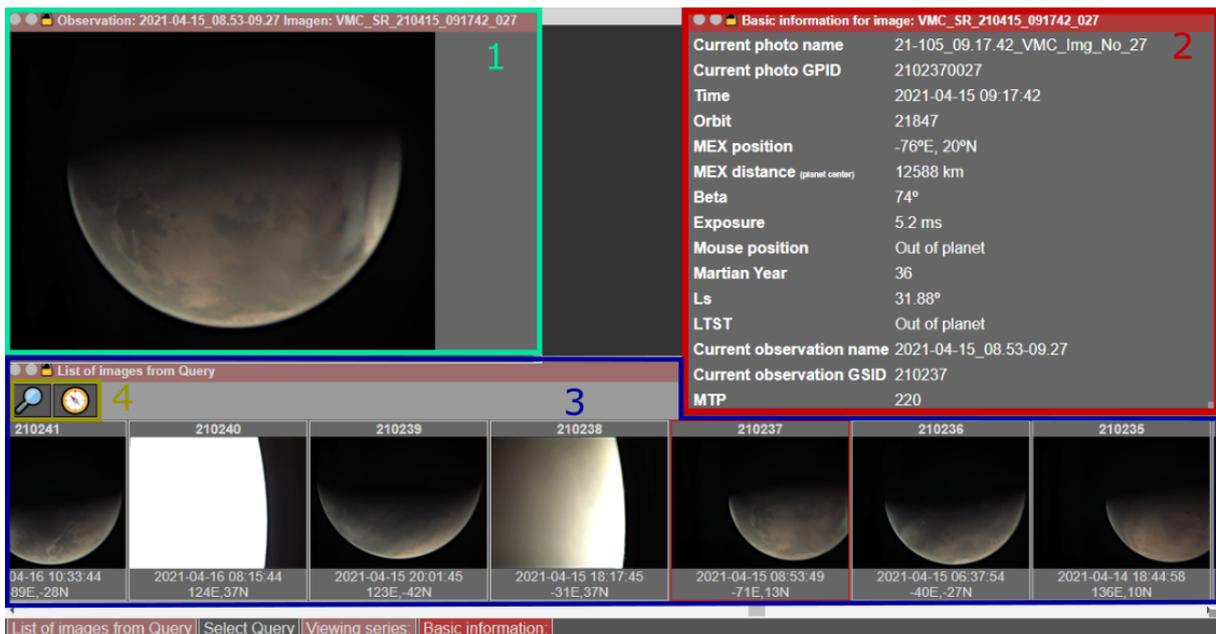


Figura 6: Captura de pantalla de la interfaz de la galería con las imágenes tomadas por VMC dividida en 4 secciones.

En la figura 6 vemos la interfaz de la galería. Como se puede ver, es una interfaz muy sencilla y fácil de manejar con 4 secciones distintas. Cada sección tiene una función que explicaremos a continuación.

La primera sección marca la ventana que muestra la imagen que estamos observando. En la parte superior de esta ventana aparece el nombre de la imagen junto a la fecha en la que se ha tomado.

En el segundo recuadro, marcado con el color rojo, tenemos la ventana que contiene la información básica de la imagen que estamos viendo en la primera sección. Las características que se muestran en esta ventana son:

- El nombre y el GPID de la imagen.
- La fecha y hora terrestre en la que se ha tomado la imagen.
- El número de veces que ha orbitado el Mars Express antes de tomar la imagen.
- La posición que tiene el orbitador (MEX) y la distancia a la que se encuentra del centro del planeta.
- El ángulo que abarca el planeta visto desde el espacio (Beta).
- El tiempo de exposición empleado para la captura de la imagen.
- La característica “mouse position” permite navegar la imagen de la primera sección, de manera que al situar el cursor en un punto cualquiera del planeta muestra la longitud y la latitud de esa localización.
- LTST nos muestra la hora solar verdadera en el punto marcado.
- El año marciano en el que se está y la longitud solar del planeta.
- El nombre asignado a la observación realizada y a la GSID actual, que nos muestra a qué serie de imágenes pertenece la imagen.

A continuación tenemos la tercera sección que permite navegar de manera sencilla las imágenes tomadas utilizando el teclado del ordenador. Si se emplean las flechas arriba y abajo, podemos navegar por las fotos de la serie de imágenes seleccionada, mientras que si se emplean las flechas derecha e izquierda, podemos navegar entre las series de imágenes.

Por último, tenemos la sección marcada por el rectángulo amarillo en la que se muestra una lupa y una brújula. La lupa nos permite seleccionar el año en el que las imágenes han sido tomadas, permitiéndonos navegar por todas las imágenes tomadas a lo largo de ese año, mientras que la brújula abre otra pestaña que nos permite trabajar con la imagen seleccionada. En la figura 7 se ve la pestaña que abre, en la que aparecen unos puntos marcados tanto en la imagen como en el mapa proporcionado.

En el primer recuadro volvemos a ver la información básica de la imagen, pero en este caso tenemos unos parámetros nuevos que no aparecían en el recuadro anterior. Estos parámetros nuevos son la altitud a la que se encuentra el cursor, el ángulo cenital solar¹ y la resolución.

En el segundo recuadro se muestra el mapa de la superficie marciana. Esta ventana tiene diferentes opciones, de manera que podemos ver Marte mediante una proyección equirectangular o vista desde los polos. En la figura 7 se ve un mapa de albedo, pero

¹El ángulo cenital solar es el ángulo entre los rayos del sol y la dirección vertical. Este ángulo está estrechamente relacionado con el ángulo de latitud solar, que es el ángulo entre los rayos del sol y un plano horizontal.

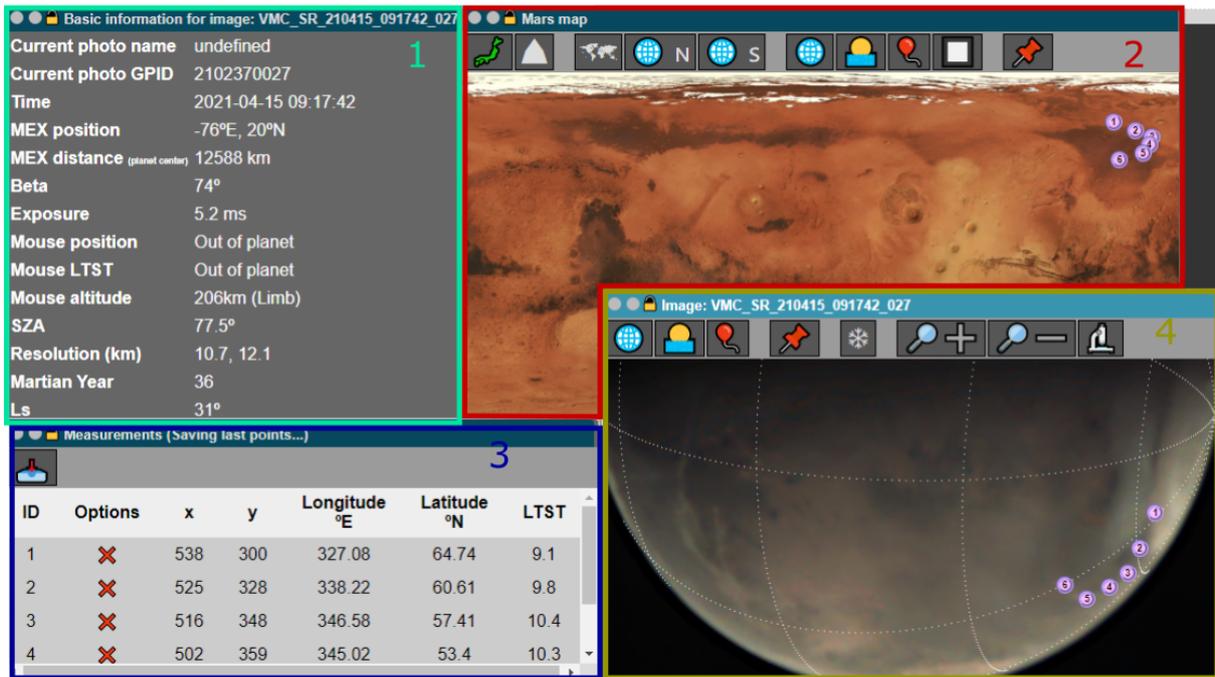


Figura 7: Captura de pantalla de la interfaz de la aplicación Elcano dividida en 4 secciones.

también hay un mapa topográfico disponible. Además, se le puede añadir una malla que marque la longitud y latitud y se pueden marcar el terminador y el limbo. También se puede ver la posición en la que se encuentran los puntos marcados en la imagen de la sección 4.

La tercera sección nos muestra la ventana de medidas, dónde se señalan los puntos marcados en la imagen junto a su posición, longitud, latitud y hora local solar verdadera. También hay una opción que permite borrar los puntos seleccionados. Para ello, lo único que se tiene que hacer es marcar la X roja de la ventana.

Finalmente, tenemos la sección 4, ventana que muestra la imagen seleccionada en la galería y nos permite marcar los puntos de interés. Como se ha mencionado previamente, los puntos que se marcan en esta ventana también se marcan en el mapa del planeta. Al igual que en la segunda ventana, se le puede colocar una malla que señale las distintas latitudes y longitudes, y se pueden marcar tanto el terminador como el limbo del planeta. Las demás herramientas que aparecen nos permiten indicar la posición de los polos y aumentar o disminuir la imagen.

4.2. MeteoMars

MeteoMars es un proyecto de educación e investigación promovido por el Planetario de Pamplona y el grupo de investigación de Ciencias Planetarias de la Universidad del País Vasco (UPV-EHU). Esta aplicación permite explorar las imágenes tomadas por la cámara MARCI mediante una interfaz sencilla (figura 8) [18].

Aunque tal y como se ha mencionado anteriormente en el apartado 3.2.1, las imágenes que se obtienen mediante la cámara MARCI tienen una resolución de 1 km por píxel (en nadir), las imágenes mostradas en esta aplicación tienen una resolución de 10 km por píxel [18]. Esta reducción en la resolución se realiza para que la velocidad de carga de

las imágenes sea mayor, de manera que sea más fácil y accesible trabajar con la aplicación.

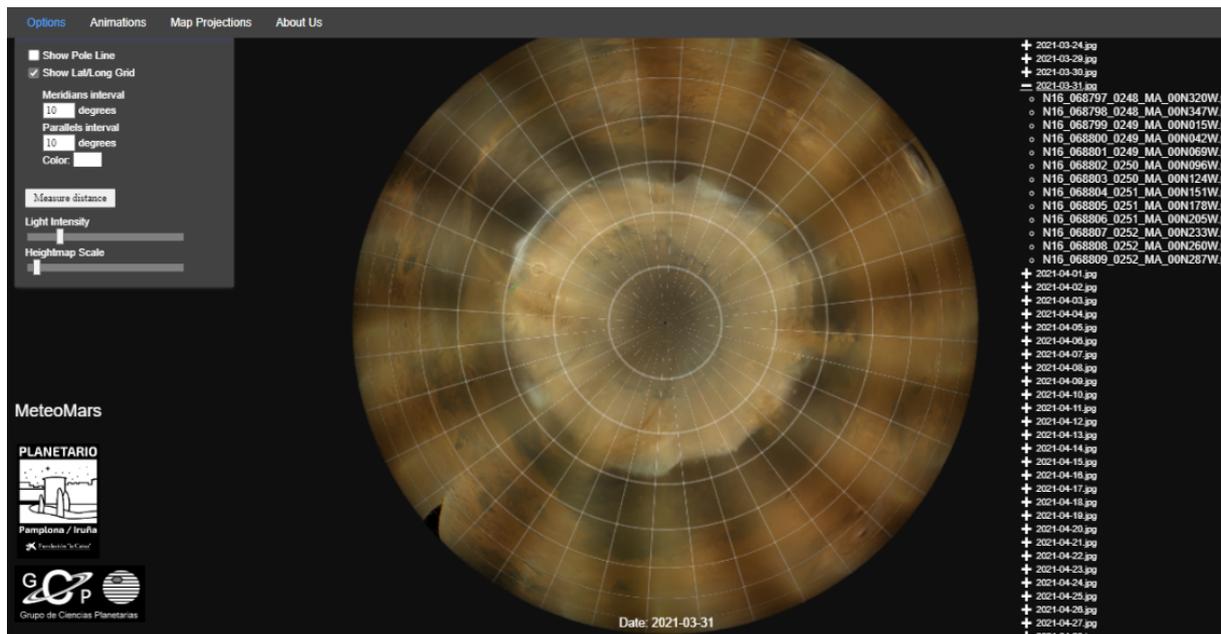


Figura 8: Captura de pantalla en la que se muestra la interfaz de la aplicación MeteoMars.

Como se puede apreciar en la figura 8, las imágenes tomadas a lo largo de un día se colocan sobre el globo marciano. De esta manera, se pueden observar con facilidad los fenómenos meteorológicos que ocurren. A su vez, el globo se puede mover facilitando así la búsqueda de tormentas u otros fenómenos de interés. Además, como al superponer todas las imágenes tomadas a lo largo de un día se pueden perder detalles de algunos fenómenos, existe la opción de observar gajos o franjas individuales proyectadas sobre el globo (cada gajo es una imagen tomada por MARCI).

Una ventaja de poder utilizar esta aplicación es poder observar los cambios meteorológicos que ocurren en el planeta de un sol a otro sin perder la perspectiva ni la localización del área de estudio. Para ello, además de mirar las imágenes sobre el globo, también se pueden estudiar las imágenes teniendo en cuenta distintas proyecciones (equirrectangular, esférica, etc.).

Por otro lado, también se puede colocar una malla que muestra las distintas longitudes y latitudes y se puede obtener la distancia mínima que hay entre 2 puntos seleccionados. No obstante, los valores de las medidas realizadas con el sistema de medición solamente vienen dadas en unidades del radio del planeta, de manera que si queremos las medidas realizadas en otra unidad, tenemos que realizar el cálculo correspondiente.

4.3. QGIS

QGIS es un sistema de información geográfica de software libre y código abierto que permite analizar y realizar medidas sobre imágenes de manera sencilla, además de poder crear, editar, manejar y exportar información.

Para analizar las imágenes, lo primero que tenemos que hacer, a parte de elegir los gajos que queremos analizar de la aplicación de MeteoMars, es georreferenciar² los datos de las imágenes. Para ello, cargamos la imagen sobre la que queremos trabajar y colocamos 4 Puntos de Control del Terreno (PCT). Al hacer eso, la imagen es ajustada, de manera que cuando colocamos el cursor sobre ella nos proporciona la latitud y longitud de dicho punto. Estos 4 puntos los colocamos en las 4 esquinas de la imagen de tal manera que los laterales de las imágenes correspondan a la longitud 0 *E*, mientras que la parte superior corresponda a la latitud 90 *N* y la inferior a -90 *N*.

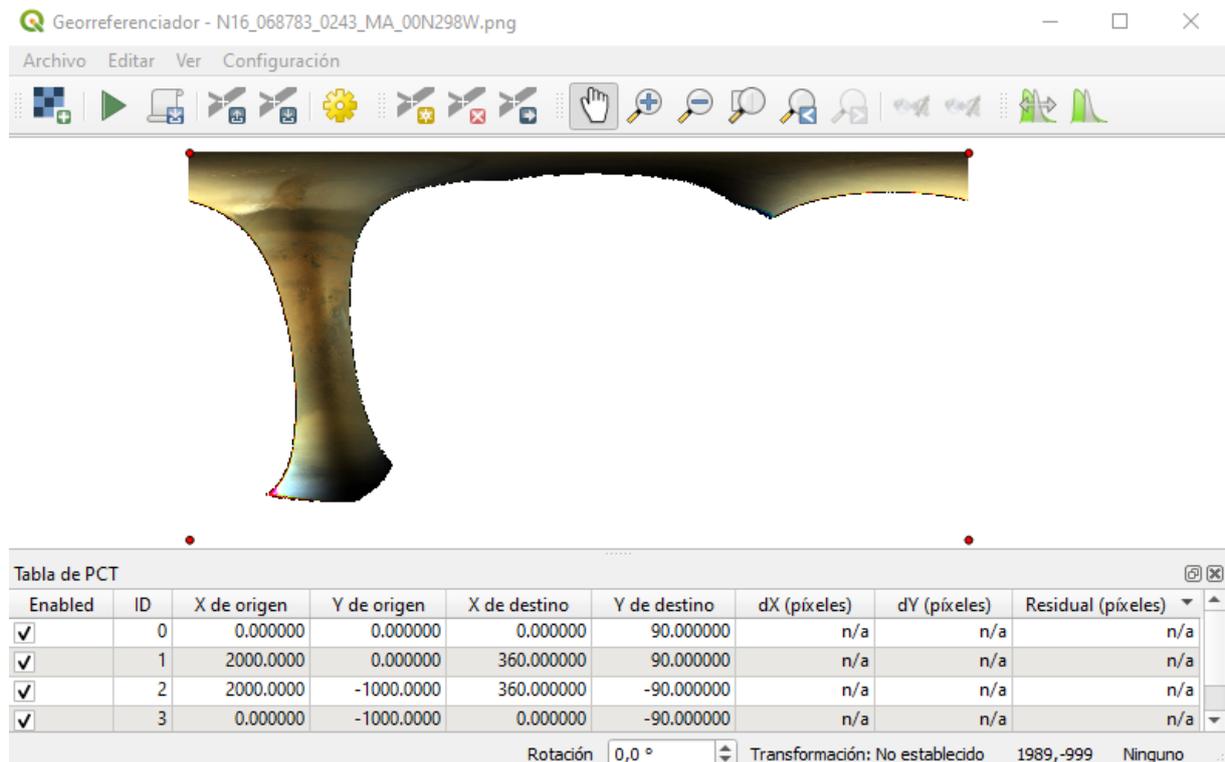


Figura 9: Imagen que muestra dónde se colocan los Puntos de Control del Terreno en el sistema QGIS a la hora de georreferenciar las imágenes para poder trabajar sobre ellas.

Sin embargo, esto no es suficiente para realizar las medidas sobre las imágenes, ya que no se ha especificado el tipo de elipsoide que se va utilizar. Al no especificar el tipo de elipsoide, por defecto, las distancias que se obtendrían entre dos puntos sería la distancia que habría entre dos puntos con misma latitud y longitud en la Tierra. Para poder cambiarlo, modificamos las propiedades del proyecto tomando como elipsoide la elipsoide Mars 2000 IAU IAG (ESRI:107905).

En la figura 10 se muestra una captura de pantalla de la interfaz del programa separada en 5 secciones.

La primera sección nos marca la barra de herramientas principal. Ésta nos da acceso a las funciones de QGIS mediante un menú jerárquico que permite crear un proyecto, examinar sus propiedades, exportarlo, etc.

²La georreferenciación es el proceso de asignar coordenadas del mundo real a cada píxel del raster.

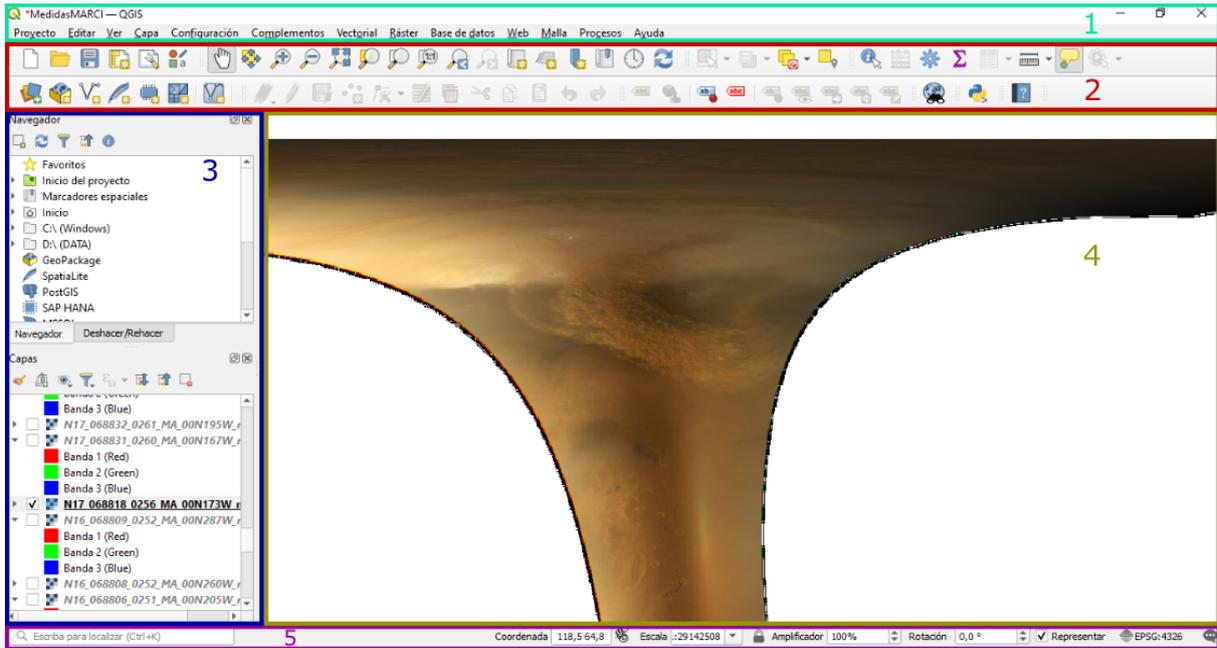


Figura 10: Captura de pantalla del programa QGIS en la que se muestra la interfaz gráfica dividida en 5 secciones distintas.

La segunda pertenece a la barra de herramientas secundaria. Esta barra da acceso a la mayoría de las funciones de la barra de herramientas principal más otras que permiten interactuar con las imágenes. Las herramientas de esta barra se pueden mover, mostrar u ocultar dependiendo de nuestras necesidades.

La tercera sección pertenece a dos de los paneles o widgets especiales disponibles y con los que se puede interactuar para realizar tareas más complejas. Estos widgets permiten tener información de las capas y navegar por los archivos locales y otras fuentes de datos.

La cuarta sección muestra la ventana de visualización en la que se presentan las capas seleccionadas y permite trabajar con ellas.

Por último, está el recuadro que contiene la barra de estado. Esta barra es fundamental, ya que nos muestra información importante, como las coordenadas geográficas sobre las que se encuentra el cursor. El código que aparece en el extremo derecho representa el sistema de referencia de coordenadas.

4.4. Mars Climate Database (MCD)

Para realizar el análisis teórico de las tormentas de polvo que se encuentra al final de este trabajo, se ha empleado una de las herramientas utilizadas en la asignatura Atmósferas Planetarias del máster, la herramienta Mars Climate Database (MCD). Se trata de una base de datos desarrollada por Laboratoire de Métrologie Dynamique (LMD) que proporciona mapas y gráficos meteorológicos basados en simulaciones numéricas de modelos de circulación general de la atmósfera marciana, que luego son validadas usando los datos observacionales disponibles [19][20].

Mediante esta base de datos se puede conseguir una gran cantidad de información dependiendo de las necesidades que se tengan, ya que el programa permite obtener la información correspondiente a regiones y alturas concretas para distintos días. Al mismo tiempo, el programa se puede utilizar para conocer las posiciones de los distintos rovers que se encuentran en el planeta y para conocer la fecha marciana introduciendo la fecha terrestre. Además, podemos llegar a conocer la longitud solar del planeta.

Esta base de datos la utilizamos para establecer una comparación entre los fenómenos meteorológicos observados y las predicciones dadas por la aplicación. Esta comparación permite averiguar cuáles son los procesos físicos que se producen en la atmósfera de Marte. Para ello, los parámetros que se han tenido en cuenta al final de este trabajo son la temperatura de la atmósfera, el viento horizontal y la tensión superficial producida por el viento.

4.5. Métodos de medición

En primer lugar, vamos a describir cómo hemos analizado las imágenes tomadas por la cámara VMC seleccionadas. Para ello, como ya hemos explicado anteriormente, emplearemos la aplicación Elcano. No obstante, esta aplicación solamente permite conocer la localización de los puntos marcados en la imagen y no nos da la distancia que hay entre ellos. Sin embargo, conocer las latitudes y las longitudes nos va a permitir medir las distancias entre los puntos, de manera que podremos medir las dimensiones que tienen las tormentas de polvo.

Para conocer la extensión de las tormentas tenemos que calcular dos parámetros: la longitud zonal (L_x) y la longitud meridional (L_y). Para obtener estos valores, es necesario conocer entre qué latitudes y longitudes se encuentra confinada dicha tormenta. Esto se puede obtener fácilmente en la aplicación marcando la tormenta y viendo cuáles son los valores máximos y mínimos de latitud (φ_{max} , φ_{min}) y de longitud (ϕ_{max} , ϕ_{min}). Una vez conocidos estos valores, los valores de L_x y L_y se pueden obtener de manera sencilla empleando las relaciones

$$L_x = R_M \cdot \cos\varphi_{min} \cdot (\phi_{max} - \phi_{min}) \quad (1)$$

y

$$L_y = R_M \cdot (\varphi_{max} - \varphi_{min}). \quad (2)$$

Además de conocer los valores de la longitud zonal y meridional, en algunos casos nos va a interesar conocer la longitud que tengan los distintos arcos que se han observado en las imágenes. Para ello, dividiremos los arcos en segmentos más pequeños con la finalidad de obtener la longitud del arco de manera más precisa. Una vez dividido el arco, se calcula la separación angular que hay entre los extremos de los segmentos, siendo la separación angular entre dos puntos 1 y 2

$$\sigma = \arccos(\sin\varphi_1 \sin\varphi_2 + \cos\varphi_1 \cos\varphi_2 \cos(\phi_2 - \phi_1)), \quad (3)$$

donde φ_1 y φ_2 son las latitudes y ϕ_1 y ϕ_2 las longitudes de los puntos 1 y 2 respectivamente. Al conocer la separación angular entre ambos puntos y el radio del planeta, podemos obtener la distancia multiplicando estos dos valores

$$d = R_M \sigma. \quad (4)$$

De esta manera, si sumamos todas las distancias correspondientes a cada uno de los segmentos, tendremos la longitud de la tormenta o su perímetro, dependiendo de qué sea lo que queramos calcular.

Si se quiere calcular la velocidad a la que se mueve una tormenta o la velocidad a la que se mueve una inestabilidad, solamente se tiene que dividir la distancia que ha recorrido, calculada mediante el proceso explicado anteriormente, entre el tiempo transcurrido entre la toma de las dos imágenes.

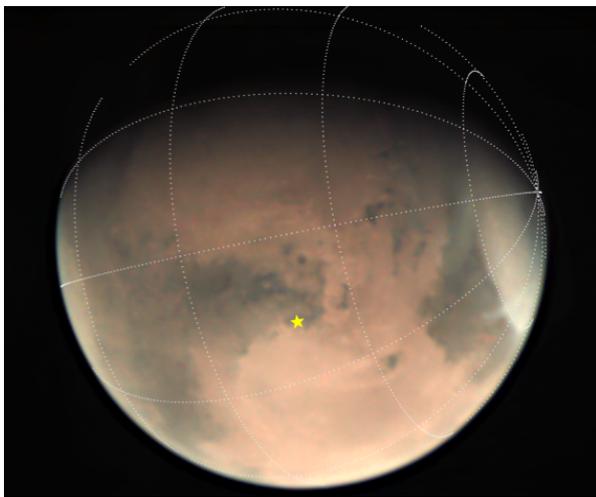
Para analizar las imágenes tomadas por MARCI, se han utilizado las aplicaciones QGIS y MeteoMars. Todas las tormentas observadas e identificadas han sido medidas utilizando MeteoMars, pero solamente las más importantes han sido analizadas con la aplicación QGIS (más fiable que MeteoMars a la hora de realizar medidas).

Como se ha mencionado anteriormente, con la aplicación MeteoMars se puede obtener la distancia mínima entre 2 puntos al seleccionarlos sobre el globo de Marte. La distancia que devuelve el programa viene dada en unidades del radio del planeta que marcamos (nosotros marcamos $R_M = 100$ unidades y el programa devuelve XX unidades). Por lo tanto, para poder obtener la distancia entre los dos puntos tenemos que multiplicar la distancia dada por $R_M(km)/R_M(unidades)$.

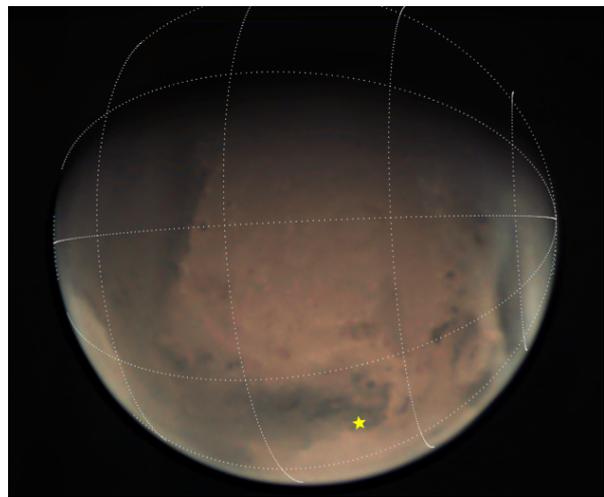
Al utilizar QGIS, se puede obtener la extensión de una tormenta utilizando la herramienta “Medir línea” y el área con la herramienta “Medir área”. En los casos en los que es posible medir la velocidad de traslación de la tormenta, al no poder superponer dos imágenes distintas, tenemos que obtener la velocidad siguiendo el procedimiento explicado en esta sección.

5. Resultados

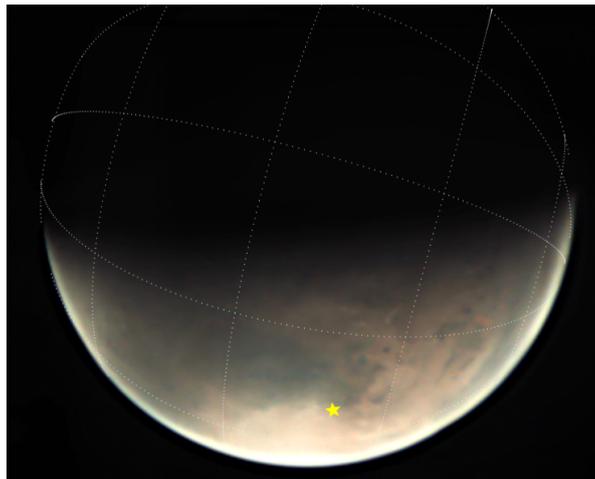
En esta sección hablaremos sobre las distintas tormentas que se han identificado al estudiar las imágenes obtenidas por las cámaras VMC y MARCI en el periodo que abarca este estudio. Como hemos indicado anteriormente, el periodo va desde la llegada del rover Perseverance a Marte (18 de febrero de 2021) al día 31 de agosto del mismo año. El poder utilizar las imágenes de las dos cámaras es de gran ayuda, ya que se complementan entre sí. Esto es así, porque la cámara MARCI siempre observa el planeta a la misma hora local, mientras que la hora local que se ve en las imágenes obtenidas por la cámara VMC no siempre es la misma. Tener imágenes de las dos cámaras nos permite tener imágenes del planeta casi todos los días, ya que ninguna de las dos cámaras toma imágenes todos los días.



(a) Imagen de Marte captada el 17 de febrero del 2021 a las 13:53:32.



(b) Imagen de Marte captada el 24 de febrero del 2021 a las 20:12:32.



(c) Imagen de Marte captada el día 10 de mayo del 2021 a las 16:55:32.

Figura 11: Imágenes de Marte captadas mediante la cámara VMC (MEX) en tres días distintos. La estrella dorada de las imágenes indica la posición en la que se encuentra el rover Perseverance.

En la figura 11 vemos varias imágenes tomadas por la cámara VMC. En ellas se ve la localización en la que se encuentra el rover Perseverance (marcada por una estrella dorada), además de la amplia cobertura que tiene la cámara, ya que se puede contemplar gran parte del planeta a distintas horas. Esta amplia cobertura nos permite observar los numerosos fenómenos meteorológicos que pueden surgir en la atmósfera marciana. Cabe destacar que desde el día 15 de mayo hasta el día 1 de septiembre la fase de observación no es apropiada para VMC, de manera que las imágenes que han sido tomadas no nos permiten identificar las tormentas de polvo. Por lo tanto, solamente podemos utilizar las imágenes tomadas por MARCI en ese periodo de tiempo.

La zona mostrada en las imágenes es de gran interés, ya que nos interesa poder caracterizar las tormentas formadas en las regiones cercanas a Jezero ($77.4 E$, $18.5 N$) para ver cómo las inestabilidades atmosféricas afectan a las medidas meteorológicas realizadas por Perseverance. No obstante, no nos vamos a centrar en cómo afectan las inestabilidades a estas medidas, si no que nos vamos a centrar en caracterizar todas las tormentas producidas en el hemisferio norte.

Las tormentas captadas por VMC que hemos tenido en cuenta han sido las más importantes, mientras que en el caso de las identificadas en las imágenes tomadas por MARCI se han tenido en cuenta todas (menos las que eran muy pequeñas y muy débiles). La tabla con todas las tormentas identificadas se encuentra en el apéndice.

5.1. Tormentas identificadas

En esta subsección se pueden ver todas las tormentas observadas por la cámara MARCI y analizadas mediante la aplicación QGIS, y las identificadas con la cámara VMC y analizadas con la aplicación Elcano. En estas tablas se indica el nombre asignado a cada tormenta junto a otros parámetros característicos como la longitud y latitud central, sus dimensiones zonales y longitudinales, hora local solar verdadera (LTST o simplificada Lt)...

Tabla 2: Tormentas estudiadas con las imágenes de VMC.

Fecha	Hora UT	Tormenta	Lt(h)	lon (E)	lat (N)	Lx(km)	Ly(km)	Ls(°)	sol	$L_{frente}(km)$
07/03/2021	9:39:03	VA1	9.7	318.8	56.8	2840	1640	13.7	16	3935
24/03/2021	20:35:12	VA2	10.1	328.1	56.5	3670	1220	21.7	32	4015
28/03/2021	2:08:17	VA3	10.2	276.4	63.2	3410	440	23.6	36	3225
30/03/2021	2:11:54	VE4	9.6	285.9	52.4	1780	560	24.5	38	995 ^a 1270 ^b
30/03/2021	23:20:51	VA5	9.1	329.0	58.1	2265	1820	24.5	38	2650
04/04/2021	16:20:00	VN6	5.3	63.0	71.5	925	760	26.8	43	—
15/04/2021	9:17:42	VA7	9.2	328.1	53.7	810	1135	31.9	54	1745

^a Medida del primer frente de la tormenta VE4. ^b Medida del segundo frente de la tormenta VE4.

En la tabla 2 se muestra la información de las tormentas observadas por la cámara VMC. Se indica la fecha y hora a la que se tomaron las imágenes analizadas junto al nombre asignado a cada tormenta. Al mismo tiempo, se muestra la hora local, las longitudes y latitudes centrales y las longitudes zonal y meridional de cada tormenta. Finalmente, se muestra la longitud solar de Marte cuando se tomaron las imágenes, los soles que han pa-

sado desde la llegada de Perseverance a Marte y la longitud de los frentes de las tormentas.

En la tabla 3 se encuentra la información de las tormentas observadas por la cámara MARCI. En ella se muestran el día y la hora en la que se tomó la imagen junto a la hora local en Marte. Además, se presentan los nombres asignados a cada tormenta, las longitudes y latitudes correspondientes al centro de la inestabilidad y las longitudes zonal y meridional de las tormentas. En las últimas columnas se proporciona la longitud solar (L_s) en la que se encuentra el planeta al tomar las imágenes y cuántos soles han pasado desde la llegada de Perseverance.

Tabla 3: Tormentas estudiadas con las imágenes de MARCI.

Fecha	Hora UT	Lt(h)	Tormenta	lon (E)	lat (N)	$L_x(km)$	$L_y(km)$	$L_s(^{\circ})$	Sol
21/02/2021	T02:25:03.878	14.5	NB1	3.2	55.9	1000	1100	6.6	2
23/02/2021	T01:07:51.780	14.5	NS1b	18.3	56.9	600	800	7.6	4
23/02/2021	T02:59:58.143	14.5	NM1b	26.1	58.0	800	800	7.6	4
23/02/2021	T02:59:58.143	14.5	AB1a	345.0	50.0	2100	1600	7.6	4
23/02/2021	T06:44:16.380	14.5	NS2	313.7	50.5	600	400	7.7	4
24/02/2021	T03:17:20.743	14.5	NM1a+b1	21.4	45.2	1100	600	8.1	5
24/02/2021	T05:09:29.274	14.5	EB2	333.0	56.1	1400	1400	8.1	5
06/03/2021	T04:19:26.726	14.5	AB3	123.1	80.8	2100	1600	13.0	15
07/03/2021	T12:05:06.673	14.5	AB4	332.0	63.5	3200	2200	13.6	16
	T13:57:15.864	14.5						13.6	16
08/03/2021	T06:46:15.929	14.5	AB5	103.0	71.4	2000	1100	14.0	17
08/03/2021	T08:38:18.575	14.5	AM6	50.7	70.6	800	1200	14.0	17
20/03/2021	T15:53:14.100	14.5	NM7	66.5	67.3	900	900	19.8	28
29/03/2021	T22:11:34.606	14.5	NS8	48.3	72.2	500	1000	24.2	38
31/03/2021	T02:13:06.908	14.5	AB9	335.0	63.5	3300	2400	24.7	39
	T04:05:15.664	14.5						24.7	39
31/03/2021	T13:25:43.822	14.5	NB10	193.4	64.3	1200	1000	24.9	39
31/03/2021	T17:09:58.866	14.5	NS11	152.6	64.6	600	500	25.0	39
31/03/2021	T22:46:18.521	14.5	AB8	69.9	72.3	2500	1600	25.1	40
	T20:54:14.884	14.5						25.1	40
01/04/2021	T15:35:08.266	14.5	NB10+11	180.0	56.4	1800	1600	25.4	40
02/04/2021	T15:52:26.328	14.5	NB10+11	160.5	61.2	1900	1600	25.9	41
	T17:44:34.603	14.5						25.9	41
04/04/2021	T05:14:35.317	14.5	AB12	340.0	64.0	3300	1900	26.6	43
05/04/2021	T03:39:50.554	14.5	EB12	13.2	76.6	1100	1200	27.1	44
07/04/2021	T15:27:07.390	14.5	NS13	233.5	66.4	900	600	28.2	46
07/04/2021	T09:50:49.229	14.5	UB14	297.7	64.0	2100	1300	28.1	46
07/04/2021	T11:42:57.450	14.5	NS14	305.8	64.0	700	800	28.1	46
08/04/2021	T10:08:08.970	14.5	NB14	333.2	59.8	1500	1500	28.6	47
09/04/2021	T06:41:15.742	14.5	AB15	64.4	74.3	1500	800	29.0	48
12/04/2021	T07:33:14.742	14.5	NM16	45.9	55.9	1300	600	30.3	50
13/04/2021	T04:06:27.280	14.5	AB16	142.0	80.5	2600	1600	30.7	51

Fecha	Hora de captura	Lt	Tormenta	lon (E)	lat (N)	L_x	L_y	Ls	Sol
13/04/2021	T11:34:45.623	15	UB17			2200	1100	30.9	52
	T13:26:54.782	14.5		336.8	55.2			30.9	52
17/04/2021	T20:15:57.348	14.5	NS18	273.0	62.1	1100	500	32.9	56
18/04/2021	T18:42:10.332	14.5	EB18	306.8	63.2	2300	1200	33.3	57
19/04/2021	T17:08:21.627	14.5	EB18	327.6	62.5	1700	1100	33.7	58
28/04/2021	T21:45:39.001	15	ES19	334.1	54.7	600	900	37.9	67
29/04/2021	T22:04:00.825	15	UB19	336.0	47.1	2600	1500	38.3	68
	T23:56:14.784	15						38.4	68
04/05/2021	T14:14:50.440	15	NB20+21	156.2	61.1	1300	800	40.5	73
08/05/2021	T06:07:24.818	15	EB22+23	332.8	68.5	2400	2100	42.1	76
15/05/2021	T12:00:03.142	15	AB24	284.0	75.3	2600	1100	45.3	83
17/05/2021	T12:36:46.927	15	EB25	311.4	71.9	1400	1100	46.2	85
18/05/2021	T01:42:02.124	15	NM26	100.3	66.2	1500	400	46.5	86
18/05/2021	T01:42:02.124	15	EB25	318.1	70.8	2600	2000	46.5	86
19/05/2021	T03:52:30.768	15	EB26	89.9	68.2	2600	2100	47.0	87
21/05/2021	T15:42:10.115	15	UB27	303.3	62.5	2000	1200	48.1	89
22/05/2021	T16:00:32.199	15	EB27	302.4	66.6	1700	1200	48.5	90
03/06/2021	T06:34:47.721	15	UB28	201.5	66.0	2000	1000	53.6	101
07/06/2021	T02:11:27.781	15	BS29	295.1	68.2	600	100	55.3	105
07/06/2021	T02:11:27.781	15	NB30	277.5	67.5	1400	1400	55.3	105
08/06/2021	T13:42:47.224	15	NB31	145.4	57.2	2000	700	56.0	106
	T15:35:00.591	15						56.0	106
20/06/2021	T15:35:16.009	15	NS32	228.0	63.7	1000	500	61.3	118
22/06/2021	T10:36:06.122	15	NS33	329.5	67.7	900	500	62.1	120
04/07/2021	T21:50:02.756	15	EB34	292.0	71.8	2700	1000	67.5	132
06/07/2021	T20:35:19.566	15	EB34	322.5	63.8	1700	1200	68.4	134
10/07/2021	T01:15:53.702	15	EB35	298.6	78.5	3600	1300	69.7	137
	T03:08:04.514	15		299.0	77.0	3800	700	69.8	137
21/07/2021	T06:34:00.008	15	UB36	302.1	70.4	1600	900	74.6	148
22/07/2021	T06:52:45.865	15	UB36	306.8	70.2	1900	1100	75.1	149
26/08/2021	T17:46:06.806	15	NS37	165.8	80.4	600	600	90.6	183
27/08/2021	T16:12:26.363	15	NS37	175.2	80.7	700	600	91.0	184
28/08/2021	T16:31:03.427	15	NM37	175.1	80.5	900	600	91.5	185
29/08/2021	T16:49:42.858	15	NM37	147.4	82.1	1400	600	91.9	186
30/08/2021	T19:00:37.106	15	NM37	142.1	81.2	1400	700	92.4	187

Como se puede ver en las tablas 2 y 3, cada tormenta tiene un nombre. En el caso de la tabla 2, la primera letra indica que la tormenta ha sido captada por la cámara VMC, mientras que la segunda indica si la estructura observada es un arco abierto (A) o cerrado (U), una espiral (E) o una nube (N). El número asignado a cada tormenta nos permite saber de qué tormenta se trata, ya que en su fase inicial una tormenta puede ser una nube y a medida que pasa el tiempo convertirse en una espiral o alguna otra combinación. No obstante, aunque en apariencia no sea la misma tormenta, sí lo es. En la tabla 3, la primera letra nos indica el tipo de estructura, mientras que la segunda dice si la tormenta es pequeña (S), mediana (M) o grande (B). El número, al igual que en la tabla 2, indica qué tormenta es.

5.2. Tormentas observadas más importantes

En este apartado, hablaremos más en profundidad de las tormentas analizadas con las aplicaciones QGIS y Elkano. Cabe destacar que en este apartado no hablaremos de todas las tormentas identificadas y presentadas en las tablas 2 y 3, si no que solamente hablaremos de aquellas que nos han parecido más relevantes e interesantes a la hora de analizar.

5.2.1. Tormentas NM1b y AB1a

En la figura 12 se pueden ver dos tormentas que se han formado una muy próxima a la otra el día 23 de febrero. Aunque a primera vista las dos tormentas parecen ser independientes, su origen es común, ya que las dos proceden de la misma nube. Esta nube primaria aparece por primera vez el 21 de febrero, casi desapareciendo el día 22, para luego volver a formarse en dos tormentas separadas.

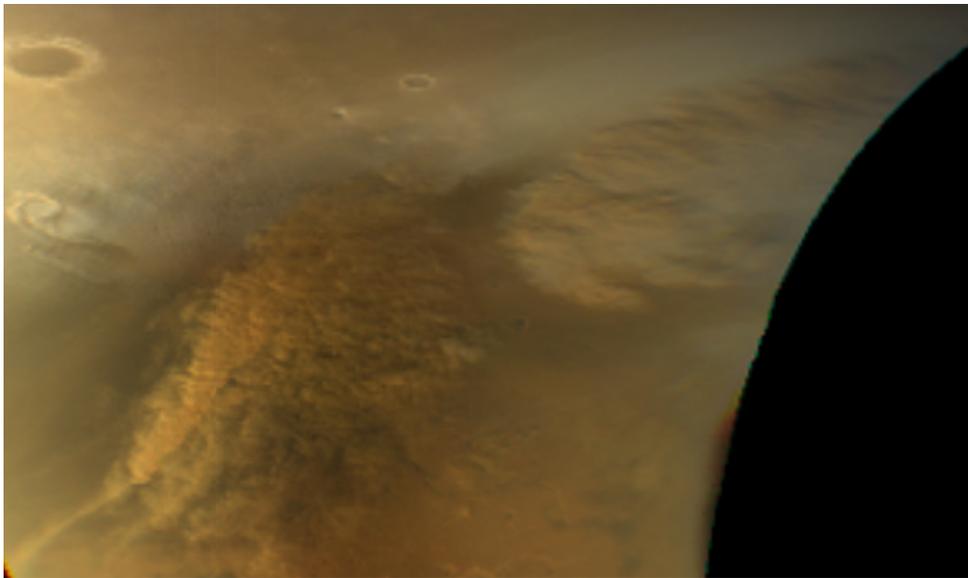


Figura 12: Tormentas NM1b y AB1a captadas por la cámara MARCI el día 23/02/2021 a las 02:59:58.

La longitud y latitud del centro de la nube de la derecha (NM1b) son $26.1 E$ y $58.0 N$, mientras que el centro de la nube de la izquierda (AB1a) se encuentra en la longitud $2.4 E$ y latitud $49.3 N$. Por otro lado, las longitudes zonal y meridional son $L_x \sim 800 km$ y $L_y \sim 800 km$ para NM1b y $L_x \sim 1200 km$ y $L_y \sim 1300 km$ para NB1a. No obstante, aunque en esta imagen no se pueda apreciar bien, la nube NB1a tiene una cola alargada pero muy difuminada. La presencia de esta cola hace que podamos tomar esta tormenta como un arco en vez de como una nube de polvo. Al tomar esta tormenta como un arco abierto y no una nube, su centro de inestabilidad no se encuentra en el centro de la nube, si no que se encuentra en $345.0 E$ y $50.0 N$. En caso de tener en cuenta ese arco casi inapreciable, la tormenta NB1a tendría unas dimensiones de $L_x \sim 2100 km$ y $L_y \sim 1600 km$ (dimensiones obtenidas empleando la aplicación MeteoMars) y pasaría a llamarse AB1a.

Un día más tarde estas dos nubes se vuelven a combinar formando una nube alargada que desciende dirigiéndose al sureste.

5.2.2. Tormenta VA1

Más adelante, con la cámara VMC observamos un vistoso arco formado el 7 de marzo. Como se puede ver en las imágenes 13 y 14, es un arco bastante largo al que le sale un segundo brazo. Adicionalmente, estos dos brazos podrían estar cerrados por un tercer brazo, haciendo que se parezca a un arco cerrado.

Como vemos en la figura 13, se ha empleado la aplicación Elcano para marcar las posiciones de interés. Al marcar estos puntos, podemos conocer tanto la extensión del arco como la posición del centro de inestabilidad. La identificación, longitud y latitud de estos marcadores se pueden ver en la tabla 4. El centro de esta inestabilidad viene marcado por el punto 18, de manera que la longitud y latitud centrales son $318.8 E$ y $56.8 N$. Por otro lado, obtenemos las longitudes de los frentes de la manera explicada en la sección anterior. Para obtener la longitud del frente más largo tenemos en cuenta la distancia que hay entre los puntos 1-2-3-4-5-6-7-8-9-17-14-15-16, calculando la distancia de cada uno de los intervalos y sumándolas. Al hacer eso, obtenemos que la longitud del brazo principal es $\sim 2650 km$. Para obtener las longitudes del segundo y tercer brazo miramos la distancia que recorren las secciones 10-11-12-13 y 9-17-14-15-16 respectivamente. Al hacer eso, obtenemos que la longitud del frente secundario es $\sim 1250 km$, mientras que la del tercero es $\sim 1250 km$. Si tomamos la tormenta como un arco cerrado y decimos que la longitud real es la suma entre el primer y tercer brazo, la longitud obtenida es $\sim 3900 km$.

Por otro lado, también calculamos las longitudes zonal y meridional de la tormenta obteniendo los valores $L_x \sim 2840 km$ y $L_y \sim 1640 km$.

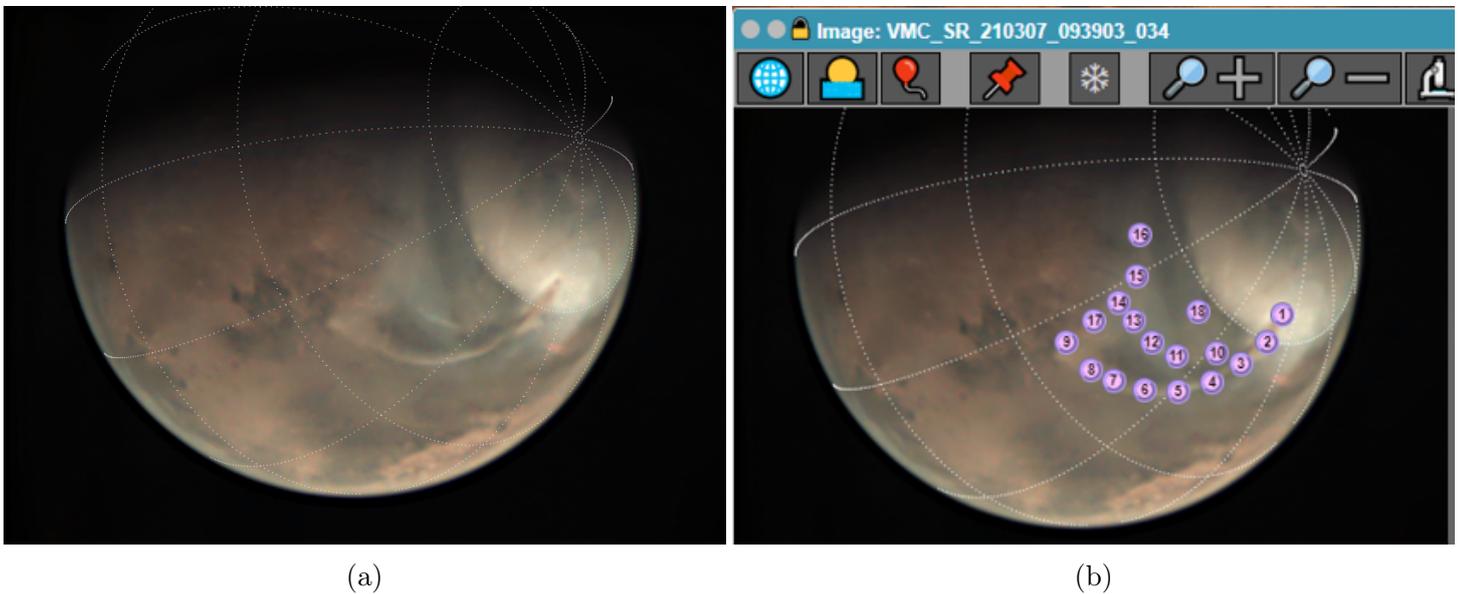


Figura 13: Análisis mediante la aplicación Elcano de la tormenta VA1.

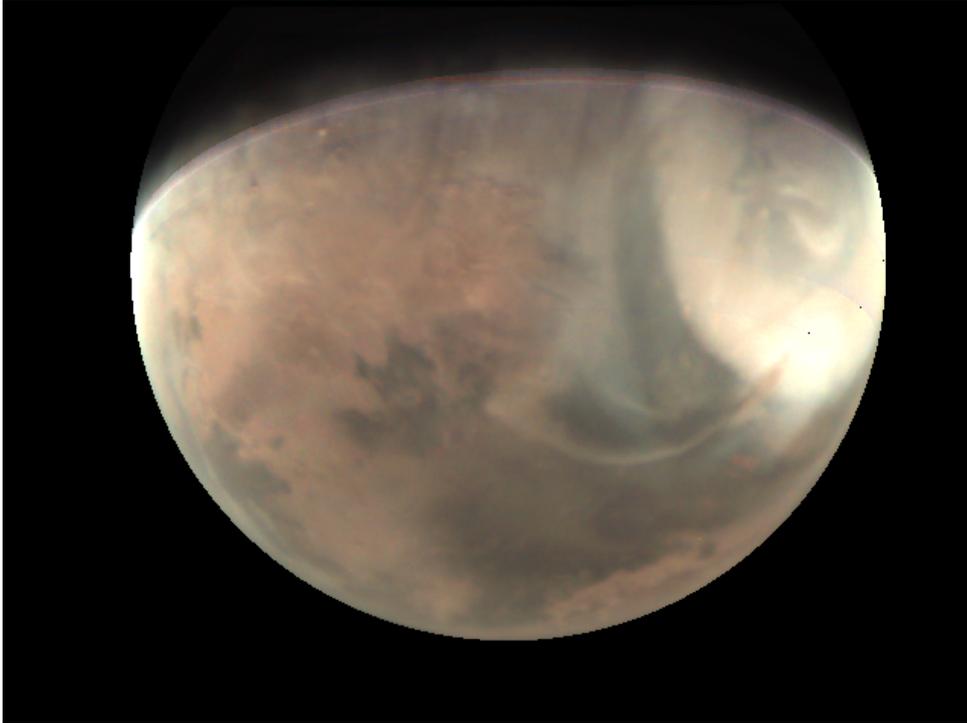


Figura 14: Combinación de todas las imágenes tomadas de VA1 en la secuencia 210134 de la cámara VMC.

Tabla 4: Tabla con las medidas realizadas con la aplicación Elcano sobre la tormenta VA1. En la tabla aparecen la longitud y latitud de cada punto marcado junto a la correspondiente hora local.

VA1							
ID	lon (E)	lat (N)	Lt (h)	ID	lon (E)	lat (N)	Lt (h)
1	351.0	64.8	11.8	10	332.9	54.2	10.6
2	349.1	59.6	11.7	11	323.9	49.4	10.0
3	342.7	54.7	11.3	12	316.4	48.0	9.5
4	337.8	49.7	11.0	13	309.2	47.8	9.1
5	331.3	45.4	10.5	14	303.5	47.3	8.7
6	324.8	42.0	10.1	15	300.0	51.7	8.4
7	318.1	39.5	9.6	16	290.9	54.8	7.8
8	313.4	37.8	9.3	17	304.5	42.7	8.7
9	305.7	37.1	8.8	18	318.8	56.8	9.7

Como también se ha observado con la cámara MARCI (AB4), podemos ver cuánto se ha desplazado y la velocidad con la que lo ha hecho. Para eso, tenemos que conocer el centro de la inestabilidad medida en la imagen tomada por MARCI. Al realizar el análisis, obtenemos que el centro se encuentra en la longitud 332.0 *E* y latitud 63.5 *N*. Por lo tanto, si empleamos las relaciones 3 y 4, obtenemos que la distancia recorrida es ~ 540 *km*. La cámara MARCI tomó la imagen del arco a las 13:57:15, mientras que VMC lo hizo a las 9:39:03, de manera que el tiempo transcurrido es de 15492 *s*. Por lo tanto, la velocidad de desplazamiento es ~ 34.8 *ms*⁻¹.

5.2.3. Tormenta VA2

17 días más tarde, el 24 de marzo, la cámara VMC captó otro arco cerrado en la atmósfera de Marte. Este arco se puede apreciar en la figura 15, en la que vemos que se trata de un arco cerrado cuyo brazo principal se divide en dos. Como en la ocasión anterior, para analizar la imagen colocamos distintos marcadores sobre ella. La información de estos puntos seleccionados se encuentra en la tabla 5.

Al trabajar con esta imagen, vemos que el centro de la inestabilidad se sitúa en el punto marcado con el marcador 15. Sin embargo, este punto también forma parte del segundo brazo que le sale al arco. Aún así, tomamos ese punto como el centro de la inestabilidad, de manera que se encuentra en la longitud $328.1 E$ y latitud $56.5 N$. Las longitudes zonal y meridional de este arco cerrado son $L_x \sim 3670 km$ y $L_y \sim 1220 km$, siendo así la tormenta con mayor longitud zonal observada con la cámara VMC.

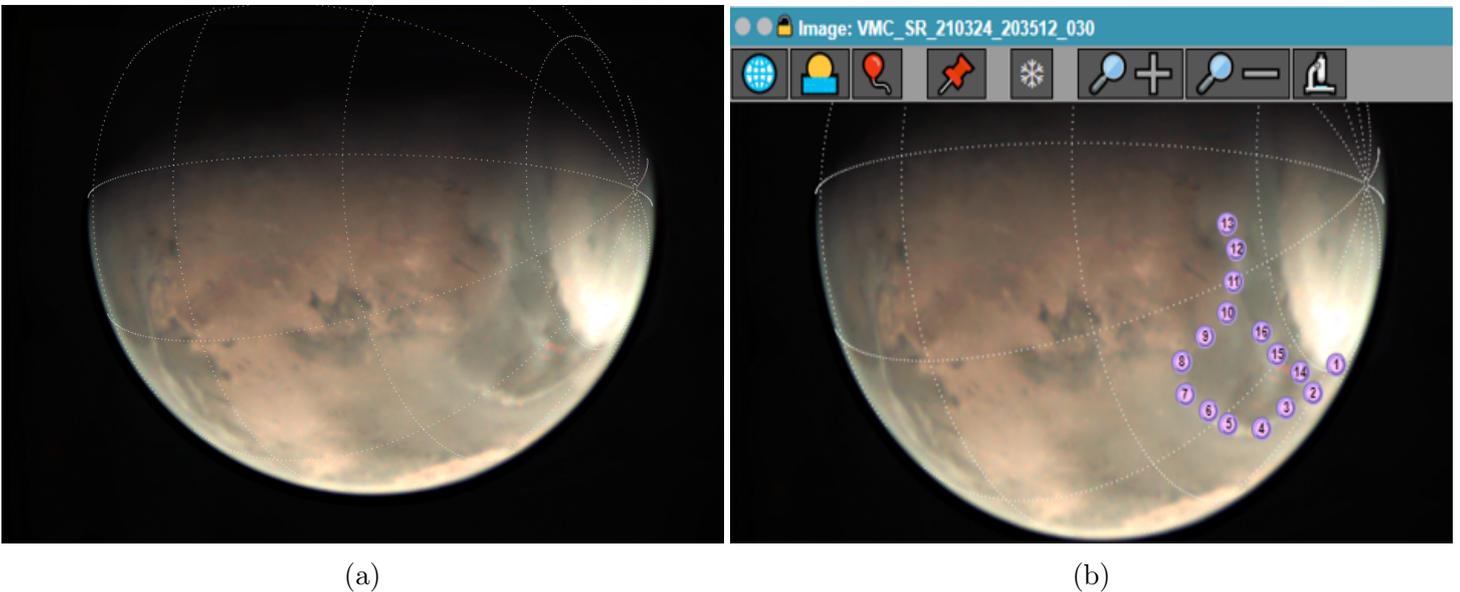


Figura 15: Análisis mediante la aplicación Elcano de la Tormenta VA2 observada el 24 de marzo de 2021.

Si como en el caso anterior calculamos la longitud del arco principal utilizando los marcadores 1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12-13, vemos que la longitud del brazo es $\sim 4000 km$, convirtiendo la tormenta VA2 en la tormenta con el mayor arco principal observado con esta cámara. Para calcular la longitud del frente secundario utilizamos los marcadores 1-14-15-16. Al hacer los cálculos correspondientes obtenemos que la longitud del frente secundario es $\sim 1600 km$, de manera que su extensión también es mayor que el frente secundario de la tormenta VA1.

Tabla 5: Tabla con las medidas realizadas con la aplicación Elkanó sobre la tormenta VA2. En la tabla aparecen la longitud y latitud de cada punto marcado junto a la correspondiente hora local.

VA2							
ID	lon (E)	lat (N)	Lt (h)	ID	lon (E)	lat (N)	Lt (h)
1	7.9	60.8	12.8	9	309.3	46.5	8.9
2	358.1	56.0	12.1	10	307.0	51.0	8.7
3	348.3	51.9	11.5	11	300.5	53.4	8.3
4	344.4	47.0	11.2	12	293.3	54.9	7.8
5	333.6	43.7	10.5	13	286.9	53.9	7.4
6	325.9	42.3	10.0	14	342.6	57.8	11.1
7	318.7	40.2	9.5	15	328.1	56.5	10.1
8	311.7	41.7	9.0	16	317.4	55.5	9.4

5.2.4. Tormentas del 30 de marzo

En este apartado, nos centramos en dos tormentas observadas con la cámara VMC el 30 de marzo. Los resultados del análisis realizado se muestran tanto en la figura 16 como en las tablas 6 y 7. A diferencia de los análisis anteriores, en éste hemos añadido el mapa de Marte con los marcadores seleccionados. Esto lo hemos hecho para poder visualizar lo cerca que se encuentran estas dos tormentas y más adelante entender cómo pueden estar relacionadas.

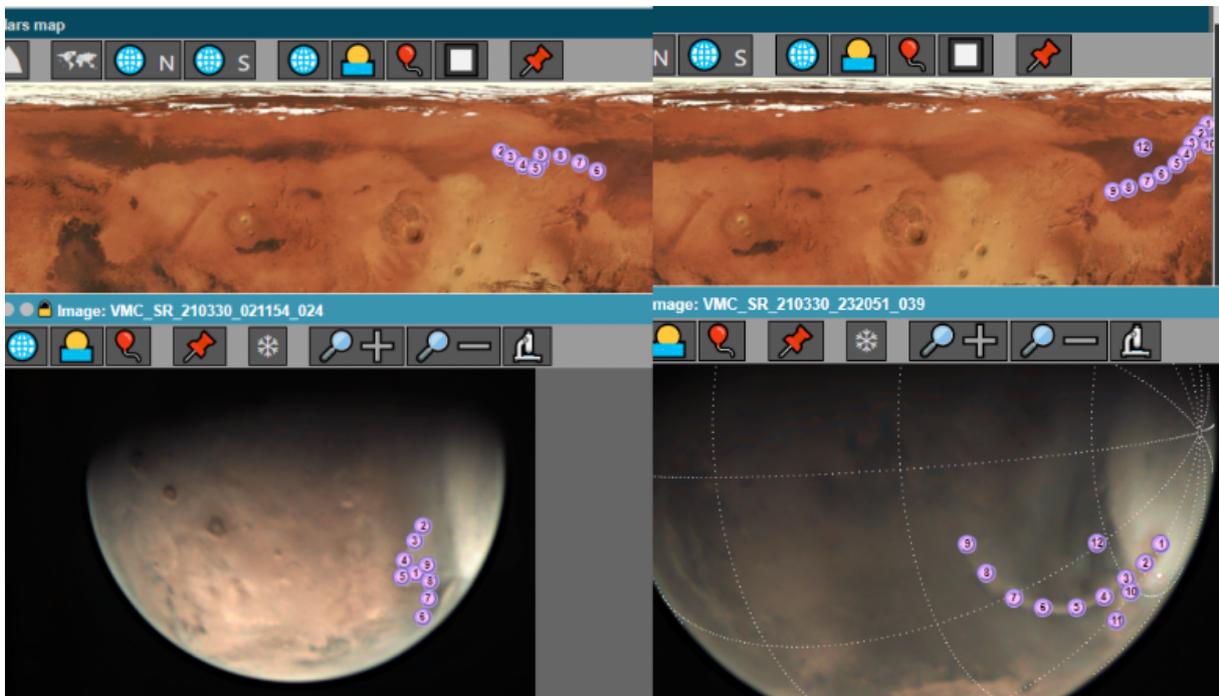


Figura 16: Comparación de las tormentas VE4 y VA5 observadas con la cámara VMC.

La primera tormenta que vamos a estudiar es VE4, que aunque a primera vista parece un arco pequeño, se trata de una tormenta espiral. El centro de esta espiral marcado en la figura con el marcador 1 se encuentra en la longitud 286.0 E y latitud 52.4 N. Por otro lado, las longitudes zonal y meridional de la tormenta espiral son $L_x \sim 1780 \text{ km}$ y

$L_y \sim 560 \text{ km}$ respectivamente, de manera que podemos decir que se trata de una espiral algo plana que no se extiende meridionalmente (no se extiende en apariencia, pero puede que sí en influencia). Los frentes de estas espirales los hemos medido de la misma manera que antes, teniendo como orden 2-3-4-5-1 para el primero y 1-9-8-7-6 para el segundo. Al hacer eso obtenemos que la extensión del primero es $\sim 950 \text{ km}$, mientras que la extensión del segundo es $\sim 1270 \text{ km}$.

Tabla 6: Tabla con las medidas realizadas con la aplicación Elkanó sobre la tormenta VE4. En la tabla aparecen la longitud y latitud de cada punto marcado junto a la correspondiente hora local.

VE4							
ID	lon (E)	lat (N)	Lt (h)	ID	lon (E)	lat (N)	Lt (h)
1	285.9	52.4	9.6	6	312.4	47.9	11.4
2	267.5	57.4	8.4	7	304.4	52.1	10.8
3	272.0	54.4	8.7	8	295.4	54.9	10.2
4	277.6	50.7	9.1	9	286.1	55.8	9.6
5	283.6	49.1	9.5				

Tabla 7: Tabla con las medidas realizadas con la aplicación Elkanó sobre la tormenta VA5. En la tabla aparecen la longitud y latitud de cada punto junto a la correspondiente hora local.

VA5							
ID	lon (E)	lat (N)	Lt	ID	lon (E)	lat (N)	Lt
1	358.6	68.8	11.0	7	330.9	42.4	9.2
2	355.3	64.5	10.8	8	322.5	39.8	8.6
3	351.3	60.1	10.6	9	315.4	38.1	8.2
4	348.8	55.3	10.4	10	359.1	59.3	11.1
5	344.4	50.6	10.1	11	4.0	54.0	11.4

La tormenta VA5 es un arco abierto cuyo centro de inestabilidad viene señalado por el marcador 12. Por lo tanto, el centro se encuentra en la longitud 329.0 E y latitud 58.1 N . A diferencia de la tormenta espiral, ésta abarca una zona mayor, siendo $L_x \sim 2265 \text{ km}$ y $L_y \sim 1820 \text{ km}$. La longitud del frente principal del arco es $\sim 2650 \text{ km}$ (1-2-3-4-5-6-7-8-9). Además del frente principal, esta tormenta tiene otro secundario que en vez de extenderse al suroeste se extiende al sureste. Para medir la longitud del frente secundario utilizamos los puntos 1-2-10-11, obteniendo la longitud $\sim 940 \text{ km}$.

Además, si miramos las horas a las que se han tomado las dos imágenes, 2:08:17 para VE4 y 23:20:00 para VA5, y nos fijamos en la posición de las dos tormentas, llegamos a la conclusión de que aunque las dos sean distintas, la inestabilidad que ha producido la espiral se ha desplazado hacia el este para ser la inestabilidad causante del arco. Por lo tanto, podemos ver la velocidad a la que se ha desplazado la inestabilidad por el borde del casquete polar. Teniendo en cuenta los dos centros de inestabilidad y el tiempo transcurrido entre las dos capturas (76363 s), obtenemos que la velocidad de la inestabilidad es $\sim 19.2 \text{ ms}^{-1}$. Para poder ver mejor la tormenta VA5 se puede mirar la figura 17, que es la combinación de todas la imágenes sacadas en la secuencia de fotos en la que aparece.

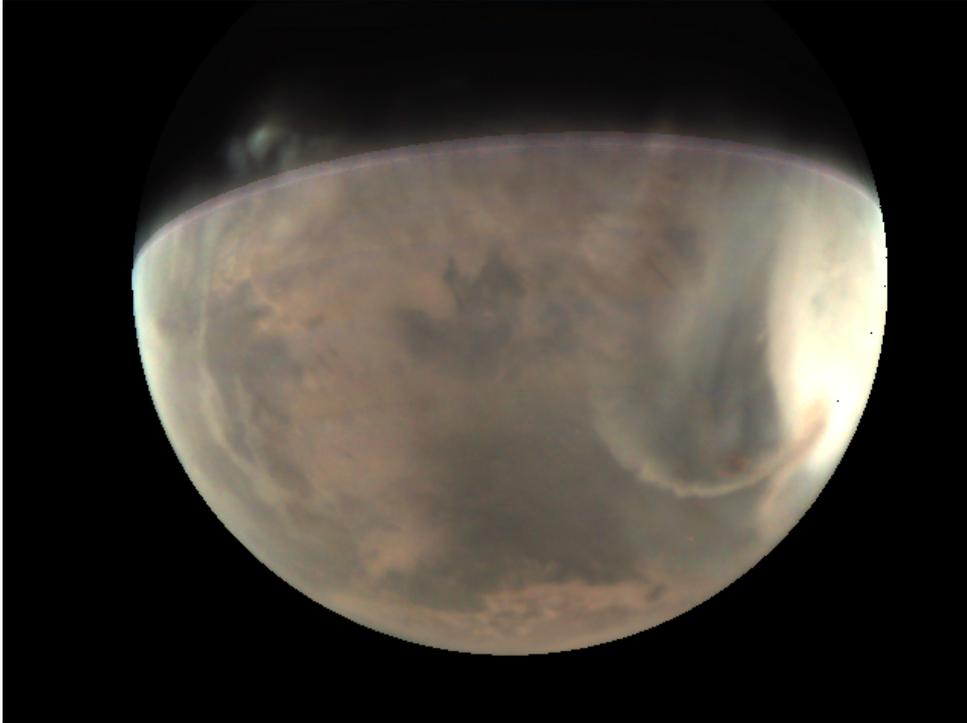


Figura 17: Combinación de todas las imágenes tomadas en la secuencia 210196 de la cámara VMC (tormenta VA5).

5.2.5. Tormentas del 31 de marzo

El día siguiente (31 de marzo) fue un día muy activo, ya que se produjeron distintas tormentas a lo largo del casquete polar. Estas tormentas se muestran en la figura 18, y como se puede apreciar, todas están separadas prácticamente la misma distancia entre sí. A diferencia de las demás imágenes captadas por MARCI, ésta muestra la combinación de todas las imágenes tomadas por dicha cámara a lo largo del día. En esa imagen se pueden ver 3 tormentas importantes: dos arcos y una nube grande, además de mucho polvo levantado cerca del polo. Midiendo las distancias entre los centros de las tormentas mencionadas, vemos que se encuentran bastante equiespaciadas, ya que la distancia entre las inestabilidades es $\sim 2200 \text{ km}$, aunque en un caso sea un poco mayor $\sim 2600 \text{ km}$.

La tormenta NB10 se encuentra en la parte superior central de la figura 18 y en la figura 19. Se trata de una tormenta inusual, ya que parece ser la combinación de dos tormentas alargadas. No obstante, la trataremos como una sola tormenta. La longitud y la latitud central son 193.4 E y 64.3 N , siendo la longitud zonal $L_x \sim 1200 \text{ km}$ y meridional $L_y \sim 1000 \text{ km}$.

Por otro lado, la tormenta AB9 es un arco muy grande y extenso cuyo centro se encuentra en la longitud 342.0 E y 66.9 N y longitudes son $L_x \sim 3300 \text{ km}$ $L_y \sim 2400 \text{ km}$. Esta tormenta se puede ver en la figura 18 si nos fijamos en los laterales de la imagen. Al comparar este arco con el analizado en el apartado anterior (VA5), vemos que se trata de la misma tormenta, ya que se encuentra en la misma zona y tiene la misma forma. Las dimensiones observadas, aunque no se parezcan demasiado son consistentes. Esta diferencia en las dimensiones se ha podido producir porque al tener una resolución mayor podemos percibir más detalles, y porque al pasar el tiempo la tormenta ha aumentado en tamaño.

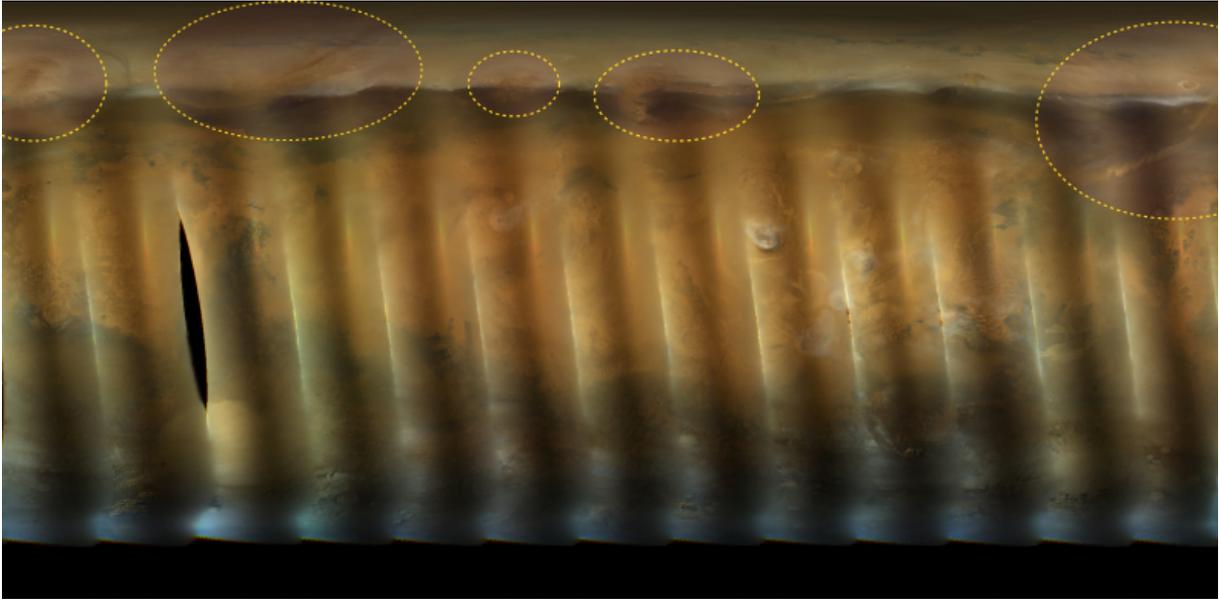


Figura 18: Imagen global del planeta obtenida por MARCI el 31 de marzo con las tormentas marcadas.



Figura 19: Tormenta NB10 captada por la cámara MARCI el día 31/03/2021 a las 13:25:43.

Teniendo esto en cuenta, podemos ver cuánto se ha desplazado el centro de un día para otro. Como las imágenes se han tomado una a las 23:20:00 y la otra a las 04:05:15, el tiempo transcurrido entre la toma de las imágenes es de 17115 s. Por otro lado, la distancia entre los centros es de $\sim 360 \text{ km}$, de manera que la velocidad de desplazamiento es $\sim 21.3 \text{ m s}^{-1}$. Esta velocidad es muy parecida a la velocidad calculada anteriormente ($\sim 19.2 \text{ m s}^{-1}$) al medir la velocidad de desplazamiento de la inestabilidad causante de las dos tormentas observadas el día 30.

Otra conclusión que podemos obtener, es que este tipo de arcos se forman de manera recurrente en esta zona, tal y como hemos visto anteriormente con las tormentas VA1 y VA2.

5.2.6. Tormenta NB10+11

En la figura 20 observamos la tormenta resultante de la combinación de dos tormentas distintas, la tormenta que acabamos de analizar ahora (NB10) y otra más pequeña que se encontraba más al oeste. La combinación resultante es una nube compuesta únicamente de polvo que abarca una gran dimensión y en la que se pueden distinguir distintas celdas.

Aunque esta nube de polvo es grande y densa, es una tormenta que al cabo de un día se encuentra muy difuminada y que al cabo de dos ha desaparecido por completo. No obstante, no hay que olvidar que aunque no se haya producido un levantamiento de polvo la inestabilidad puede seguir estando ahí.

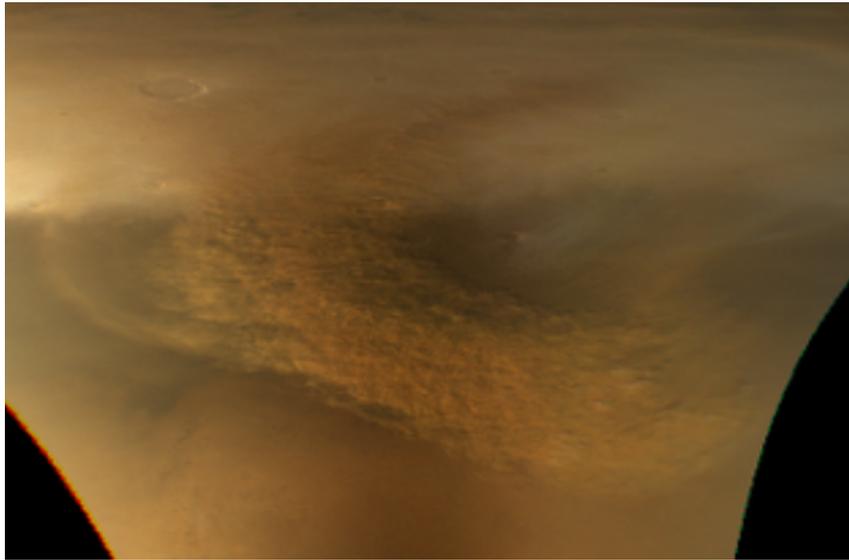


Figura 20: Tormenta NB10+11 captada por la cámara MARCI el día 01/04/2021 a las 15:52:26.

La longitud y latitud del centro de la tormenta son $160.5 E$ y $61.2 N$ y sus longitudes zonal y meridional son $L_x \sim 1800 km$ y $L_y \sim 1600 km$ respectivamente. Estas medidas hacen que la tormenta de polvo NB10+11 sea la más grande vista en el período estudiado.

5.2.7. Tormenta AB12

En la figura 21 vemos una nube de polvo que se parece mucho a la parte superior de dos tormentas vistas anteriormente (AB1a y AB9). Sin embargo, en este caso hay una diferencia importante si lo comparamos con las otras dos, ya que en los casos anteriores, la tormenta formada iba acompañada de una larga cola que se extendía hacia el suroeste (aunque no se viera de una manera muy clara), mientras que en esta imagen solamente podemos ver la nube y no se aprecia ninguna cola.

Su centro se encontraría en $4.4 E$ $66.7 N$ y su longitud zonal y meridional serían $L_x \sim 1100 km$ y $L_y \sim 900 km$. No obstante, si miramos la siguiente imagen tomada por MARCI, vemos que hay un brazo muy fino que se extiende al suroeste desde la zona en la que se encuentra la nube. Por lo tanto, podemos considerar esta tormenta como un arco abierto. Si consideramos esta tormenta de polvo como un arco en vez de una nube, hay

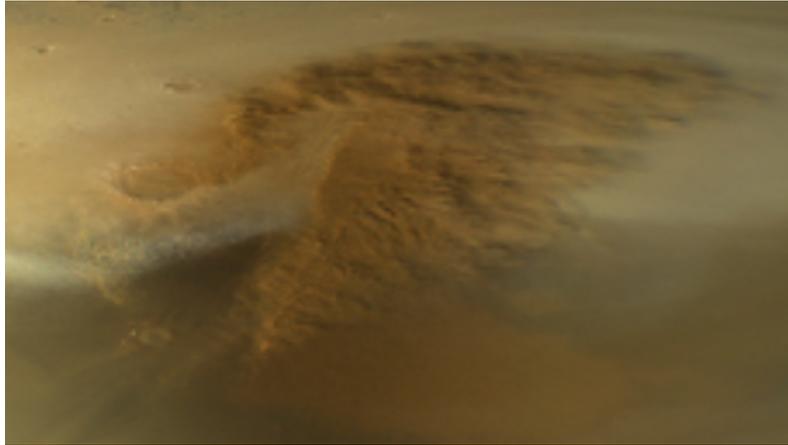


Figura 21: Tormenta AB12 captada por la cámara MARCI el día 04/04/2021 a las 05:14:35.

un cambio de posición del centro de la inestabilidad y las longitudes zonal y meridional son distintas. En este caso el centro estaría en $340.0 E$ y $64.0 N$ y las longitudes serían $L_x \sim 3300 km$ y $L_y \sim 1900 km$.

5.2.8. Tormenta VN6

El mismo día pero a las 16:20:00, la cámara VMC capta otra tormenta de polvo en el borde del casquete polar. A diferencia de las demás nubes observadas hasta la fecha, ésta es la que más al norte se ha formado, siendo su latitud $71.5 N$, mientras que su longitud es $63.0 E$ (marcador 1 en la tabla 8). También cabe recalcar que esta tormenta no es de las más grandes que se han observado, con una longitud zonal $L_x \sim 925 km$ y meridional $L_y \sim 760 km$. La razón detrás de este tamaño menor puede ser la hora local en la que ha sido observada, ya que las demás nubes de polvo se han observado a las $LTST = 14 - 15 h$, mientras que ésta se ha observado a las $LTST = 5.3 h$.

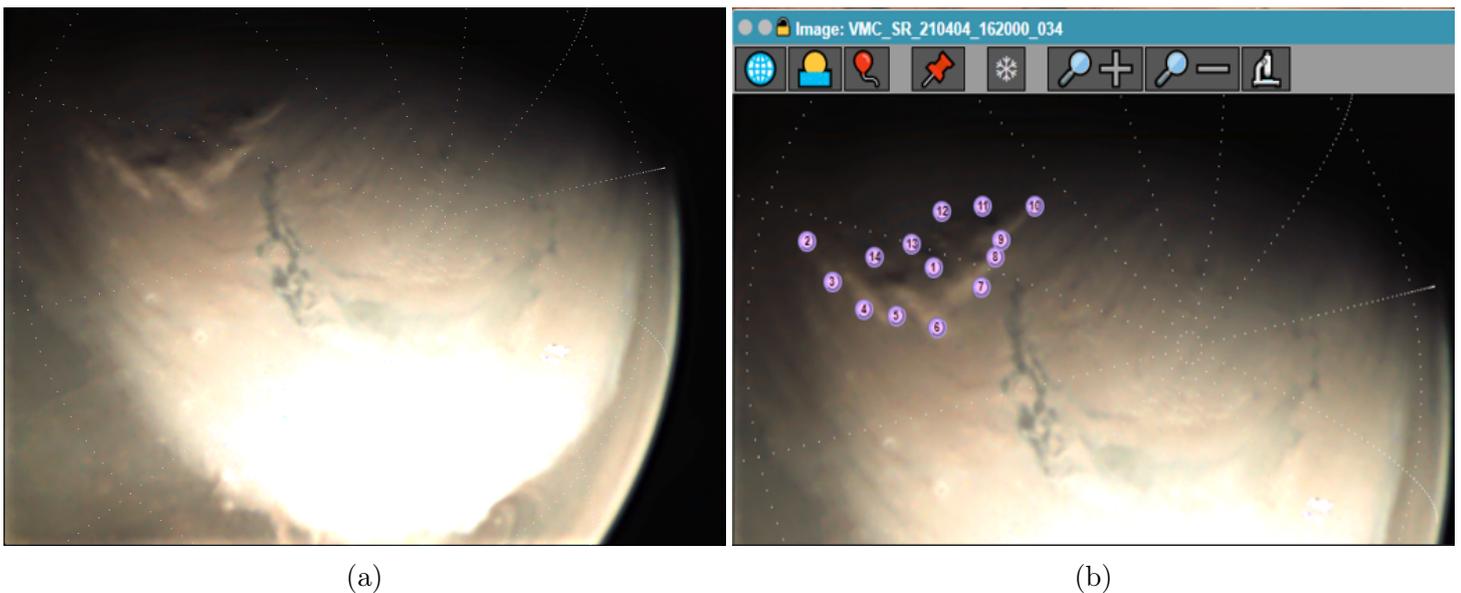


Figura 22: Análisis mediante la aplicación Elcano de la tormenta VN6 observada el 4 de abril de 2021.

Tabla 8: Tabla con las medidas realizadas con la aplicación Elcano sobre la tormenta VN6. En la tabla aparecen la longitud y latitud de cada punto marcado junto a la correspondiente hora local.

VN6							
ID	lon (E)	lat (N)	Lt	ID	lon (E)	lat (N)	Lt
1	63.0	71.5	5.3	8	56.7	75.2	4.9
2	63.6	63.2	5.4	9	52.2	75.1	4.6
3	68.4	65.2	5.7	10	39.6	76.1	3.8
4	72.0	67.5	5.9	11	47.2	73.2	4.3
5	72.5	69.5	6.0	12	52.3	71.0	4.6
6	74.2	72.2	6.1	13	59.9	69.8	5.1
7	64.6	74.7	5.4	14	63.8	67.7	5.4

5.2.9. Tormenta EB18

EB18 es una tormenta que comienza siendo una nube de polvo alargada cerca del casquete polar en la longitud $273.0 E$ y latitud $62.1 N$ de $L_x \sim 1100 km$ y $L_y \sim 500 km$ el día 17 de abril, que termina convirtiéndose en una tormenta espiral grande. Las imágenes proporcionadas por la cámara MARCI, muestran cómo esa nube de polvo se desplaza hacia el este convirtiéndose en una espiral de gran tamaño levantando grandes cantidades de polvo durante dos días, para casi desaparecer al tercero (20 de abril). No obstante, aunque el día 20 no se levante mucho polvo, se puede ver que hay una inestabilidad cerca del casquete polar. Esta inestabilidad en otro momento del día podría producir una tormenta espiral.

En la figura 23 apreciamos los dos momentos captados por la cámara en los que se pueden ver las espirales bien definidas. En estas imágenes podemos distinguir sin ningún problema sus brazos y el centro de la inestabilidad.

Que esta tormenta se haya mantenido tan bien definida durante más de un día nos da la posibilidad de medir la velocidad con la que se ha desplazado, y ver cómo ha cambiado la espiral en tamaño con el paso del tiempo. El día 18 a las 18:42:20 el centro de la inestabilidad se encuentra en la longitud $306.8 E$ y latitud $63.2 N$, mientras que el 19 a las 17:08:21 la longitud y latitud centrales son $327.6 E$ y $62.5 N$. Obtenemos que la inestabilidad se desplaza hacia el sureste $\sim 560 km$ en $80761 s$, de manera que ésta se mueve a una velocidad de $\sim 6.9 ms^{-1}$.

No solamente podemos calcular la velocidad que ha tenido la inestabilidad durante esos días, si no que también podemos ver la velocidad con la que se ha desplazado la inestabilidad que inicialmente había dado lugar a la nube de polvo. Si tenemos en cuenta que la nube se captó a las 20:15:57 y tomamos la posición del centro mencionado anteriormente, obtenemos que la inestabilidad ha viajado a $\sim 11.2 ms^{-1}$. Comparando estas velocidades vemos que la tormenta ha ido perdiendo velocidad con el tiempo y que las velocidades obtenidas son consistentes con que se trata del mismo fenómeno.



(a) Tormenta captada el día 18/04/2021 a las 18:42:10.



(b) Tormenta captada el día 19/04/2021 a las 17:08:21.

Figura 23: Tormenta espiral EB18 captada por la cámara MARCI en dos días consecutivos.

5.2.10. Tormenta EB22+23

En la figura 24 podemos ver otra tormenta espiral captada por la cámara MARCI el 8 de mayo. Se trata de una tormenta espiral de gran extensión con $L_x \sim 2400 \text{ km}$ y $L_y \sim 2100 \text{ km}$ cuya longitud y latitud central son 332.8 E 68.5 N .

Al igual que la tormenta EB18, ésta no ha sido una espiral que se ha formado y descompuesto en un solo día. Comenzó a formarse a partir de la combinación de dos nubes que más adelante tomaron una forma espiral, creciendo de un día para otro de una espiral mediana a una grande. Un día después de la captura de esta imagen se puede ver cómo sobrevive con forma de espiral. No obstante, no hay suficiente levantamiento de polvo como para poder verla trazada de una manera muy clara.

Si nos fijamos en la posición del centro de la inestabilidad, podemos ver que la tormenta espiral se ha formado en la misma zona que lo han hecho EB18 y los arcos anteriormente mencionados. Por lo tanto, podemos decir que esta zona (Acidalia Planitia) es propensa a formar este tipo de estructuras grandes, cuyo origen suponemos que es baroclínico.

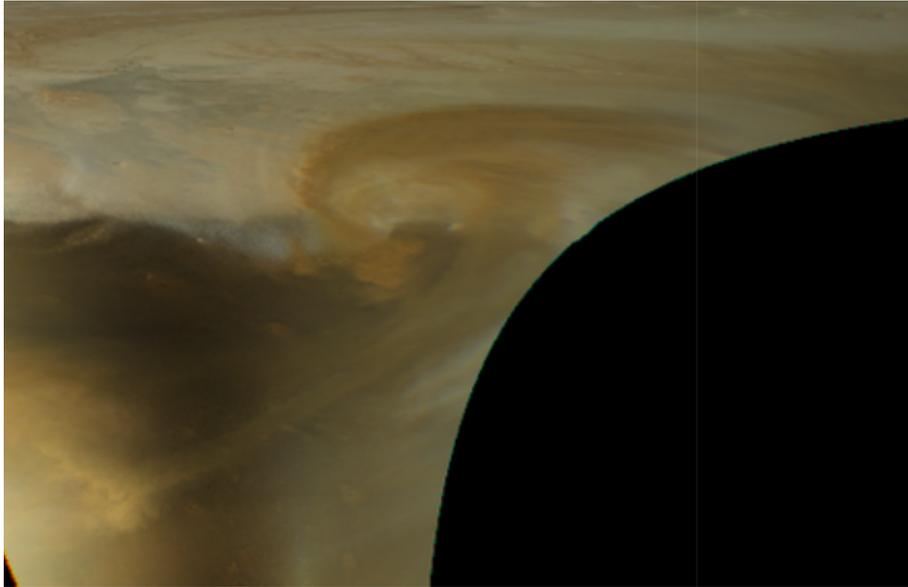


Figura 24: Tormenta EB22+ 23 captada por la cámara MARCI el día 08/05/2021 a las 06:07:24.

5.2.11. Tormenta EB25

Para terminar con las tormentas en forma de espiral hablaremos de la tormenta EB25 captada el 17 de mayo. A diferencia de las anteriores, no conocemos su origen, ya que la cámara MARCI no tomó imágenes de la zona el día 16, de manera que no conocemos si es una tormenta nueva o si se trata de la evolución de una anterior.



Figura 25: Tormenta EB25 captada por la cámara MARCI el día 17/05/2021 a las 12:36:47.

La figura 25 muestra que la espiral tiene un brazo bastante definido y otro algo más difuminado. No obstante, se pueden apreciar los dos frentes. El centro de la inestabilidad se encuentra en la longitud 311.1 *E* y latitud 71.9 *N*, y su extensión es algo menor que la de las otras espirales, siendo las longitudes zonal y meridional $L_x \sim 1400 \text{ km}$ y $L_y \sim 1100 \text{ km}$.

El tamaño reducido de esta espiral puede ser debido a que se trata de la fase inicial de la tormenta. Esto tiene sentido por la longitud en la que se encuentra la tormenta

(311.1 E) y porque al día siguiente (18 de mayo) la extensión se asemeja más a la de las otras ($L_x \sim 2600 \text{ km}$ y $L_y \sim 2000 \text{ km}$). No mostramos una imagen de la evolución, ya que está muy difuminada y gran parte de un brazo no aparece en la imagen, aunque el centro de la tormenta sí (318.1 E , 70.8 N).

Al tener los dos centros de inestabilidad, podemos medir su velocidad. La primera imagen se tomó el 17 de mayo a las 12:36:47, mientras que la segunda se tomó el 18 a las 01:42:02. Obtenemos que la distancia desplazada hacia el sureste es $\sim 150 \text{ km}$, que para el tiempo transcurrido entre las imágenes (47115 s) implica una velocidad de desplazamiento de $\sim 3.2 \text{ ms}^{-1}$. Comparando esa velocidad con las obtenidas para las demás inestabilidades, vemos que es menor, aunque el desplazamiento sigue siendo hacia el este.

5.2.12. Tormenta UB27

Para finalizar con la sección en la que comentamos las tormentas más importantes, en la figura 26 mostramos una tormenta diferente a las anteriores, ya que se trata de un arco cerrado, mientras que hasta ahora solamente hemos visto nubes de polvo, espirales y arcos abiertos.

Lo que hace diferente a esta tormenta es que el día antes de convertirse en un arco cerrado era una espiral, y que al día siguiente se volvió a convertir en otra espiral. El centro de este arco se encuentra en la longitud 303.3 E y latitud 62.5 N y sus longitudes zonal y meridional son $L_x \sim 2000 \text{ km}$ y $L_y \sim 1200 \text{ km}$ con una longitud del arco de $\sim 2000 \text{ km}$, longitud bastante menor que la de las tormentas de este tipo captadas por la cámara VMC.



Figura 26: Tormenta UB27 captada por la cámara MARCI el día 21/05/2021 a las 15:42:10.

5.3. Distribución de las Tormentas

Una vez analizadas las tormentas más importantes, podemos ver cuál ha sido su distribución areográfica. En la figura 27 las tormentas identificadas en las imágenes de las cámaras MARCI y VMC aparecen marcadas sobre un mapa topográfico del planeta..

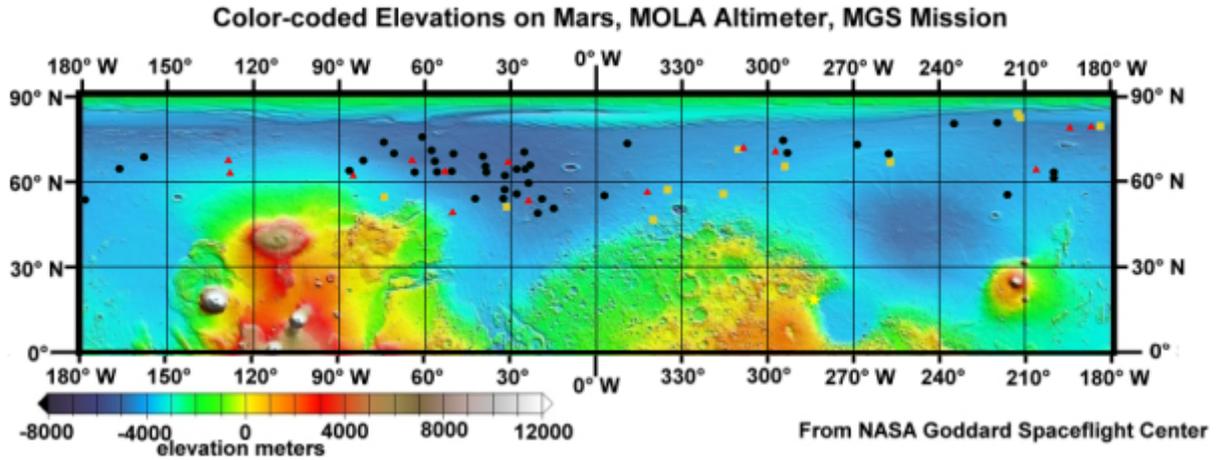


Figura 27: Mapa topográfico del hemisferio norte de Marte con las posiciones de las tormentas observadas con los instrumentos MARCI y VMC. Los puntos negros indican las posiciones de las tormentas de mayor extensión ($L_x \gtrsim 1100 \text{ km}$ y $L_y \gtrsim 1000 \text{ km}$), los cuadrados amarillos las de las tormentas medianas y los triángulos rojos las de las tormentas más pequeñas. La estrella dorada marca la posición del rover Perseverance.

Al mirar la disposición de estas tormentas, vemos que todas se encuentran cerca del borde del casquete polar, casquete que según avanza el tiempo se va haciendo más pequeño. Mirando la figura 27 también se puede apreciar cómo hay zonas en las que se producen más tormentas que en otras, como es el caso de la zona baja Acidalia Planitia, dónde se concentran la mayoría de las tormentas observadas. Por otro lado, se puede ver que las zonas montañosas del planeta no son favorables a la formación de estas tormentas.

Estos resultados concuerdan con el estudio realizado por Hollingsworth y col. [21] donde demuestran que la orografía del planeta juega un papel muy importante en la localización de los vórtices baroclínicos, situados generalmente en las planicies de Arcadia, Acidalia (fundamentalmente) y Utopia Planitia. Estas regiones “preferidas” por las tormentas reciben el nombre de “storm zones” o zonas de tormentas [21].

A lo largo del comienzo de la primavera en el hemisferio norte, la actividad observada de tormentas es muy fuerte. No obstante, a medida que las inestabilidades pierden intensidad sobre mediados de primavera, los ciclones son menos vigorosos, de manera que el “cinturón” de tormentas aumenta su latitud, tal y como se puede ver en las gráficas presentadas en la figura 28.

Tanto las tormentas de polvo como las nubes de hielo son muy prominentes en la zona del casquete polar. Estas nubes están asociadas a sistemas frontales que en ocasiones dan lugar a tormentas regionales mayores que se desplazan de norte a sur y que juegan un papel muy importante en el ciclo de polvo del planeta. Los ciclones baroclínicos transitorios son agentes activos en el transporte de calor, momento y humedad en las latitudes medias,

de manera que la variación de estas zonas de tormentas tendrá implicaciones importantes en el clima regional de Marte.

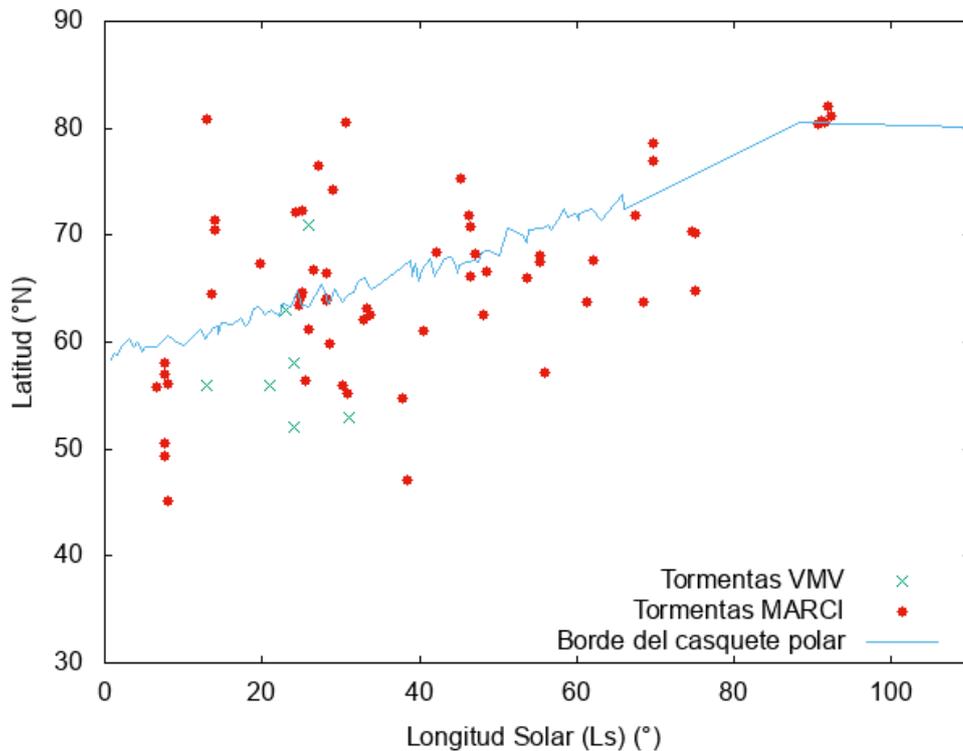


Figura 28: Gráfica con la latitud del centro de las tormentas observadas por MARCI (color rojo) y VMC (color azul) y la posición media para todas las longitudes del borde del casquete polar para el año anterior de Marte (MY=35) medido a partir de las imágenes de VMC [22][23] en función de la longitud solar (Ls).

Al representar las latitudes de las tormentas identificadas en función de la longitud solar, vemos cómo las tormentas se concentran solamente en las latitudes comprendidas entre $45^{\circ} N$ y $80^{\circ} N$. No obstante, se puede ver que a medida que avanza el tiempo se van formando menos tormentas y que éstas tienen su centro de inestabilidad a latitudes superiores, de manera que el “cinturón” de tormentas se desplaza al norte. Esto se debe a la regresión del casquete polar norte [24]. Como el casquete polar ha disminuido en tamaño, el fuerte gradiente de temperatura causante de las inestabilidades se ha desplazado al norte. En la figura también se puede apreciar el gap que hay en las imágenes de VMC ya que a partir de cierto momento dejamos de poder identificar tormentas con sus imágenes debido a que la fase de observación no es la adecuada.

5.3.1. Tormentas más cercanas a Jezero

Como se ha mencionado al comienzo de la sección, nos interesan las tormentas formadas en las regiones cercanas a Jezero para ver cómo afectan a las medidas meteorológicas realizadas por Perseverance. Para que la tormenta se considere cercana se tiene que encontrar entre las longitudes $60^{\circ} E - 120^{\circ} E$. Aunque en esta zona no se forman tantas tormentas como en Acidalia Planitia, sigue siendo una zona con actividad meteorológica. En la figura 27 se muestran las 7 tormentas que se han analizado tanto con QGIS como

con Elcano y se encuentran entre las longitudes mencionadas.

En la tabla 9 se indican las tormentas que se encuentran cerca del cráter junto a la fecha y longitud solar en la que fueron observadas. Además se muestra la posición central de las inestabilidades y la distancia a la que se encuentran de Jezero calculada mediante las relaciones (3) y (4).

Tabla 9: Tabla de las tormentas más cercanas al cráter Jezero.

Fecha	Tormenta	Ls (°)	lon (E)	lat (N)	Distancia (km)
08/03/2021	AB5	14.0	103.0	71.4	1260
20/03/2021	NM7	19.8	66.5	67.3	1000
31/03/2021	AB8	25.1	69.9	72.3	820
04/04/2021	VN6	26.8	63.0	71.5	760
09/04/2021	AB15	29.0	64.4	74.3	670
18/05/2021	NM26	46.5	100.3	66.2	1490
19/05/2021	EB26	47.0	89.9	68.2	1260

Las distancias a las que se encuentran estas tormentas del cráter son comparables a las longitudes zonal y meridional de algunas de las tormentas observadas. Debido a ello, su presencia va a afectar a las medidas meteorológicas realizadas por el rover, ya que aunque no se produzca levantamiento de polvo en la zona, el área de influencia de las inestabilidades es mucho mayor que el delimitado por la tormenta de polvo.

5.3.2. Números de onda

Además de ver la distribución de las tormentas y la distancia a la que se encuentran de Jezero, podemos ver cuántas cabrían en un mismo círculo de latitud. Para ello, calculamos los números de onda de la inestabilidad

$$n = \frac{2\pi R_M \cos\varphi_{tormenta}}{L_{tormenta}}, \quad (5)$$

donde tomamos la longitud zonal L_x como $L_{tormenta}$. Este cálculo lo realizaremos solamente para las tormentas que hemos considerado grandes y marcado con un punto negro en la figura 27. Los resultados obtenidos para cada tormenta se encuentran en la tabla 10, junto a la fecha y longitud solar en las que fueron observadas, su centro y sus longitudes zonal y meridional.

Tabla 10: Tabla con los números de onda de las tormentas grandes.

Fecha	Tormenta	lon (E)	lat (N)	L_x (km)	L_y (km)	Número de onda	Ls(°)
21/02/2021	NB1	3.2	55.9	1000	1100	12	6.6
23/02/2021	AB1a	345.0	50.0	2100	1600	7	7.6
23/02/2021	EB2	333.0	56.1	1400	1400	9	8.1
06/03/2021	AB3	123.1	80.8	2100	1600	2	13.0
07/03/2021	VA1	318.8	56.8	2840	1640	4	13.7
07/03/2021	AB4	332.0	63.5	3200	2200	3	13.6

Fecha	Tormenta	lon (E)	lat (N)	L_x (km)	L_y (km)	Número de onda	Ls(°)
08/03/2021	AB5	103.0	71.4	2000	1100	3	14.0
24/03/2021	VA2	328.1	56.5	3670	1220	3	21.7
28/03/2021	VA3	276.4	63.2	3410	440	3	23.3
30/03/2021	VA5	329.0	58.1	2265	1820	5	24.5
31/03/2021	AB9	335.0	63.5	3300	2400	3	24.7
31/03/2021	NB10	193.4	64.3	1200	1000	8	24.9
31/03/2021	AB8	69.9	72.3	2500	1600	3	25.1
01/04/2021	NB10+11	180.0	56.4	1800	1600	7	25.4
02/04/2021	NB10+11	160.5	61.2	1900	1600	5	25.9
04/04/2021	AB12	340.0	64.0	3300	1900	3	26.6
05/04/2021	EB12	13.2	76.6	1100	1200	5	27.1
07/04/2021	UB14	297.7	64.0	2100	1300	4	28.1
08/04/2021	NB14	333.2	59.8	1500	1500	7	28.6
09/04/2021	AB15	64.4	74.3	1500	800	4	29.0
13/04/2021	AB16	142.0	80.5	2600	1600	1	30.7
13/04/2021	UB17	336.8	55.2	2200	1100	6	30.9
18/04/2021	EB18	306.8	63.2	2300	1200	4	33.3
19/04/2021	EB18	327.6	62.5	1700	1100	6	33.7
29/04/2021	UB19	336.0	47.1	2600	1500	6	38.3
04/05/2021	NB2+21	156.2	61.1	1300	800	8	40.5
08/05/2021	EB22+23	332.8	68.5	2400	2100	3	42.1
15/05/2021	AB24	284.0	75.3	2600	1100	2	45.3
17/05/2021	EB25	311.4	71.9	1400	1100	5	46.2
18/05/2021	EB25	318.1	70.8	2600	2000	3	46.5
19/05/2021	EB26	89.9	68.2	2600	2100	3	47.0
21/05/2021	UB27	303.3	62.5	2000	1200	5	48.1
22/05/2021	EB27	302.4	66.6	1700	1200	5	48.1
03/06/2021	UB28	201.5	66.0	2000	1000	4	53.6
07/06/2021	NB30	277.5	67.5	1400	1400	6	55.3
08/06/2021	NB31	145.4	57.2	2000	700	6	56.0
04/07/2021	EB34	292.0	71.8	2700	1000	2	67.5
06/07/2021	EB34	322.5	63.8	1700	1200	6	68.4
10/07/2021	EB35	298.6	78.5	3600	1300	1	69.7
21/07/2021	UB36	302.1	70.4	1600	900	4	74.6
22/07/2021	UB36	306.8	70.2	1900	1100	4	75.1

El rango obtenido de números de onda es muy amplio, extendiéndose desde $n = 1$ a $n = 12$. No obstante, el valor $n = 12$ corresponde a la tormenta NB1, la tormenta más pequeña entre las grandes y que se encuentra a una latitud menor que la mayoría. Por lo tanto, si dejáramos esa tormenta de lado, el rango obtenido para los números de onda sería $n = 1 - 9$. También vemos que a medida que las tormentas se encuentran a latitudes mayores, el número de onda se va reduciendo. Esto tiene sentido, ya que a medida que la latitud aumenta, el círculo de latitud disminuye, de manera que entran menos tormentas.

Otra manera de obtener el número de onda es viendo cuántas tormentas entran en el círculo de latitud a partir de las imágenes globales tomadas por MARCI. No obstante, para poder hacerlo de esta manera, debemos tener una imagen polar en la que se puedan observar más de una tormenta al mismo tiempo. Aunque hay unos días en los que esta condición se cumple, el día en el que mejor se aprecia es el 31 de marzo, que como se ha mencionado previamente, fue un día muy activo.

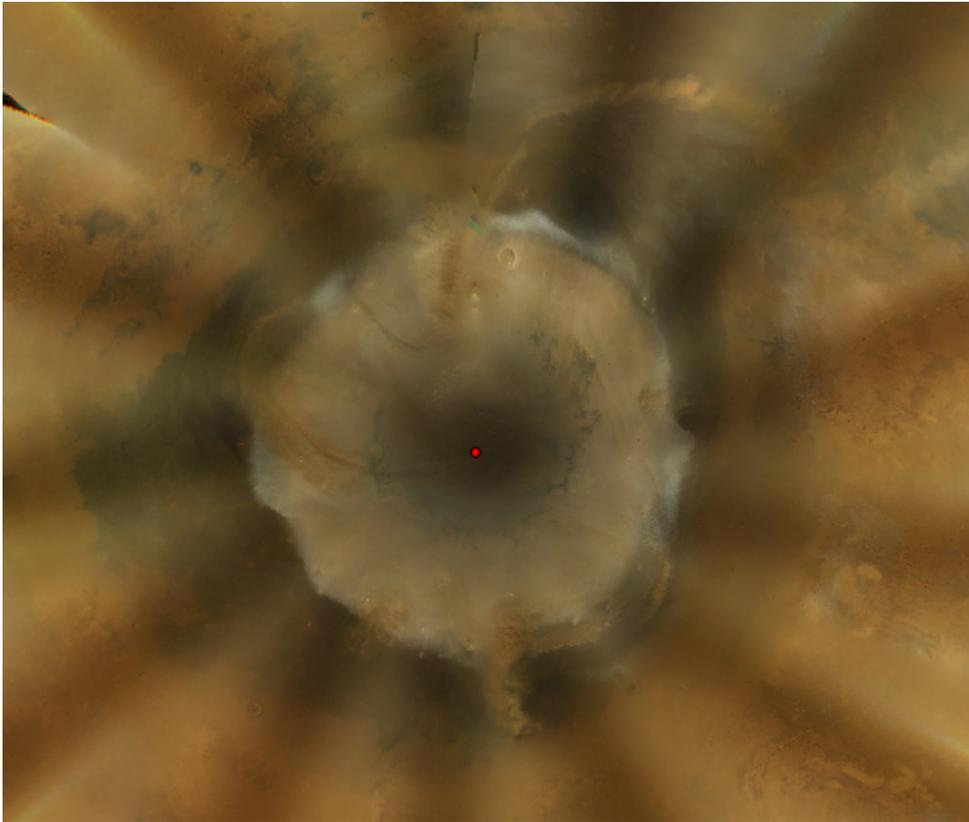


Figura 29: Imagen polar del planeta obtenida por MARCI el 31 de marzo. El punto rojo marca el polo norte.

En la figura 29 se distinguen 4 tormentas en el borde del casquete polar y un hueco en el que podría entrar otra tormenta. Por lo tanto, el número de onda correspondiente sería ~ 5 . Este resultado concuerda con los números de onda obtenidos al emplear la relación (5), ya que se ha obtenido un valor similar para un número de tormentas.

6. Interpretación teórica

En este apartado realizaremos un análisis teórico de las inestabilidades producidas, ya que distintas inestabilidades pueden producir distintas estructuras atmosféricas. Sin embargo, solamente nos centraremos en la inestabilidad baroclínica, ya que creemos que es la causante de las estructuras observadas.

Al ser Marte un planeta rápidamente rotante, la atmósfera fuera del ecuador se va a encontrar en un equilibrio geostrófico. Si asumimos que la atmósfera se encuentra en equilibrio hidrostático además de en equilibrio geostrófico, la variación de la velocidad del viento a medida que cambia la altura es directamente proporcional a las componentes horizontales correspondientes al gradiente de temperatura, de tal manera que se cumplen las relaciones [5]:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{g}{fT} \frac{\partial T}{\partial y} \quad (6)$$

$$\frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{g}{fT} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (7)$$

Para realizar este estudio teórico, hemos utilizado la base de datos Mars Climate Database (MCD), donde hemos obtenido la temperatura y el viento zonal para las latitudes $30 - 90 N$ a una longitud fija ($330 E$) para alturas entre superficie ($0 km$) y $z = 20 - 55 km$ para las longitudes solares $L_s = 5.4^\circ$ y $L_s = 90^\circ$. También hemos obtenido la tensión (stress) superficial producida por el viento para esas mismas longitudes solares. Los datos obtenidos se pueden ver gráficamente en las figuras 30, 31 y 35.

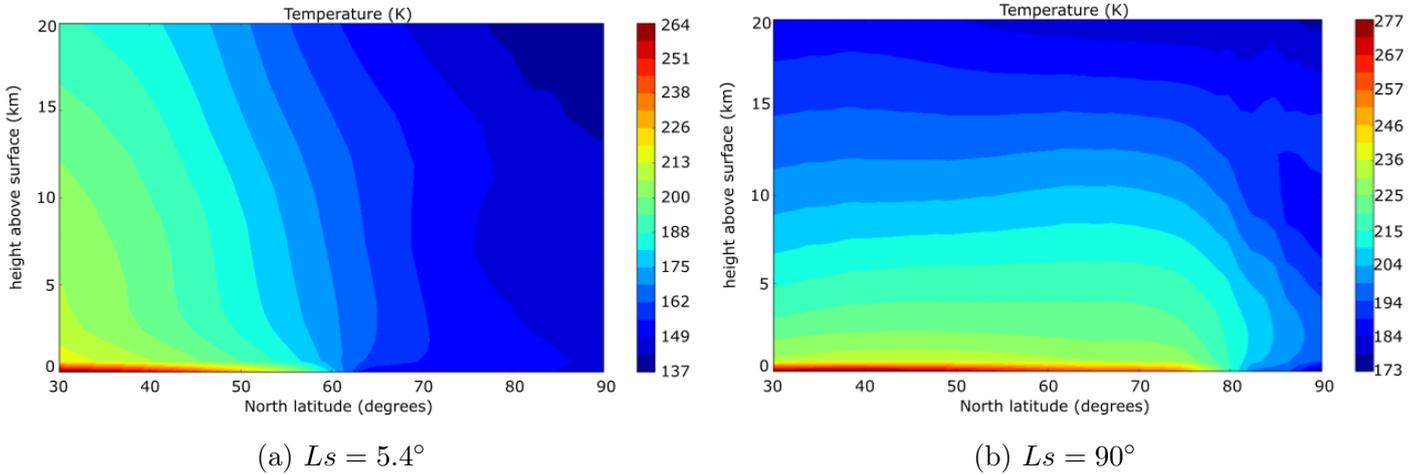


Figura 30: Temperatura del aire para la longitud $330 E$, latitudes $30-90 N$ y altura $0 - 20 km$ para $L_s = 5.4^\circ$ y $L_s = 90^\circ$ a las $LTST = 14 h$.

En la figura 30 podemos observar cómo varía la temperatura entre las latitudes $30 - 90 N$ a una longitud fija ($330 E$) para el rango de alturas $0 - 20 km$. A la hora de obtener los datos se ha tomado como hora local $LTST = 14 h$, ya que MARCI toma sus imágenes alrededor de esa hora. Como vemos en la figura 30, en las 2 gráficas tenemos un gradiente de temperatura en las zonas de la misma altura. Este dato es importante,

siendo C_p la constante de capacidad calorífica a presión constante de la atmósfera ($C_p = 830 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$) y S_T la estabilidad estática de la atmósfera. Este último parámetro indica si la parcela de aire es estable o inestable frente a movimientos verticales. Los perfiles de $N_B(z)$ calculados se muestran en la figura 32.

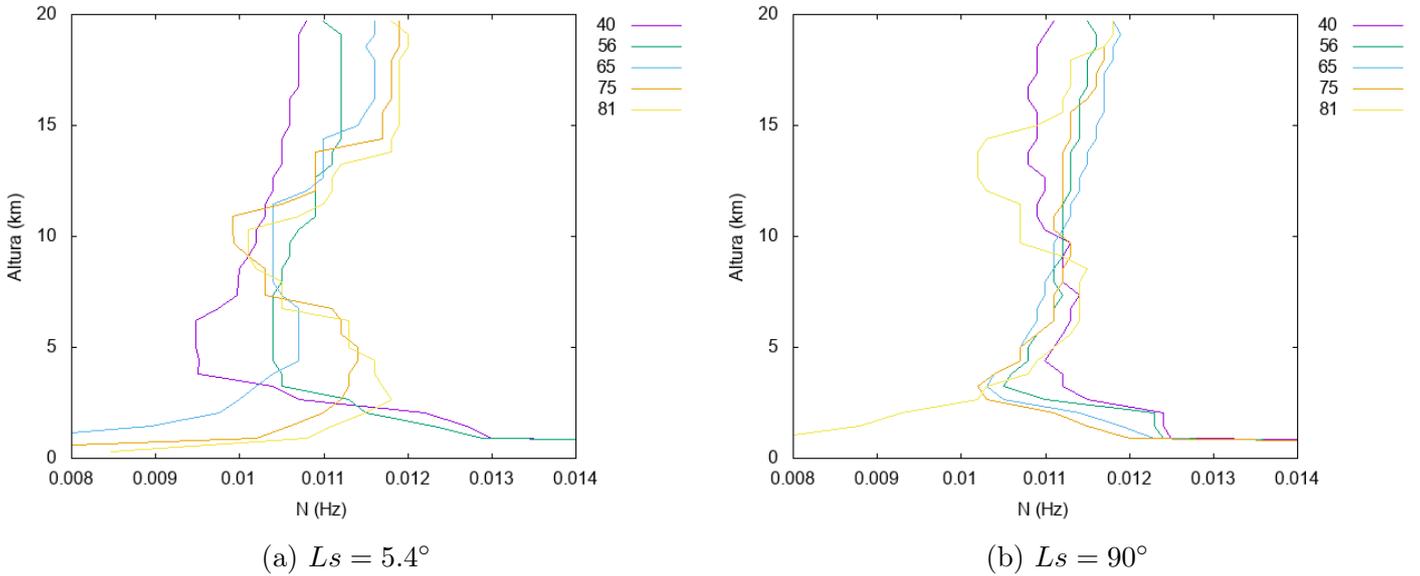


Figura 32: Frecuencia de Brunt-Väisälä para $L_s = 5.4^\circ$ y $L_s = 90^\circ$. Las líneas coloreadas y su número indican la latitud considerada.

Como se aprecia en las gráficas de la figura 32, los valores de las frecuencias son distintos para las diferentes alturas y latitudes, siendo todos los valores positivos ($N > 0$, $Ri > 0$). No obstante, para el rango en el que se esperan encontrar las tormentas, la mayoría de las frecuencias tienen un valor cercano a 0.011 Hz . Por lo tanto, tomaremos este valor como el valor de referencia a la hora de calcular el número de Richardson.

A partir de la frecuencia de Brunt-Väisälä y los valores del viento horizontal dados en la figura 31, calculamos el número de Richardson para distintas alturas y latitudes obteniendo las gráficas de la figura 33.

Si nos fijamos en los valores obtenidos del número de Richardson, vemos que los valores para $L_s = 5.4^\circ$ concuerdan con la idea de que las inestabilidades producidas son baroclínicas hasta cierta altura, donde para algunas latitudes concuerdan con que la inestabilidad es barotrópica. La inestabilidad barotrópica se ve favorecida para latitudes bajas $\sim 40^\circ N$ en el rango de alturas $300 - 3000 \text{ m}$.

Sin embargo, si miramos la gráfica correspondiente a la longitud solar $L_s = 90^\circ$, vemos que para las diferentes alturas a diferentes latitudes se producen inestabilidades barotrópicas además de las baroclínicas.

Esta mezcla de modos está fuertemente ligada a la intensidad que tiene el jet zonal, ya que cuando es más potente, el viento horizontal también varía con la altura. Por lo tanto, de acuerdo con la relación (8), vemos que el número Ri será mayor cuanto menor sea la

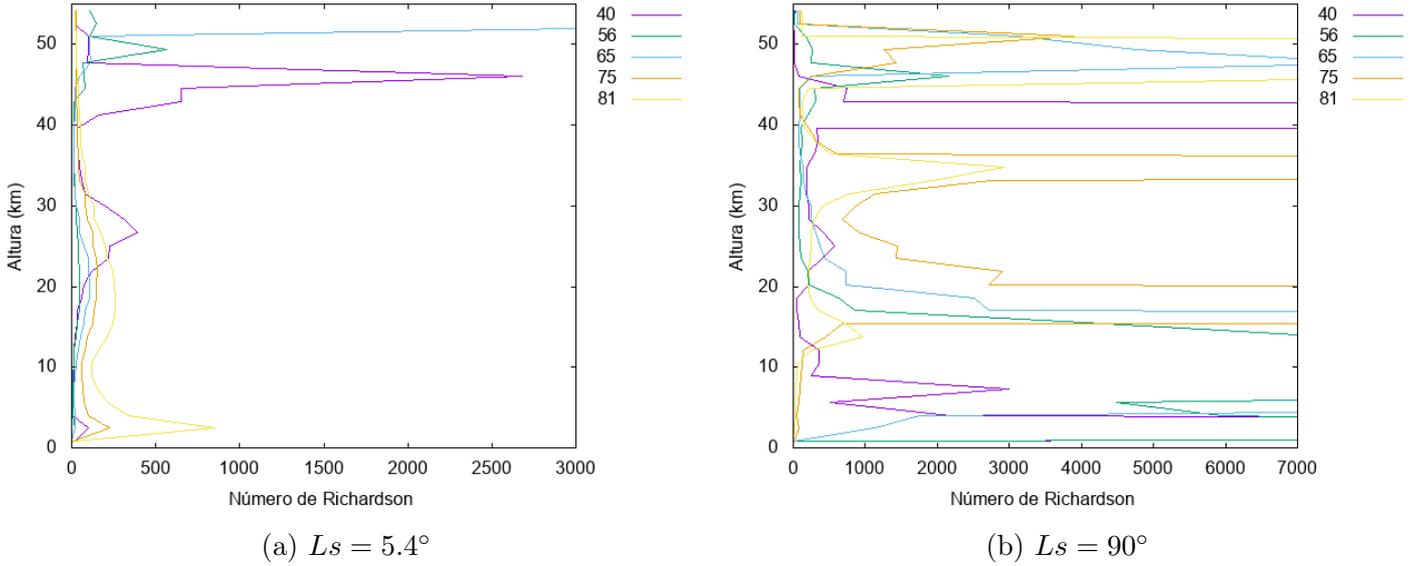


Figura 33: Número de Richardson para $L_s = 5.4^\circ$ y $L_s = 90^\circ$. Las líneas coloreadas y su número indican la latitud considerada.

variación del viento horizontal y mayor cuando la variación sea considerable. Como al comienzo del verano el viento horizontal no varía mucho con la altura, debido a que el jet es menos intenso, es de esperar que en esa época los números de Richardson tengan un valor mayor que al comienzo de la primavera cuando la variación del viento horizontal es mayor.

A continuación comparamos el tamaño de las inestabilidades con las predichas por los modelos de inestabilidad baroclínica. Un parámetro fundamental es el radio de deformación de Rossby

$$L_D = \frac{N_B H}{f}, \quad (10)$$

donde N_B es la frecuencia de Brunt-Väisälä, H es la escala de altura que se puede obtener a partir de la información de la figura 30 y f es el parámetro de Coriolis. De acuerdo con los modelos, la escala baroclínica es $\sim 3.9 - 5.5$ veces el radio de deformación L_D [7].

El parámetro de Coriolis viene dado por

$$f = 2\Omega \sin\varphi, \quad (11)$$

donde conocemos tanto la frecuencia rotacional sidérea del planeta (tabla 1) como la latitud a la que queremos calcular los radios de deformación de Rossby.

Por otro lado, necesitamos conocer la escala de altura

$$H = \frac{R_g T(z)}{\mu(z)g(z)}, \quad (12)$$

donde $g(z)$ es la aceleración gravitatoria, R_g es la constante de los gases ideales y $\mu(z)$ es la masa molar media de la atmósfera marciana ($\mu = 44.01 \text{ gmol}^{-1}$ [25]). H se obtiene sustituyendo la temperatura obtenida en la ecuación (12).

Los L_D obtenidos se presentan en la figura 34. Como las tormentas observadas no se suelen formar por encima de los 20 km [26][27], en vez de tomar un valor concreto para N y H tomaremos los valores calculados, ya que a diferencia del caso anterior con los números de Richardson, tenemos la información necesaria para cubrir todo el rango de alturas que nos interesa.

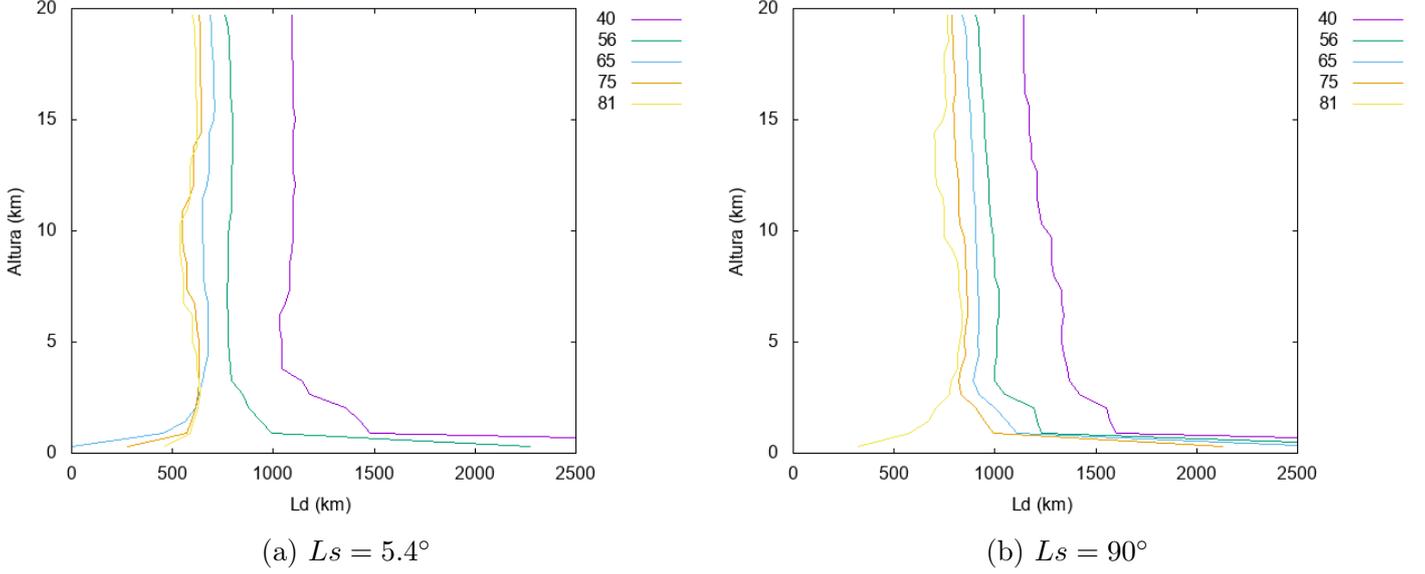


Figura 34: Radio de deformación de Rossby (L_D) para $L_s = 5.4^\circ$ y $L_s = 90^\circ$. Las líneas coloreadas y su número indican la latitud considerada.

Analizando los resultados obtenidos, vemos que el radio de deformación es mayor cuanto menor es la latitud, hasta el punto en el que si nos vamos a las latitudes más bajas, las inestabilidades observadas serían demasiado pequeñas. No obstante, si nos fijamos en el valor de L_D en las latitudes en las que se han observado las tormentas espirales y los arcos, vemos que los tamaños observados concuerdan con el tamaño que deberían tener las inestabilidades baroclínicas.

El conocer el radio de deformación de Rossby nos da la oportunidad de calcular el número de onda de la inestabilidad

$$n = \frac{2\pi R_M \cos\varphi}{L_{x,\text{teórico}}}, \quad (13)$$

donde R_M es el radio del planeta visto en la tabla 1 y $L_{x,\text{teórico}}$ tiene un valor comprendido entre $3.9 - 5.5 L_D$.

Al emplear la ecuación (13) utilizando $L_{x,\text{teórico}} = 3.9 L_D$ y $L_{x,\text{teórico}} = 5.5 L_D$, obtenemos que los números de onda toman los valores (1 - 5) y (1 - 4) respectivamente cuando $L_s = 5.4^\circ$ y (1 - 4) y (1 - 3) cuando $L_s = 90^\circ$. Al mirar estos resultados, tenemos que tener en cuenta que los valores altos pertenecerán a las latitudes bajas, mientras que los valores bajos a las latitudes altas debido al factor $\cos\varphi$. Por otro lado, vemos que los valores obtenidos para los números de onda son menores cuando $L_s = 90^\circ$. Esto se debe a que a medida que nos acercamos al solsticio de verano, los radios de deformación de Rossby aumentan, de manera que el número de tormentas que puede haber en el mismo círculo de latitud se reduce.

Comparando los valores teóricos obtenidos a partir del modelo MCD con los logrados a partir de las observaciones, vemos que los valores experimentales son en general algo mayores que los teóricos. Aunque el rango que más se aproxima al obtenido a partir de las imágenes corresponde a $Ls = 5.4^\circ$ y $L_{x,teórico} = 3.9 L_D$, los demás rangos teóricos solapan con los resultados del apartado 5.3.2. No obstante, el número de onda predicho por el modelo MCD es bastante menor que el obtenido. Esto puede deberse a que al medir la tormenta no se ha medido el tamaño completo de la inestabilidad, debido a que ésta no ha sido capaz de levantar polvo a lo largo de toda su extensión.

Una vez comprobado que las tormentas estudiadas tienen dimensiones consistentes con las predichas por la inestabilidad baroclínica, podemos ver si el viento horizontal observado concuerda con el obtenido al utilizar MCD. Para ello, nos fijamos en la figura 31 y todas las velocidades de desplazamiento que hemos calculado a lo largo de la sección 5.

Las velocidades obtenidas indican que a medida que nos acercamos al solsticio de verano las velocidades de desplazamiento de las tormentas van disminuyendo. Este resultado concuerda con lo predicho por el modelo MCD, porque como se puede ver en ellas, el cambio que hay en la intensidad del viento entre $Ls = 5.4^\circ$ y $Ls = 90^\circ$ es considerable. En $Ls = 5.4^\circ$ la velocidad máxima es $\sim 135 \text{ ms}^{-1}$, mientras que en $Ls = 90^\circ$ es $\sim 34 \text{ ms}^{-1}$. Pero no solamente tenemos que fijarnos en la velocidad máxima y que ésta disminuye con el tiempo, si no que la velocidad del viento a las alturas en las que se espera que se generen estas inestabilidades concuerde con las velocidades obtenidas. En general, al no ser grande la diferencia entre observaciones y modelos podemos decir que los datos observados concuerdan con los teóricos, y las pequeñas diferencias se deben a las limitaciones del modelo.

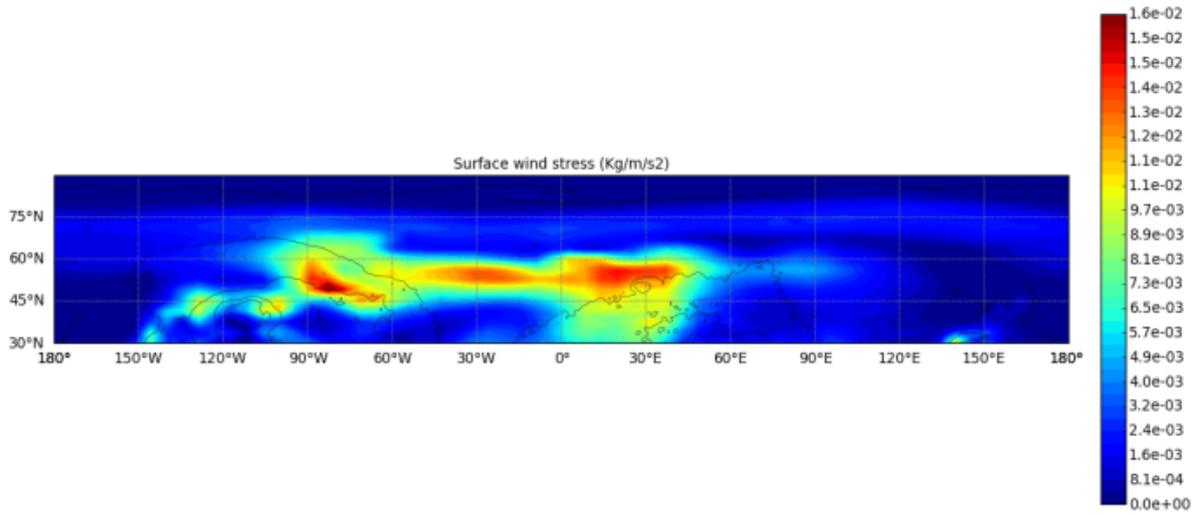
Completamos el análisis teórico analizando la tensión producida por el viento en la superficie del hemisferio norte. La fuerza de fricción en superficie producida por el viento (tensión superficial, unidad $Nm^{-2} = Pa$) se muestra en la figura 35, donde podemos ver cómo varía para las 2 longitudes solares seleccionadas.

Al comparar las gráficas entre sí, se puede ver cómo la tensión superficial máxima se encuentra por la zona en la que el Sol está en su punto más alto para $Ls = 5.4^\circ$, mientras que para $Ls = 90^\circ$ la tensión superficial es mucho menor que en los casos anteriores y no hay una zona muy definida con una tensión superior.

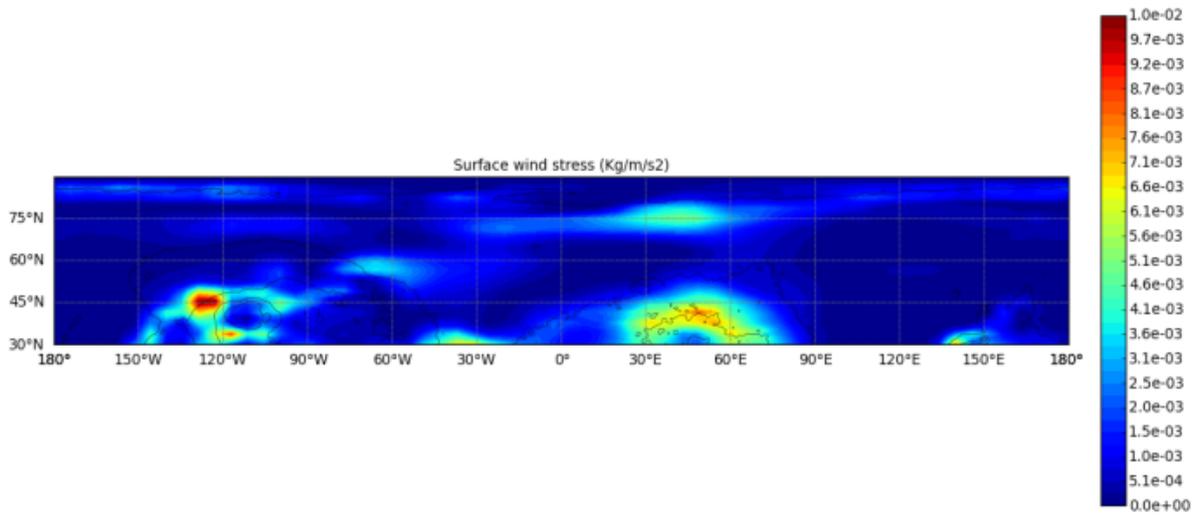
Mirando estas gráficas individualmente, en la gráfica 35a hay numerosas zonas en las que la tensión superficial es lo suficientemente elevada como para que se produzca un levantamiento de polvo. No obstante, la tensión máxima es $0.016 Pa$, de manera que supera el límite umbral por poco. Esto explica por qué en esta época la inmensa mayoría de las tormentas observadas son de carácter local con un eje mayor menor de 2000 km [6], ya que la tensión superficial es suficiente como para levantar algo de polvo, pero no grandes cantidades. Cabe destacar que el valor de tensión superficial máxima se encuentra en la zona preferente de las tormentas observadas.

Para finalizar tenemos la gráfica 35b en la que podemos ver que el valor máximo de la tensión superficial producida por el viento coincide con el valor umbral previamente mencionado. Este resultado concuerda con el hecho de que no se han observado tormentas de polvo cerca del solsticio de verano exceptuando la nube de polvo estacionaria levantada

en el polo norte (Tormenta 37).



(a) $L_s = 5.4^\circ$



(b) $L_s = 90^\circ$

Figura 35: Tensión superficial producida por el viento en la superficie del planeta para las latitudes 30 – 90 N y todas las longitudes para $L_s = 5.4^\circ$ y $L_s = 90^\circ$ cuando la hora local en la longitud 0 E es $LTST = 14 h$.

7. Conclusiones

En este trabajo hemos empleado las imágenes obtenidas por las cámaras VMC, a bordo del orbitador MEX, y MARCI, a bordo del MRO, para identificar y estudiar las tormentas de polvo producidas en el hemisferio norte de Marte desde la llegada del rover Perseverance (18 de febrero de 2021) hasta el 31 de agosto de 2021 ($L_s = 5.4^\circ - 92.8^\circ$). El uso simultáneo de ambas cámaras nos ha permitido tener una cobertura espacial y temporal mayor.

Se han identificado 71 tormentas a partir de las imágenes de MARCI y 7 a partir de las de VMC. De las 71 tormentas identificadas con las imágenes de MARCI, 37 de ellas han sido analizadas con la herramienta QGIS, mientras que todas las identificadas con las imágenes de VMC se han analizado con la aplicación Elcano.

Una vez tomadas las posiciones de las tormentas, vemos que éstas se forman en las denominadas “zonas de tormentas”, marcadas por las tierras bajas (planicies) de Arcadia, Acidalia y Utopia Planitia. Sin embargo, la mayoría se producen en Acidalia Planitia alrededor de la longitud $270\ E - 330\ E$. Además hemos visto que a medida que el casquete polar retrocede, la formación de tormentas migra a latitudes mayores. Esto se debe a la dependencia que tiene el “cinturón” de tormentas con la localización del jet zonal que se genera por el contraste meridional de la temperatura entre el polo (con hielo) y la banda adjunta sin hielo. Además, hemos visto que a medida que pasa el tiempo y nos acercamos al solsticio de verano el número de tormentas identificadas se reduce.

Hemos observado que las mismas tormentas se producen en las mismas posiciones de manera reiterada. Éstas varían diariamente llegando a formarse y desaparecer en cuestión de un día o llegando a evolucionar de un tipo de tormenta a otro. Es como si tenemos la misma tormenta separada 20 días o más, tal y como se ha visto con los arcos abiertos y las tormentas espirales. Además, cuando no desaparecen y se puede seguir su movimiento, se ha observado que las inestabilidades se desplazan de oeste a este con velocidades entre $3\ m\ s^{-1}$ y $35\ m\ s^{-1}$.

Por otro lado, hemos realizado un estudio teórico para comprobar si el origen de las estructuras observadas es baroclínico. Al comparar los tamaños y las velocidades de desplazamiento medidos con los calculados teóricamente, llegamos a la conclusión de que las tormentas tienen preferentemente un origen asociado a la inestabilidad baroclínica, aunque pueden estar presentes modos barotrópicos cuando la cizalla vertical del viento zonal es muy baja. Este caso no se ha estudiado explícitamente.

Finalmente, analizamos la tensión de viento superficial para ver su relación con el levantamiento de polvo en las tormentas. Al comparar los mapas de stress obtenidos del modelo MCD con lo visto en las imágenes de las cámaras llegamos a la conclusión de que hay concordancia y que a medida que avanza el año marciano y nos acercamos al solsticio de verano, el número de tormentas identificadas se reduce considerablemente al igual que lo hace la tensión superficial producida por el viento.

Referencias

- [1] G. Di Achille y B. M. Hynek. “Ancient ocean on Mars supported by global distribution of deltas and valleys”. En: *Nature Geoscience* 3.7 (2010), págs. 459-463.
- [2] J. W. Head III et al. “Possible ancient oceans on Mars: evidence from Mars Orbiter Laser Altimeter data”. En: *Science* 286.5447 (1999), págs. 2134-2137.
- [3] A. G. Fairén et al. “Episodic flood inundations of the northern plains of Mars”. En: *Icarus* 165.1 (2003), págs. 53-67.
- [4] R. M. Haberle et al. *The atmosphere and climate of Mars*. Cambridge University Press, 2017.
- [5] A. Sanchez-Lavega. *An introduction to planetary atmospheres*. CRC Press, 2010.
- [6] I. Ordóñez-Etxeberria et al. “Characterization of a local dust storm on Mars with REMS/MSL measurements and MARCI/MRO images”. En: *Icarus* 338 (2020), pág. 113521.
- [7] A. Sánchez-Lavega et al. “Cellular patterns and dry convection in textured dust storms at the edge of Mars North Polar Cap”. En: *Icarus* (2022), pág. 115183.
- [8] P. B. James et al. “North polar dust storms in early spring on Mars”. En: *Icarus* 138.1 (1999), págs. 64-73.
- [9] S. D. Guzewich et al. “Mars Orbiter Camera climatology of textured dust storms”. En: *Icarus* 258 (2015), págs. 1-13.
- [10] A. Chicarro, P. Martín y R. Trautner. “The Mars Express mission: an overview”. En: *Mars Express: the scientific payload* 1240 (2004), págs. 3-13.
- [11] Página de la ESA con información general de los instrumentos científicos de MEX (Consultada por última vez el 12 de agosto de 2022). https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Mars_Express/Mars_Express_instruments.
- [12] T. Ormston et al. “An ordinary camera in an extraordinary location: Outreach with the Mars Webcam”. En: *Acta Astronautica* 69.7-8 (2011), págs. 703-713.
- [13] A. Sánchez-Lavega et al. “Limb clouds and dust on Mars from images obtained by the Visual Monitoring Camera (VMC) onboard Mars Express”. En: *Icarus* 299 (2018), págs. 194-205.
- [14] R. W. Zurek y S. E. Smrekar. “An overview of the Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) science mission”. En: *Journal of Geophysical Research: Planets* 112.E5 (2007).
- [15] Página de la NASA con información general sobre la misión Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) y sus instrumentos científicos (Consultada por última vez el 10 de agosto de 2022). <https://mars.nasa.gov/mro/mission/science/>.
- [16] J. Bell III et al. “Mars reconnaissance orbiter Mars color imager (MARCI): instrument description, calibration, and performance”. En: *Journal of Geophysical Research: Planets* 114.E8 (2009).
- [17] J. Hernández-Bernal et al. “The 2018 Martian global dust storm over the South Polar Region studied with MEx/VMC”. En: *Geophysical Research Letters* 46.17-18 (2019), págs. 10330-10337.

-
- [18] I Ordóñez-Etxeberria et al. “MeteoMars, a tool to explore meteorological events on Mars.” En: *Seventh International Workshop on the Mars Atmosphere: Modelling and Observations*. 2022, pág. 1508.
- [19] E Millour et al. “Mars climate database”. En: *From Mars Express to ExoMars, 27-28 February 2018, Madrid, Spain*. 2018.
- [20] F. Forget et al. “Improved general circulation models of the Martian atmosphere from the surface to above 80 km”. En: *Journal of Geophysical Research: Planets* 104.E10 (1999), págs. 24155-24175.
- [21] J. L. Hollingsworth et al. “Orographic control of storm zones on Mars”. En: *Nature* 380.6573 (1996), págs. 413-416.
- [22] T. del Río-Gaztelurrutia et al. “Analysis of the evolution of Martian polar caps during Martian Years 34-35 from Mars Express Visual Monitoring Camera”. En: *EGU General Assembly Conference Abstracts*. 2021, EGU21-7787.
- [23] A. Angulo Manzananas. “Estudio de la variación interanual de la recesión de los casquetes polares de Marte a partir de imágenes de la cámara MEX-VMC”. En: (2022).
- [24] J. Hollingsworth, R. Haberle y J Schaeffer. “Seasonal variations of storm zones on Mars”. En: *Advances in Space Research* 19.8 (1997), págs. 1237-1240.
- [25] A. Sánchez-Lavega, S. Pérez-Hoyos y R. Hueso. “Clouds in planetary atmospheres: A useful application of the Clausius–Clapeyron equation”. En: *American Journal of Physics* 72.6 (2004), págs. 767-774.
- [26] R. Zurek y R. M. Haberle. “Dust in the Mars atmosphere”. En: *Sand and Dust on Mars* (1991).
- [27] A. D. Toigo et al. “The cascade from local to global dust storms on Mars: Temporal and spatial thresholds on thermal and dynamical feedback”. En: *Icarus* 302 (2018), págs. 514-536.

8. Apéndice

Tabla 11: Tabla con todas las tormentas identificadas mediante las imágenes de MARCI. Se muestra la fecha a la hora en la que se toma la imagen de la tormenta (hora terrestre y hora local marciana) y el nombre asignado a cada una de ellas. Hay dos columnas con los nombres, una con el nombre empleado en el trabajo y la otra con el nombre asignado cronológicamente. También se muestran la longitud zonal y meridional (sistema de medida de MeteoMars).

Fecha	Hora de captura(UT)	Lt(h)	Nombre	Nombre cronológico	$L_x(km)$	$L_y(km)$
21/02/2021	T22:58:21.488	14,5		NS1	200	200
21/02/2021	T02:25:03.878	14,5	NB1	NB2	900	1300
22/02/2021	T23:15:48.977	14,5		NS1	200	300
22/02/2021	T02:42:32.302	14,5		AM2	1200	500
23/02/2021	T01:07:51.780	14,5	NS1b	NS2b	600	800
23/02/2021	T02:59:58.143	14,5	AB1a	AB2a	1100	1100
23/02/2021	T23:33:13.392	14,5		NB1	1000	1100
23/02/2021	T06:44:16.380	14,5	BS2	BS3	500	300
24/02/2021	T03:17:20.743	14,5	NM1a+1b	NM2a+2b	1300	500
24/02/2021	T05:09:29.274	14,5	EB2	EB3	900	1200
26/02/2021	T11:20:41.553	14,5		NS4	300	200
26/02/2021	T11:20:41.553	14,5		NS5	1100	400
27/02/2021	T11:38:10.090	14,5		NM4+5	1300	600
27/02/2021	T20:58:39.641	14,5		NS6	700	800
28/02/2021	T00:42:55.890	14,5		AS7	500	800
03/03/2021	T12:47:42.745	14,5		NS8	1000	500
04/03/2021	T09:20:51.504	14,5		NS9	600	1000
04/03/2021	T11:13:00.894	14,5		NS8	600	500
05/03/2021	T11:30:25.281	14,5		NM8	1000	1000
05/03/2021	T07:46:10.016	14,5		FB10	700	1500
06/03/2021	T09:55:37.905	14,5		AB8	3200	2300
	T11:47:46.401	14,5				
06/03/2021	T04:19:26.726	14,5	AB3	AB11	1800	1500
07/03/2021	T12:05:06.673	14,5	AB4	AB12	2700	2100
	T13:57:15.864	14,5				
07/03/2021	T15:49:24.479	14,5		NS13	700	800
08/03/2021	T06:46:15.929	14,5	AB5	AB14	1700	1100
08/03/2021	T08:38:18.575	14,5	AM6	AM15	900	1300
10/03/2021	T11:05:14.266	14,5		NS16	500	500
11/03/2021	T05:46:23.289	14,5		EM17	600	1000
12/03/2021	T06:03:43.556	14,5		ES17	400	1000
12/03/2021	T22:52:38.048	14,5		NS18	500	400

Fecha	Hora de captura(UT)	Lt(h)	Nombre	Nombre cronológico	Lx(km)	Ly(km)
13/03/2021	T00:44:40.939	14,5		NS18	800	100
13/03/2021	T17:33:41.653	14,5		NS19	300	600
20/03/2021	T15:53:14.100	14,5	NM7	NM20	900	900
23/03/2021	T09:14:42.385	14,5		NS21	700	400
24/03/2021	T09:32:04.956	14,5		NS21	1000	600
29/03/2021	T22:11:34.606	14,5	NS8	NS22	600	700
31/03/2021	T02:13:06.908	14,5	AB9	AB23	2800	2300
	T04:05:15.664	14,5				
31/03/2021	T13:25:43.822	14,5	NB10	NB24	1300	1000
31/03/2021	T15:17:50.268	14,5		NS25		
	T17:09:58.866	14,5	NS11	NS25	600	500
31/03/2021	T20:54:14.884	14,5	AB8	AB22	1900	1900
	T22:46:18.521	14,5				
01/04/2021	T15:35:08.266	14,5	NB10+11	NB24+25	1500	1400
01/04/2021	T06:14:42.676	14,5		NS26	700	600
02/04/2021	T15:52:26.328	14,5		NB24+25	1800	1600
	T17:44:34.603	14,5				
02/04/2021	T04:39:51.119	14,5		EB26	1300	1900
04/04/2021	T05:14:35.317	14,5	NB12	NB27	1200	1000
04/04/2021	T23:55:44.835	14,5		FB28	1200	1500
05/04/2021	T01:47:48.041	14,5		UB28	1200	1600
05/04/2021	T03:39:50.554	14,5	EB12	EB27	1000	1600
07/04/2021	T09:50:49.229	14,5	UB14	UB29	1700	1300
	T11:42:57.450	14,5	NS14	NS29	700	800
07/04/2021	T15:27:07.390	14,5	NS13	NS30	900	600
08/04/2021	T10:08:08.970	14,5	NB14	NB29	1400	1400
08/04/2021	T13:52:24.457	14,5		NS30	500	400
09/04/2021	T12:17:40.936	14,5		AS31	400	900
09/04/2021	T04:49:12.614	14,5	AB15	AB32	1600	800
	T06:41:15.742	14,5				
09/04/2021	T08:33:22.931	14,5		Eb29	1000	1100
10/04/2021	T06:58:37.677	14,5		AM32	1000	900
10/04/2021	T06:58:37.677	14,5		AM33	600	1200
11/04/2021	T07:15:56.447	14,5		NS34	400	200
12/04/2021	T07:33:14.742	14,5	NM16	NM34	1200	500
12/04/2021	T13:09:35.492	14,5		NS35	600	100
13/04/2021	T04:06:27.280	14,5				
	T05:58:32.589	14,5	AB16	AB34	2800	1600
13/04/2021	T11:34:45.623	15	UB17	UB35	2000	800
	T13:26:54.782	14,5				
14/04/2021	T10:00:01.147	14,5		AB36	1000	1800
15/04/2021	T00:57:25.620	14,5		NS37	300	400
15/04/2021	T14:02:44.174	14,5		AB35	2300	1800
16/04/2021	T23:41:54.577	14,5		NS38	400	300
17/04/2021	T18:23:46.780	14,5				
	T20:15:57.348	14,5	NS18	NS39	1000	400

Fecha	Hora de captura(UT)	Lt(<i>h</i>)	Nombre	Nombre cronológico	Lx(<i>km</i>)	Ly(<i>km</i>)
18/04/2021	T00:00:16.041	14,5		NS38	400	600
18/04/2021	T16:49:57.118	15				
	T18:42:10.332	15	EB18	EB39	2300	1200
19/04/2021	T17:08:21.627	14,5	EB18	EB39	1500	1100
20/04/2021	T17:26:45.015	15		UB39	1800	900
24/04/2021	T09:19:12.920	15		AB40	2100	1300
24/04/2021	T18:40:04.779	15		NS44	800	500
25/04/2021	T20:50:42.979	15		AM41	1200	1700
28/04/2021	T21:45:39.001	15	ES19	ES42	600	800
29/04/2021	T22:04:00.825	15				
	T23:56:14.784	15	UB19	UB42	2200	1200
02/05/2021	T13:38:14.619	15		NS43	400	100
03/05/2021	T10:12:09.054	15				
	T12:04:19.245	15		NS44	600	400
03/05/2021	T13:56:32.083	15		AB45	1300	1200
	T15:48:45.842	15				
04/05/2021	T14:14:50.440	15	NB20+21	NB44+45	1500	1100
05/05/2021	T03:20:08.907	15				
	T05:12:22.078	15		EM46	700	1000
06/05/2021	T01:46:18.848	15				
	T03:38:32.691	15		NS47	300	300
06/05/2021	T03:38:32.691	15		EM46	800	900
06/05/2021	T14:51:35.601	15		AB48	1800	1100
	T16:43:49.242	15				
06/05/2021		15		NS49	300	300
07/05/2021	T05:49:07.163	15		EB46+49	1300	1000
07/05/2021	T05:49:07.163	15				
08/05/2021	T04:15:11.386	15				
	T06:07:24.818	15	EB22+23	EB46+49	2400	2000
09/05/2021	T00:49:06.860	15				
	T02:41:15.744	15				
	T04:33:28.402	15				
	T06:25:41.898	15		AB46+49	3700	2300
	T08:17:54.546	15				
10/05/2021	T21:41:31.836	15		NS50	500	100
11/05/2021	T23:52:05.637	15		AS51	700	400
12/05/2021	T01:44:13.258	15		AS51	700	400
15/05/2021	T10:07:50.298	15				
	T12:00:03.142	15	AB24	AB52	2700	1000
	T13:52:14.072	15				
17/05/2021	T10:44:33.626	15	EB25	EB53	1100	1200
	T12:36:46.927	15				
18/05/2021	T01:42:02.124	15	NM26	NM54	1500	500

Fecha	Hora de captura(UT)	Lt(h)	Nombre	Nombre cronológico	Lx(km)	Ly(km)
18/05/2021	T11:02:51.576	15	EB25	EB53	3800	2000
	T12:55:04.866	15				
	T07:18:27.835	15				
	T09:10:38.382	15				
19/05/2021	T00:08:05.401	15	EB26	EB54	2600	1800
	T02:00:18.999	15				
	T03:52:30.768	15				
	T05:44:39.059	15				
20/05/2021	T04:10:47.211	15		UB54	1800	1100
20/05/2021	T15:23:49.587	15		EB55	1900	1300
21/05/2021	T13:49:57.029	15	EB27	UB55	1900	1300
	T15:42:10.115	15				
22/05/2021	T14:08:18.945	15				
	T16:00:32.199	15	EB27	EB55	1800	1200
23/05/2021	T05:05:47.215	15		AB56	2000	2000
23/05/2021	T14:26:36.873	15		ES55	600	400
24/05/2021	T05:24:03.966	15		UB56	1700	600
	T07:16:15.562	15				
02/06/2021	T06:16:29.238	15		AB57	1300	1100
03/06/2021	T06:34:47.721	15	UB28	UB57	2000	1000
04/06/2021	T05:00:55.814	15		EB57		
		15			3200	1500
	T03:08:47.951	15				
06/06/2021	T01:53:08.112	15		NS58	600	200
07/06/2021	T02:11:27.781	15	NS29	NS58	600	200
07/06/2021	T02:11:27.781	15	NB30	NB59	1000	900
07/06/2021	T11:32:16.245	15		NS60	400	300
	T13:24:29.885	15				
08/06/2021	T02:29:46.955	15		EB59	1000	1400
	T04:21:58.496	15				
08/06/2021	T11:50:34.224	15				
	T13:42:47.224	15	NB31	NB60	2000	800
	T15:35:00.591	15				
09/06/2021	T10:16:38.495	15				
	T12:08:48.766	15		AB60	3600	700
	T14:00:56.439	15				
	T15:53:12.348	15				
19/06/2021	T15:16:31.072	15		EM61	700	900
20/06/2021	T15:35:16.009	15	NS32	NS61	900	400
	T13:43:05.975	15				
21/06/2021	T14:01:48.942	15		AB61	1900	1200
	T15:53:59.247	15				
22/06/2021	T08:43:50.481	15				
	T10:36:06.122	15	NS33	NS62	500	400
	T12:28:20.807	15				
29/06/2021	T22:08:29.902	15		NS63	700	300

Fecha	Hora de captura(UT)	Lt(h)	Nombre	Nombre cronológico	Lx(km)	Ly(km)
03/07/2021	T21:31:14.453	15		EB64	1600	700
	T23:23:25.456	15				
04/07/2021	T19:57:49.428	15	NB34	NB64	1800	900
	T21:50:02.756	15				
	T23:42:13.818	15				
05/07/2021	T09:03:20.170	15				
	T10:55:33.289	15				
	T20:16:36.521	15				
	T22:08:50.042	15		UB64	2700	1200
06/07/2021	T18:43:04.453	15				
	T20:35:19.566	15	EB34	EB64	1300	900
	T22:27:33.329	15				
07/07/2021	T02:11:54.490	15		NS65	500	300
07/07/2021	T20:54:00.211	15		UB64	1300	900
09/07/2021	T00:57:07.933	15				
	T02:49:18.302	15		EB67	3300	1400
	T04:41:27.855	15				
	T21:31:25.837	15				
	T23:23:40.662	15				
10/07/2021	T01:15:53.702	15	EB35	EB66	3900	1400
	T03:08:04.514	15				
19/07/2021	T04:04:21.372	15		NS68	800	300
	T05:56:35.381	15				
21/07/2021	T06:34:00.008	15	UB36	UB68	1700	800
22/07/2021	T06:52:45.865	15	UB36	UB68	1500	800
	T05:00:30.934	15				
23/07/2021	T07:11:27.885	15		UB68	1400	800
25/07/2021	T05:56:30.181	15				
	T07:48:45.330	15		ES69	900	600
26/07/2021	T17:28:25.107	15		NS70	500	400
	T19:20:39.517	15				
	T21:12:55.356	15				
27/07/2021	T17:47:10.527	15		NS70	900	500
28/07/2021	T16:13:43.164	15				
	T18:05:53.008	15		NS70	800	600
24/08/2021	T19:01:06.197	15		NS71	400	300
25/08/2021	T15:35:16.453	15		NS71	600	400
26/08/2021	T17:46:06.806	15	NS37	NS71	700	500
27/08/2021	T16:12:26.363	15	NS37	NS71	900	500
28/08/2021	T16:31:03.427	15	NS37	NM71	1000	700
29/08/2021	T16:49:42.858	15	NS37	NM71	1000	600
30/08/2021	T19:00:37.106	15	NS37	NM71	1100	600