

Análisis de la composición superficial de Vesta a partir de los datos aportados por la misión espacial DAWN

Autor:

Bernardo José Llamas Verna

Tutor:

Dr. René Duffard. Instituto de Astrofísica de Andalucía (CSIC)

Máster en Geofísica y Meteorología

Curso 2015-2016

Universidad de Granada.

Motivación del presente estudio

El estudio que aquí se presenta tiene su motivación en sumarse al análisis de los datos obtenidos con la misión espacial DAWN, misión que ha marcado un hito histórico al ser la primera que ha alcanzado el cinturón de asteroides para estudiar *in situ* los cuerpos Vesta y Ceres gracias al avance que ha supuesto la incorporación de un motor de iones, así como por los datos recopilados con la combinación de los diferentes instrumentos de medida que portaba.

El propósito por el cual se planteó que la misión DAWN visitara los cuerpos Vesta y Ceres fue para recopilar información acerca de los primeros instantes de la creación del Sistema Solar en la etapa de aparición de los primeros cuerpos como resultado de la acreción, ya que se cree que estos dos cuerpos apenas han evolucionado desde ese período. Esto se debe a su situación entre Marte y Júpiter, siendo éste último el que por su acción gravitatoria no ha permitido que estos cuerpos siguieran creciendo por acreción. Por lo tanto, Vesta y Ceres permitirían comprender mejor cómo es el proceso de formación de planetas y cómo determina la composición de los primeros planetesimales la composición final de los planetas resultantes.

Sobre Vesta, que es el cuerpo sobre el que se centra este trabajo, el interés sobre su estudio radica en conocer su naturaleza basáltica y su diferenciación geoquímica en capas de diferente composición, proceso que se piensa que es el mismo que se produjo en la formación de los planetas rocosos. Así, la misión DAWN se planteó el determinar la composición, tanto superficial como de capas más internas que quedaron al descubierto por la acción del impacto de meteoritos, además de hallar los productos resultantes del decaimiento radiactivo (^{26}Mg como resultado del decaimiento de ^{26}Al). Estos elementos radiactivos habrían contribuido a la fusión de material en el interior del núcleo aportando al proceso de diferenciación en capas junto con la acción de los impactos.

El presente trabajo analiza las imágenes que la misión DAWN obtuvo con la Framing Camera (cámara de 8 filtros) para determinar la composición superficial de Vesta en

cuanto a los tres materiales basálticos que se han clasificado en los meteoritos HEDs (meteoritos con origen en Vesta). Sobre una zona de estudio seleccionada de la que se tengan imágenes en 8 filtros, se calcula la reflectividad en cada píxel. Una vez obtenida dicha reflectividad en los 8 filtros se compara con la reflectividad de los tres materiales de referencia (eucrite, diogenite y howardite) para las mismas longitudes de onda de cada filtro a fin de determinar cuál es la composición predominante en cada caso.

El método que aquí se describe se ofrece como una propuesta para una primera determinación de la composición superficial de Vesta empleando solo los datos que aporta la Framing Camera. Este método también se ofrece para aquellos casos en los que solo se tengan datos de la FC, ya que es el único instrumento de la nave espacial que operó durante toda la misión obteniendo una cobertura global de la superficie de Vesta.

Una vez expuestos los resultados y las conclusiones obtenidas, se propone al final unas futuras líneas de investigación para mejorar el empleo de los datos que aporta la FC.

Resumen:

El presente Trabajo de Fin de Máster estudia la composición superficial del cuerpo 4 Vesta, situado en el Cinturón de Asteroides, a partir de los datos proporcionados por la misión espacial DAWN. En concreto, se analizan las imágenes aportadas por la FC (*Framing Camera*) que lleva la nave espacial y que capta imágenes en 8 filtros diferentes (cada una con su longitud de onda propia), y mediante la comparación con el espectro de reflectividad de tres meteoritos HED que se cree provienen de 4 Vesta, se determina el porcentaje que aporta cada material (Howardite, Eucrite y Diogenite) a la composición superficial con el fin de saber la distribución espacial de dichos materiales.

Palabras clave:

4 Vesta, DAWN, Framing Camara, basalto, eucrite, diogenite, howardite, HED.

ÍNDICE

I.	INTRODUCCIÓN	9
1.	Justificación	9
2.	Vesta: descubrimiento y parámetros orbitales	10
3.	Morfología	11
4.	Formación y composición	13
5.	Composición de Vesta	15
II.	MISION DAWN	20
1.	Objetivos	20
2.	Instrumentos empleados	21
2.1	Framing Camera (FC)	21
2.2	Gravity Science	22
3.	Trayectoria y órbitas de la nave espacial DAWN	23
3.1	Survey Orbit	23
3.2	HAMO-1 (High Altitude Mapping Orbit-1)	24
3.3	LAMO (Low Altitude Mapping Orbit)	25
3.4	HAMO-2 (High Altitude Mapping Orbit-2)	25
III.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	27
IV.	PROCEDIMIENTO SEGUIDO	27
1.	Obtención de las imágenes	27
2.	Corrección de las imágenes	29
3.	Conversión de las imágenes en matrices	31

4. Meteoritos HEDs empleados como referencia	32
5. Programa para la comparación de espectros	35
6. Diagrama de flujo: resumen del procedimiento	41
V. RESULTADOS	42
1. Selección de la zona de estudio	42
2. Procesamiento de las imágenes	44
3. Resultados obtenidos	47
VI. CONCLUSIONES	49
VII. LIMITACIONES DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS	51
VIII. PROPUESTA DE LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN	53
IX. BIBLIOGRAFÍA	54
1. Artículos	54
X. ANEXOS	56
1. Anexo 1: Definiciones mineralógicas y compuestos empleados en el presente trabajo	56
2. Anexo 2: Esquema químico de los minerales que aparecen en el presente estudio	59
3. Anexo 3: Programa completo de comparación de reflectividades.	59

IMAGENES

Imagen 1: Comparativa de tamaños entre Ceres, Vesta y Pallas.	10
Imagen 2: Vista de la superficie de Vesta.	11
Imagen 3: Imagen 3A: Esquema de los cráteres Rheasilvia y Veneia en el polo sur.	13
Imagen 4: Imagen 4A: Espectro de reflectividad de Vesta. Imagen 4B: Espectro de reflectividad de Vesta comparado con el de los materiales eucrite, diogenite y howardite que componen los meteoritos HEDs.	16
Imagen 5: $\delta^{17}\text{O}$ (vs) $\delta^{18}\text{O}$ para grupos condritas en comparación con HEDs, SNC, Pallasite, Angrite y material lunar.	19
Imagen 6: Líneas de fraccionamiento de la masa del isótopo de oxígeno de Marte, Tierra, Luna, Vesta y un cuerpo de angrita.	19
Imagen 7: Esquema de la trayectoria de la nave DAWN hacia Vesta.	23
Imagen 8: Esquema de las órbitas empleadas por DAWN en torno a Vesta.	26
Imagen 9: Enlaces de descarga de las imágenes de la Framing Camera.	27
Imagen 10: Ejemplo de datos asociados a una imagen.	28
Imagen 11: Desplazamiento entre las imágenes FC21B0011847_11300034457F1D y FC21B0011854_11300034550F8D de la órbita HAMO, Ciclo 6, Órbita 2.	29
Imagen 12: Vista del programa AstroImageJ junto con su barra de control.	29
Imagen 13: Comparativa de los espectros normalizados de Eucrite, Diogenite y Howardite.	33

Imagen 14: Diagrama de flujo del proceso de análisis de las imágenes FC expuesto en el presente trabajo.	41
Imagen 15: Imagen15A: localización de la región de estudio dentro de la intersección del cráter Rheasilvia y Veneia.	42
Imagen 16: Región de estudio a través del programa AstroImageJ.	43
Imagen 17: Morfología del terreno sobre la zona de estudio.	44
Imagen 18: Coordenadas y reflectividad asociada del último píxel.	45
Imagen 19: reflectividad asociada al último píxel de la imagen FC21B0011700_11299174059F1D.FIT.	46
Imagen 20: Distribución de los píxeles asociados con material eucrite (rojo) y diogenite (azul) sobre la región de estudio.	48
Imagen 21: Disposición de material con idéntica absorción sobre los cráteres Rheasilvia y Veneia donde se encuentra la zona de estudio.	50
Imagen 22: Representación del espectro eucrite que se toma como referencia.	52
Imagen 23: Expresiones BC(Band Curvature), BT (Band Tilt) y BS (Band Strength).	53
Imagen 24: Esquema de la composición química de los minerales que aparecen en la composición superficial de Vesta.	62

TABLAS

Tabla 1: Valores de referencia de reflectividad para identificar material howardite.	34
Tabla 2: Valores de referencia de reflectividad para identificar material eucrite.	34
Tabla 3: Valores de referencia de reflectividad para identificar material diogenite.	34
Tabla 4: Valores de la respuesta de cada filtro al flujo solar.	37
Tabla 5: Nomenclatura de las imágenes de la zona de estudio.	44
Tabla 6: Resumen de las distancias al Sol a la que fueron tomadas las imágenes de la región de estudio.	47
Tabla 7: Distribución por materiales de la zona de estudio	48

I. INTRODUCCIÓN

1. Justificación

Nuestro entendimiento actual de la formación del Sistema Solar supone que éste comenzó a partir de una nube de gas y polvo fría bajo condiciones similares a las que experimenta cualquier nebulosa. Con el tiempo, la nebulosa iría evolucionando con la formación de un Sol primitivo en el centro que contribuiría a la disipación de polvo y gas hacia zonas alejadas de dicho centro, donde comenzarían a chocar entre sí y agruparse creando unos primeros cuerpos denominados planetesimales, que a su vez formarían otros cuerpos mayores: los planetas. En el proceso, estos cuerpos enormes serían calentados por las colisiones y el decaimiento radiactivo.

Los asteroides serían los restos de esos planetesimales que no pudieron formar un planeta mayor. Los materiales que continuamente aparecen en los asteroides son los más primitivos y menos evolucionados, y esta es la razón de por qué es importante estudiarlos: suponen una ventana hacia las condiciones primigenias de la formación del Sistema Solar, así como que su evolución afecta a la composición final de los cuerpos resultantes de mayor tamaño (Russell et al. (2004) & Duffard (2012)).

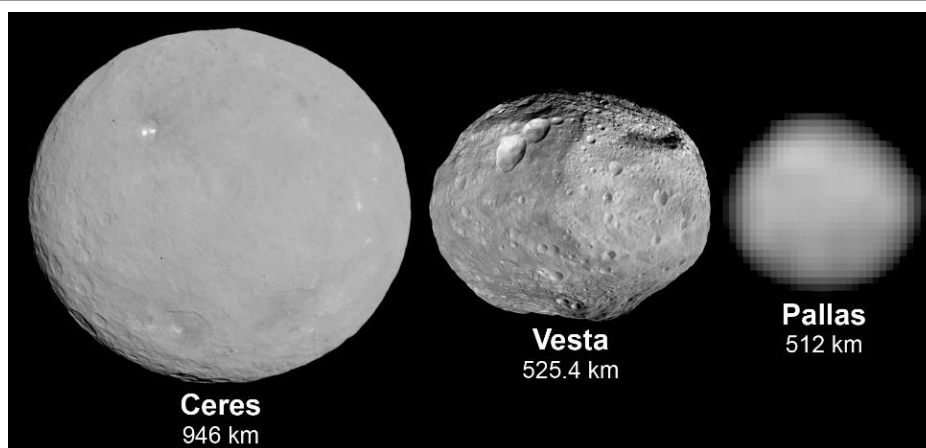
En algunos de los planetesimales que se unieron para formar objetos mayores, no se produjo ninguna evolución térmica y aún hoy se puede observar el material condrítico original; mientras que en otros se produjo una evolución térmica más complicada en el que, tras la colisión, los elementos se llegan a fundir haciendo que los más pesados caigan hacia el interior del cuerpo y los más ligeros queden en el exterior, en la corteza. El resultado es un cuerpo con un núcleo denso metálico, un manto de material más ligero rico en olivino y una capa aún más ligera de material basáltico. Este proceso se denomina diferenciación geoquímica (Duffard (2012)).

Ceres, Pallas y Vesta son los tres cuerpos más grandes del cinturón de asteroides, aparentemente intactos desde el período inicial de la formación del Sistema Solar. Las superficies de Ceres y Pallas son difíciles de interpretar en términos de determinar su composición a partir de su espectro de reflectividad. De los resultados que se infieren de Ceres se deduce que contiene agua dentro de estructuras arcillosas. En cambio Vesta, por

otro lado, tiene una huella de magma basáltico en su reflectividad espectral, lo que sugiere un derretimiento extensivo, así como una evolución térmica en el tiempo que pudiera haber provocado diferenciación geoquímica (Russell et al. (2013)).

Vesta no es el único cuerpo menor basáltico en nuestro Sistema Solar. Vesta es el único asteroide o protoplaneta basáltico que ha sobrevivido aparentemente intacto desde su formación, de ahí el interés que ejerce para ser estudiado: el ser una de las mejores ventanas para conocer los primeros instantes de la formación del Sistema Solar, en concreto el momento en el que empiezan a aparecer los primeros cuerpos diferenciados (Duffard (2012)). Por esta razón, en el presente trabajo se busca desarrollar un método de análisis de los datos aportados por la misión DAWN, que permaneció en órbita alrededor de Vesta, a través de la Framing Camera para identificar los diferentes materiales que componen su superficie y que son el resultado de este proceso de diferenciación química que ha sido clave en la formación de Vesta.

Imagen 1: Comparativa de tamaños entre Ceres, Vesta y Pallas.



2. Vesta: descubrimiento y parámetros orbitales

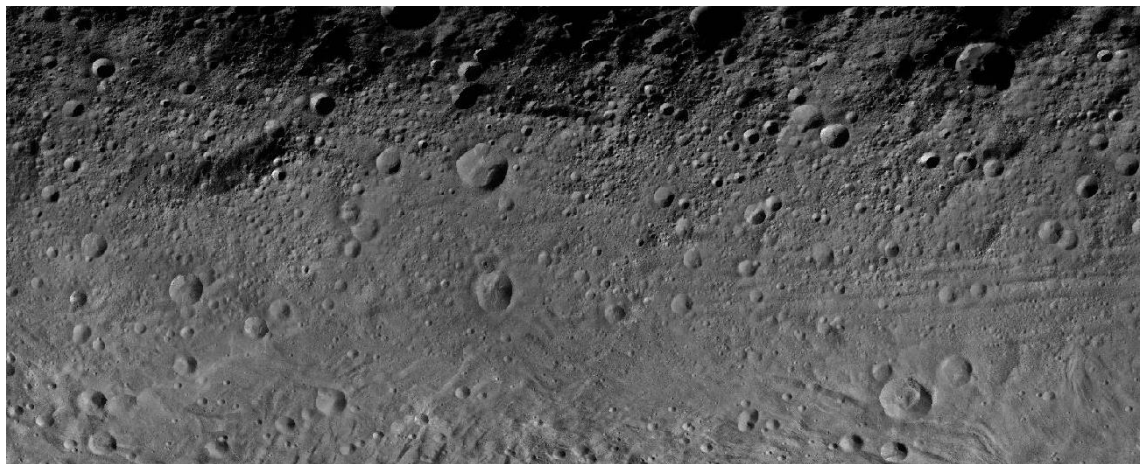
Vesta fue descubierto el 29 de marzo de 1807 por el médico y físico alemán Heinrich Wilhelm Olbers, en Bremen. Olbers bautizó al asteroide como Vesta, por la diosa virgen romana del hogar, por sugerencia de su amigo Carl Friedrich Gauss. El hecho de que siempre venga escrito como 4 Vesta se debe a que fue el cuarto asteroide en ser descubierto, siendo descubiertos anteriormente Ceres (1 Ceres), Palas (2 Palas) y Juno (3 Juno).

Vesta es el segundo cuerpo más masivo del cinturón de asteroides con una masa de $2.71 \cdot 10^{20}$ kg (después de Ceres con $9.43 \cdot 10^{20}$ kg), representando el 9% del total (contra el 26,2% de Ceres), y el tercer cuerpo más grande después de Ceres y Pallas. Su densidad es de unos 3.8 g/cm^3 (Russell et al. (2013)).

Se encuentra en el cinturón interior principal, a una distancia media de 2.362 UA, siendo su afelio 2.571UA y su perihelio 2.152UA, y, empleando por ello, 1326 días (3.63 años) como período orbital. Su rotación es muy rápida para un asteroide (5.342h).

Sobre las temperaturas en superficie se han estimado que pueden abarcar los rangos de los -20°C con el Sol en lo alto y hasta los -190°C en el polo invernal, siendo las temperaturas medias del día en torno a los -60°C , mientras que las de la noche en -130°C .

Imagen 2: vista de la superficie de Vesta



3. Morfología

La forma de Vesta es relativamente cercana a un esferoide achatado gravitacionalmente, pero la gran concavidad y protrusión en el polo sur hacen que no tenga equilibrio hidrostático. Esta gran concavidad es el resultado de un gran impacto que excavó lo que se conoce como Rheasilvia y es la característica más destacada de la morfología de Vesta. Éste cráter (imagen 3A) tiene un diámetro de unos 500 km, lo que lo convierte en un cráter descomunal si recordamos que Vesta tiene un diámetro de unos 525 km, y una profundidad de unos 19 km, lo que da una idea de la escala del impacto. En su centro

aparece una elevación de unos 23 km sobre el punto más bajo del cráter. A su vez, los bordes del cráter aparecen 4-12 km por encima del terreno circundante.

Se piensa que dicho impacto tuvo que producirse hace aproximadamente un billón de años y que pudo excavar en torno al 1% de todo el volumen de Vesta, siendo muy probablemente el origen de los meteoritos HEDs (Howardite, Eucrite y Diogenite) que tenemos en la Tierra, así como de los asteroides tipo Vesta. Los análisis espectroscópicos de las imágenes del telescopio espacial Hubble, y de la misión DAWN, han demostrado que este cráter ha penetrado profundamente a través de distintas capas de la corteza y posiblemente en el manto, tal y como indican las firmas espectrales del material del cráter, que parecen estar asociadas a olivino.

Otros impactos que han configurado la forma actual de Vesta son Veneia y el sistema conocido como “hombre de nieve” (imagen 3B) que componen Marcia, Calpurnia y Minucia. En cuanto a Veneia, tiene un diámetro de 400 km y tiene a Rheasilvia superpuesto, lo que indica su mayor antigüedad. Por otro lado, sobre el sistema formado por Marcia, Calpurnia y Minucia, Marcia es el mayor de los cráteres y el más occidental, mientras que Minucia es el menor de todos y el más oriental. Respecto a las superposiciones entre sí se ve que Calpurnia es más joven que Minucia al superponerse sobre éste, mientras que Marcia superpone a Calpurnia, lo que lo convierte en el cráter más joven de los tres.

El resto de la superficie de Vesta presenta cráteres de menor tamaño, así como otras características destacadas como un albedo oscuro de unos 200 km que ha sido nombrado Olbers (en honor al descubridor de Vesta).

Los hemisferios oriental y occidental muestran terrenos considerablemente diferentes. Por un lado, el hemisferio oriental parece tener albedo alto, con los cráteres investigados alcanzando capas plutónicas bastante profundas de la corteza. Por otra parte, grandes regiones del hemisferio occidental se suponen como unidades geológicas oscuras que se piensan que son de superficie basáltica, tal vez análogo al Mar Lunar (Thangjam et al. (2013)).

Otra de las características morfológicas de Vesta son los grandes surcos que circundan su región ecuatorial (imagen 3C). Pueden ser consecuencia de los grandes impactos al ser concéntricos con respecto al cráter Rheasilvia. También hay estructuras similares al norte de la región ecuatorial. Que estos surcos se deban a los grandes impactos y no tener forma de fracturas, da más apoyo a la idea de que la estructura de Vesta sea diferenciada.

Imagen 3: Imagen 3A: Esquema de los cráteres Rheasilvia y Veneneia en el polo sur. Imagen 3B: Cráteres Marcia, Calpurnia y Minucia. Fuente: NASA. Imagen 3C: Surcos concéntricos con respecto al cráter Rheasilvia.



Fuente: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/3/3b/Rheasilvia_and_Veneneia.jpg . Fuente: <http://www.universetoday.com/wp-content/uploads/2012/09/pia14322.jpg>

Por otro lado, el material oscuro que se presenta en Vesta puede deberse a escombros de condritas carbonáceas que han golpeado la superficie. Las condritas carbonáceas son de color oscuro y provienen de asteroides primitivos y meteoroides que contienen mucho de la composición original de la nube de polvo y gas a partir de la cual se formó el Sistema Solar. Un gran número de estos objetos contienen incluso aminoácidos y nucleótidos, que constituyen los componentes de la vida (NASA).

4. Formación y composición

La teoría más aceptada en la actualidad acerca de la formación del Sistema Solar es que éste comenzó en una nube de gas y polvo fría bajo condiciones similares a las que experimenta cualquier nebulosa. Por la acción del giro del disco nebular y del fuerte viento solar del Sol primitivo, gran parte del polvo y el gas se habría ido disipando hacia el exterior donde dichas partículas habrían comenzado a entrar en contacto entre sí, dando como origen pequeñas acumulaciones que serían los planetesimales, que a su vez terminarían juntándose en cuerpos mayores: los planetas (Duffard (2012)). Algunos autores piensan que durante este proceso los primeros embriones habrían estado creciendo durante un período de unos 3 millones de años, mientras que los planetas terrestres tardaron en formarse en torno a unos 30 millones de años.

Este material primigenio del cual se forman los planetesimales recibe el nombre de condrítico y está compuesto del mismo material que el Sol. En el proceso, estos cuerpos enormes son calentados por las colisiones y el decaimiento radiactivo. Los asteroides son los restos de esos planetesimales que no pudieron formar un planeta mayor. Los materiales

que continuamente aparecen en los asteroides son los más primitivos y menos evolucionados, y esta es la razón de por qué es importante conocerlos (Duffard (2012)).

En algunos de los planetesimales su unión para formar objetos mayores no produjo ninguna evolución térmica y aún hoy se puede observar el material condrítico original, ya que la energía gravitacional liberada no fue suficiente para provocar una fusión de materiales. En cambio en otros habría una fuente de calor adicional que permitiría que los pequeños embriones evolucionasen como resultado de la fusión. Se piensa que dicha fuente adicional de calor podría ser el ^{26}Al , cuyos elementos resultantes del decaimiento radiactivo (^{26}Mg) se han encontrado en meteoritos que se piensan provienen de Vesta. Como ^{26}Al tiene un período de vida media muy corto (0.76 millones de años), esto se tendría que haber producido en los inicios de la formación del Sistema Solar.

Por otro lado, hay colisiones de planetesimales de tal magnitud que la energía gravitacional liberada permite que los elementos se fundan cayendo los más pesados hacia el interior y los más ligeros queden en el exterior. Este modelo se conoce como **modelo de océano magmático**, que da como resultado una estratificación en la que hay un núcleo denso y metálico, un manto de material más ligero rico en olivino y una capa aún más ligera en el exterior de material basáltico (Russell et al. (2005) & Richter, K., & Drake, M. J. (1997)).

La formación de Vesta se piensa que habría seguido las siguientes etapas (Ghosh, A., & McSween, H. Y. (1998), Richter, K., & Drake, M. J. (1997), Drake, M. J. (2001)):

- 1.- Proceso de acreción durante unos 2-3 millones de años.
- 2.- Se completa la fusión debido a la desintegración radiactiva del ^{26}Al , que provoca la separación de los metales básicos, en unos 4-5 millones de años.
- 3.- Progresiva cristalización de un manto fundido y convectivo que lleva a que la convección se detenga cuando cerca del 80% se ha cristalizado, en aproximadamente 6-7 millones de años.
- 4.- Extrusión del material fundido remanente para formar la corteza a través de erupciones progresivas o por la formación de un océano de magma de corta vida (este material sería la fuente de las eucrites, que veremos más adelante).
- 5.- Las capas más profundas de la corteza cristalizan para formar rocas plutónicas, mientras que los viejos basaltos son metamorfoseados debido a la presión de las

nuevas capas de superficie (este material sería la fuente de las diogenites, que veremos en el siguiente apartado).

6.-Enfriamiento lento y progresivo del interior.

La importancia de estudiar y determinar el estado de evolución de estos pequeños embriones proviene de que este estado afectará a la evolución de los cuerpos resultantes de mayor tamaño (Russell et al. (2005)).

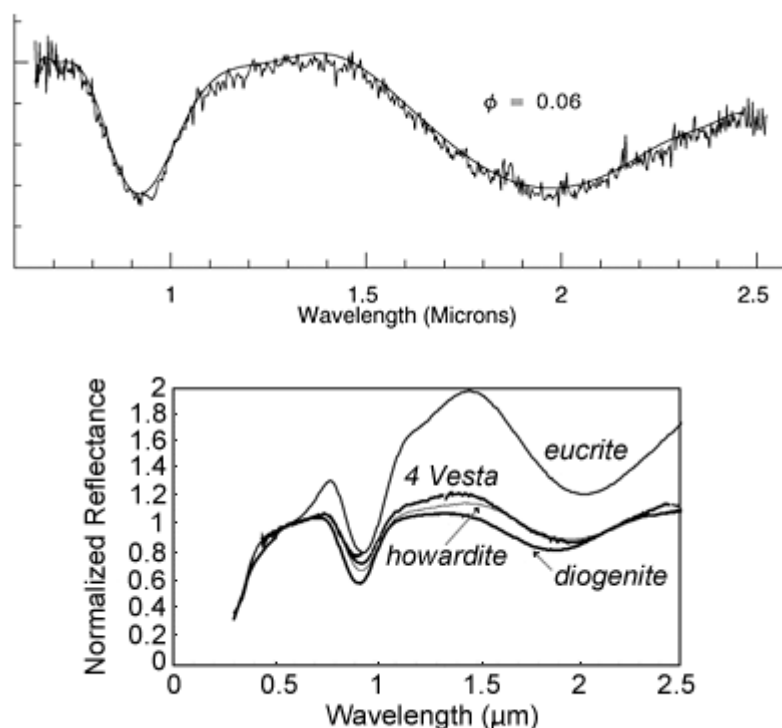
Como ya se indicó en el apartado de justificación del presente trabajo, el interés por Vesta y Ceres en el cinturón de asteroides radica en que han sobrevivido intactos desde los primeros días del Sistema Solar y, por lo tanto, proporcionan el potencial para actuar como ventanas que permiten mirar cómo eran las condiciones de los primeros millones de años del Sistema Solar (en concreto en la etapa de formación de los primeros cuerpos diferenciados), ya que en el caso de la Tierra por la acción de la tectónica de placas, la creación de montañas y la erosión, se ha destruido la información geológica de aquel período. Esto depende, claro está, del tiempo en el que estos cuerpos dejaron de evolucionar o al menos dejaron de formar nueva corteza. Se piensa que la corteza de Vesta data de los primeros millones de años de existencia del Sistema Solar.

Por último, sobre Vesta hay que decir que no es el único cuerpo menor basáltico en nuestro Sistema Solar, pero sí el único asteroide grande o protoplaneta basáltico (de más de 100 km de diámetro) que se conserva.

5. Composición de Vesta

Para determinar la composición de Vesta, el principal método empleado es el del análisis del espectro de reflectividad espectroscópica en el rango visible y cercano al infrarrojo, el cual permite saber de forma detallada los elementos que lo componen. En este rango espectral, que abarca de los 400 a los 2500 nm, hay varias bandas de absorción que pueden ser identificadas para determinar los minerales presentes en la superficie del asteroide. Una vez que se determina la reflectividad de un asteroide (en este caso Vesta) y se sustrae la luz del Sol, se compara con el espectro de los meteoritos recogidos en la Tierra o minerales conocidos que tienen un espectro muy parecido, lo que da a entender un origen común (Duffard (2012)).

Imagen 4: Imagen 4A: Espectro de reflectividad de Vesta. Burbine et al. (2009). Imagen 4B: Espectro de reflectividad de Vesta comparado con el de los materiales eucrite, diogenite y howardite que componen los meteoritos HEDs. Vernazza et al, (2005).



Estos meteoritos son los conocidos como HEDs, llamados así según cuál de los tres materiales predominan en su composición (howardite, eucrite y diogenite). También se podrían analizar los vestoides, asteroides que tienen órbitas similares a Vesta y que tienen su origen en colisiones que arrancaron material de su superficie. Se piensa que la gran mayoría tiene su origen en el impacto que produjo el cráter de Rheasilvia. Estos asteroides vestoides son el origen de los meteoritos HEDs y pueden llegar a suponer el 5% del total de meteoritos recogidos en la Tierra.

En la imagen 4A puede verse el espectro característico de Vesta, mientras que en la imagen 4B los espectros por separado de los tres materiales basálticos que los meteoritos HEDs (howardite, eucrite y diogenite) comparado con el espectro promedio de Vesta

Uno de los criterios que se emplea para clasificar los meteoritos es aquel que los divide en dos grandes grupos: condriticos y acondriticos. Los primeros serían las muestras del material más primitivo y menos alterado, presentando gránulos que son del tamaño de esferas de pocos milímetros que se formaron en la etapa inicial del Sistema Solar. Por otro

lado, los meteoritos acondríticos serían los que habrían sufrido una metamorfosis extrema a partir del material condrítico original.

Los acondríticos se dividirían en primitivos, HEDs, acondríticas evolucionadas, el grupo lunar y el grupo marciano representado por los SNC, todos ellos meteoritos rocosos, mientras que los rocoso-férricos y los férricos representarían la transición entre el manto-núcleo y el núcleo, respectivamente, de un cuerpo diferenciado (Duffard (2012)).

La composición de cada uno de los materiales que componen los HEDs es la siguiente (Takeda, H. (1997)):

1. **Eucrite:** son muestras de lava basáltica que provienen de la superficie de Vesta. Están compuestas principalmente de piroxenos pobres en calcio, pigeonita, y plagioclasa rico en calcio. Además, las eucrites a menudo contienen otros minerales como silicio, cromita, troilita y metales de procedencia de hierro y níquel. Se han dividido en tres grupos: grupo de no acumulados, el grupo acumulado y el grupo polymict. Las eucrites se formaron como flujos de lava y sus edades indican que se formaron hace 4,5 billones de años.
2. **Diogenite:** tienen cristales más grandes que las eucrites y tienen su origen a mayores profundidades dentro de la corteza de Vesta como rocas plutónicas. Mineralógicamente, las diogenites se componen principalmente de ortopiroxeno rico en magnesio con solo pequeñas cantidades de olivino y plagioclasa. Los piroxenos usualmente son de granos gruesos, sugiriendo un origen acumulativo en las cámaras magmáticas dentro de las regiones más profundas del cuerpo de procedencia. Las diogenites experimentan un enfriamiento más lento y prolongado que las eucrites, lo que permite al piroxeno formar cristales de gran tamaño.
3. **Howardite:** son brechas de regolito formadas por mezclas de eucrite, diogenite, y, de forma ocasional, por fragmentos de condritas carbónicas que se han fusionado conjuntamente. También contienen clastos oscuros de material carbónico condrito y clastos que provienen de la fusión de elementos a causa del impacto, lo que sugiere un origen de tipo regolito de este tipo de meteoritos. Las howardites se encuentran sobre la superficie del cuerpo del que provienen y son provocadas por un fuerte impacto capaz de excavar grandes cantidades de material.

Por lo tanto, la corteza de Vesta consistiría en resumen en (Richter, K., & Drake, M. J. (1997)):

- 1.-Un regolito litificado, que sería la fuente de las howardites y las brechas de eucrites.
- 2.-Lava basáltica que fluye sobre la superficie y que sería la fuente de las eucrites no acumulativas.
- 3.-Rocas plutónicas consistentes en piroxeno, pigeonita y plagioclasa, que serían las fuentes de las eucrites acumulativas.
- 4.-Las rocas plutónicas ricas en ortopiroxeno con grandes porciones granuladas, que serían la fuente de las diogenites.

Como la Luna, los minerales plagioclasa y piroxeno, son indicadores de actividad volcánica en el pasado y se encuentran sobre la superficie de Vesta. Sin embargo, Vesta y la Luna tienen varias diferencias importantes, a pesar de la similitud de la mineralogía superficial. En la Luna, albedo, topografía y composición están fuertemente correlacionadas. Las tierras altas lunares con alta presencia de feldespatos tienen un albedo muy alto y son topográficamente más elevadas que los mares lunares, donde hay materiales ricos en piroxeno y tienen un albedo y topografía menos elevado. En contraste, Vesta no muestra esta clara correlación entre el albedo, composición y topografía: mientras que la cuenca de Rheasilvia en el hemisferio sur, que es más baja que otras regiones, tiene una composición predominantemente diogenítica, las regiones más elevadas también presentan una composición similar.

A diferencia de la Luna, donde el volcanismo en su etapa final jugó un importante papel en la configuración de su albedo y su relación con la topografía y la composición, la actividad basáltica de Vesta cesó en los primeros 10 millones de años después de la formación del Sistema Solar y eones de impactos sobre la superficie han borrado las marcas de este pasado volcánico creando un regolito global de composición howardite (Thangjam et al. (2013)).

Para evitar errores a la hora de indicar la procedencia de un meteorito, ya que Vesta no es el único cuerpo basáltico del Sistema Solar, se emplea la huella del oxígeno isotópico (Duffard (2012)). El oxígeno tiene tres isótopos estables con los siguientes porcentajes de abundancia en la Tierra: $^{17}\text{O}/^{16}\text{O} = 1/2700$ y $^{18}\text{O}/^{16}\text{O} = 1/490$, siendo diferente en otros cuerpos del Sistema Solar. Como marcador isotópico natural, el oxígeno tiene la ventaja sobre otros elementos ligeros como el hidrógeno, carbono y nitrógeno, en que la variación combinada de los ratios isotópicos ($\Delta^{17}\text{O} = ^{17}\text{O} / ^{16}\text{O}$ y $\Delta^{18}\text{O} = ^{18}\text{O} / ^{16}\text{O}$) permite identificar el proceso subyacente. De forma que si varios cuerpos interceptados (en este caso los HEDs) tienen los mismos valores de $\Delta^{17}\text{O}$ y $\Delta^{18}\text{O}$ tienen que provenir de una misma fuente. El resultado de la

representación de los porcentajes de oxígeno isotópico para cada material serán líneas con la misma pendiente, pero con diferente ordenada en el origen, tal y como se muestra en las siguientes imágenes:

Imagen 5: $\delta^{17}\text{O}$ (vs) $\delta^{18}\text{O}$ para grupos condritas en comparación con HEDs, SNC, Pallasite, Angrite y material lunar. Spicuzza et al. (2007).

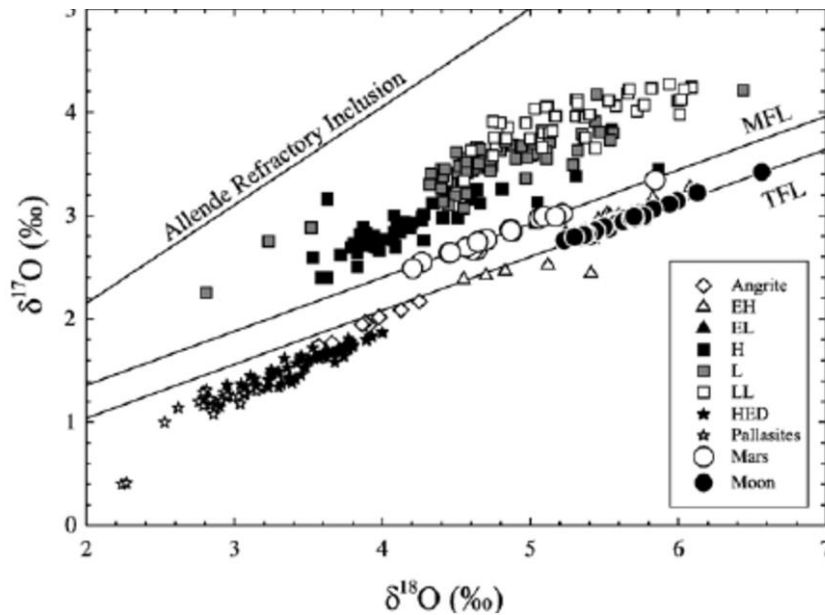
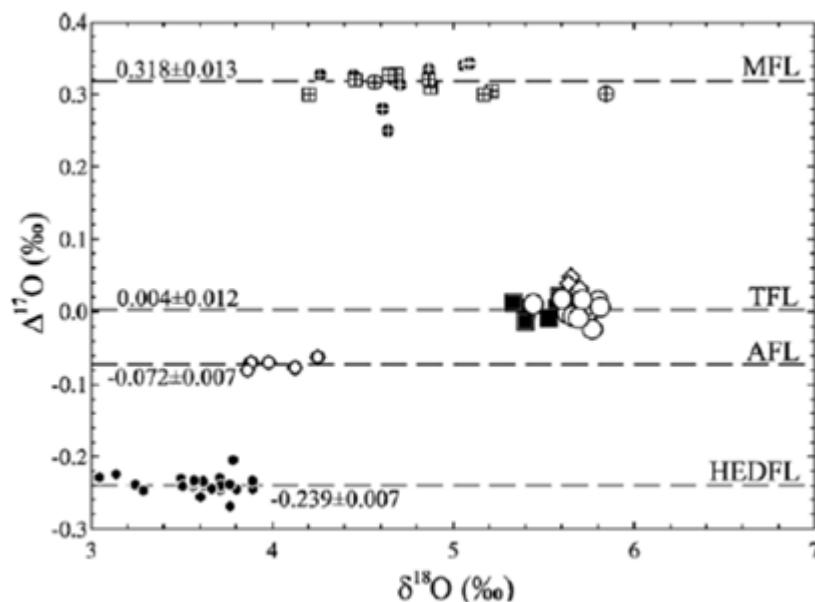


Imagen 6: Líneas de fraccionamiento de la masa del isótopo de oxígeno de Marte, Tierra, Luna, Vesta y un cuerpo de angrita.¹ Spicuzza et al. (2007).



¹ A las líneas se les ha extraído la pendiente 0.5. MFL: Mars Fractionation Line; TFL: Terrestrial Fractionation Line; AFL: Angrite Fractionation Line; HEDFL: HED Fractionation Line; AFL: Angrite Fractionation Line

Todos los espectros de reflectividad de los basaltos se caracterizan por la presencia de bandas de absorción en torno a los 1000 y 2000 nanómetros, lo que indica una mezcla de piroxeno y posiblemente olivino. El espectro del piroxeno se destaca por su absorción entre los 1000 y 2000 nanómetros, mientras que el olivino por una compleja absorción centrada cerca de 1000 nanómetros. En ambos casos, estas absorciones se producen por las transiciones electrónicas de Fe^{2+} en cristales octaédricos. Por lo tanto, uno de los parámetros más importantes en la medida de caracterizar la mineralogía asociada con este tipo de espectro es la posición del centro de las bandas de absorción cercanas a 1000 y 2000 nanómetros. Se pueden usar dos parámetros: el mínimo de la banda y el centro de la banda, que se definen como la posición de la longitud de onda en el punto de más baja reflectividad antes y después de la eliminación del continuo, respectivamente (Duffard (2012)).

II. MISIÓN DAWN

1. Objetivos

La misión DAWN es el resultado de la colaboración internacional entre Alemania, Italia y los EEUU y se lanzó el 27 de septiembre de 2007 con una nave propulsada por aceleración de iones capaz de visitar varios objetivos en el cinturón de asteroides principal. Este motor de iones supone un gran avance al permitir llegar hasta cuerpos lejanos con el menor consumo posible. El motor de iones emplea un gas inerte, el xenón, como combustible el cual se ioniza y se acelera electrostáticamente a velocidades por encima de los 31 km/s, lo que supone unas 10 veces más rápido que el combustible que se despiden de un cohete a base de propulsión química.

El principal objetivo de la misión es el conocer mejor las condiciones y procesos que actuaron en los inicios del Sistema Solar mediante el análisis de las superficies de Vesta y Ceres para determinar su bombardeo y su historia termal, tectónica y volcánica. Busca determinar la topografía y la estructura interna de dichos protoplanetas mediante las medidas de su masa, forma, volumen y velocidad de giro con la información que aportan los datos de navegación y las imágenes. DAWN determinará la composición mineral a través de los infrarrojos, rayos gamma y la espectroscopía de neutrones para obtener la historia térmica y la evolución en su composición de Ceres y Vesta, así como intentar fijar un contexto para las muestras de meteoritos que actualmente se tienen en la Tierra (Russell et al. (2006)).

2. Instrumentos empleados.

La nave espacial de la misión DAWN tiene varios instrumentos, pero en el presente trabajo se centrará el interés en las dos Framing Cameras (FC1 y FC2), ya que permite estudiar los datos en imagen donde se puede apreciar la morfología de la superficie, además de que este instrumento se empleó durante todas las fases de la misión y almacenó una cobertura global, a diferencia de otros instrumentos de la misma nave.

Los otros instrumentos de los que dispone la nave son el VIR (Visible and Infrared Spectrometer) y el GRaND (Gamma Ray and Neutron Detector).

2.1. Framing Camera (FC)

La Framing Camera es un instrumento de toma de imágenes multiespectral que también sirve como una cámara de navegación óptica. Consta de dos cámaras redundantes donde cada imagen tiene 1024x1024 píxeles, tiene 8 filtros numerados del F1 al F8, que van desde un filtro de banda ancha transparente (F1) hasta filtros de banda estrechos que abarcan un rango entre 438nm a 965nm (del F2 al F8); es decir, los filtros abarcan tanto el espectro visible (F2, F3, F7 y F8) como el infrarrojo cercano (F4, F5 y F6). Las longitudes de onda efectivas de cada filtro son las siguientes:

- F2: 555 nm (+15, -28)
- F3: 749 nm (+22, -22)
- F4: 917 nm (+24, -21)
- F5: 965 nm (+56, -29)
- F6: 829 nm (+18, -18)
- F7: 653 nm (+18, -24)
- F8: 438 nm (+10, -30)

Los objetivos de la FC son los siguientes:

1. Determinar el origen y evolución de Vesta y Ceres mediante el mapeo de la extensión de los procesos geológicos sobre las superficies de los asteroides, y, mediante el empleo del registro de cráteres, establecer una cronología relativa a la corteza de cada cuerpo, así como los impactos que se produjeron en los primeros momentos del Sistema Solar.

2. Mapear la forma, determinar el estado del giro, así como establecer el grado de impactos de cráter de los asteroides que se van a visitar.
3. Mapear la topografía de Vesta y Ceres.
4. Buscar polvo y satélites en el entorno de los asteroides visitados.
5. Proveer un contexto geológico, composicional y geofísico para los meteoritos HEDs.
6. Proveer una oportunidad para identificar los meteoritos provenientes de Vesta en su contexto geológico.
7. Determinar las masas de los asteroides visitados.
8. Medir la densidad aparente de Vesta y Ceres, en conjunción con la topografía, así como su heterogeneidad.
9. Determinar los campos gravitacionales de Vesta y Ceres.

2.2.Gravity Science

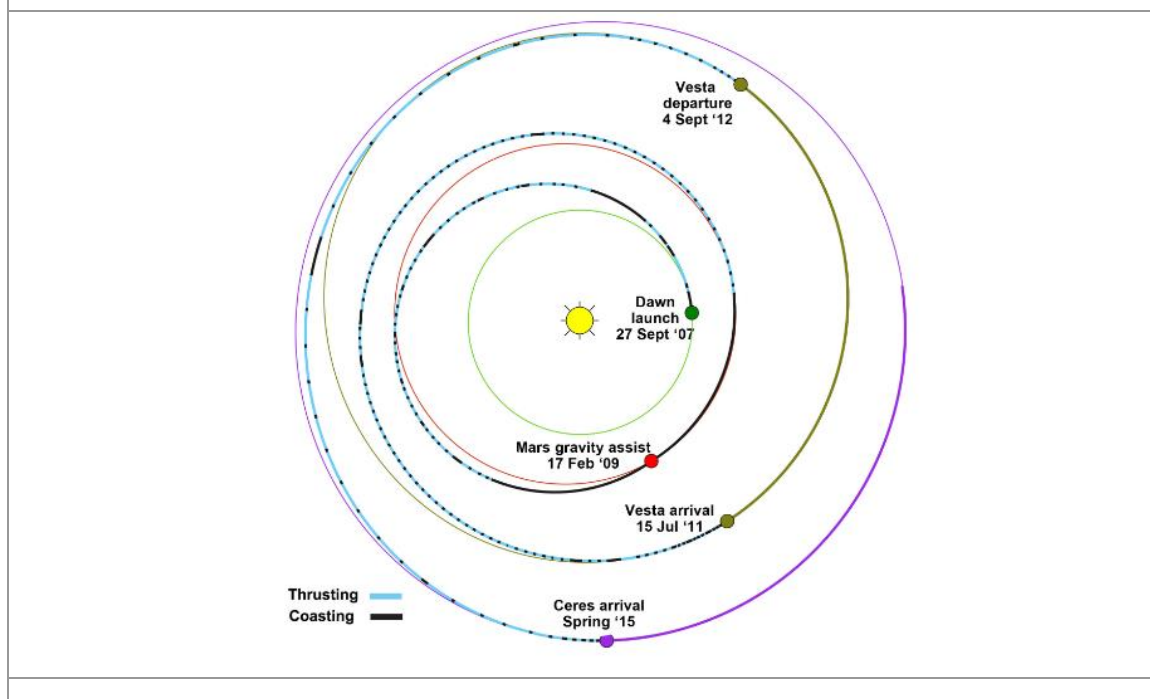
1. Determinar las masas de los asteroides visitados.
2. Medir la densidad aparente de Vesta y Ceres, en conjunción con la topografía, así como su heterogeneidad.
3. Determinar los campos gravitacionales de Vesta y Ceres.

Los instrumentos de la nave espacial DAWN tienen objetivos muy definidos, pero en muchos casos comunes y complementarios entre sí con el fin de evitar errores de medida e interpretación que se pudieran dar en caso de que una determinada medida se dejara a un único instrumento. Tal y como ocurre en el caso complementario de la espectroscopía nuclear y de reflectividad, que permite obtener una interpretación acertada de una misma medida superficial. Esto se puede observar en el apartado siguiente donde se pasan a comentar las órbitas que se emplearon para el análisis de Vesta y los objetivos que se buscaban en cada caso.

3. Trayectoria y órbitas de la nave espacial DAWN

La nave DAWN despegó el 27 de septiembre del año 2007 y, tras una asistencia gravitatoria en Marte en el año 2009, llegó a Vesta en agosto del año 2011, permaneciendo hasta febrero del año 2012, para luego ir a Ceres desde febrero del 2015 hasta la actualidad, tal y como se puede observar en la imagen 7.

Imagen 7: Esquema de la trayectoria de la nave DAWN hacia Vesta.



Las órbitas que realizó la misión DAWN en torno a Vesta son las siguientes (Raymond et al. (2013)): Survey Orbit (órbita de muestreo), HAMO-1, LAMO, HAMO-2:

3.1 Survey Orbit

Durante esta órbita el instrumento que predominó a la hora de realizar medidas es el VIR (*Visible and Infrared*), ya que se dan las mejores condiciones para la cobertura global del mapeo del espectro VIR, así como una visión de conjunto del asteroide para planear las siguientes subfases del proyecto. Esta órbita duró unos 20 días y comenzó desde el final de la subfase de acercamiento a Vesta hasta que la nave pudo establecer una órbita circular polar con radio de 3000km.

El registro global con VIR que se buscaba en esta órbita tiene una resolución de 800(m/píxel) para después superponerlo con las imágenes globales de FC en múltiples filtros. Estas imágenes de VIR y FC se emplean para hacer mapas globales que definan posibles regiones de interés que luego serían investigadas a latitudes más bajas, y los datos de FC contribuyen de manera significativa al desarrollo de un modelo topográfico. De esta forma, se obtiene información redundante para afrontar cualquier pérdida de una única observación de una determinada región. Funcionalmente las observaciones redundantes no son totalmente idénticas en su naturaleza, pero están diseñadas para proveer esencialmente los mismos resultados.

3.2 HAMO-1 (High Altitude Mapping Orbit-1)

En esta fase predomina el empleo de la FC para el mapeo óptico y de reflectividad espectral de la superficie del asteroide. El objetivo en esta subfase es hacer mapas multicolor con FC del 80% de la superficie, un mapa topográfico del 80% de la superficie y al menos 5000 marcos espectrales VIR.

La primera fase, HAMO-1 duró 34 días desde la conclusión de la Survey Orbit y tiene un radio medio de 950km. El objetivo de la HAMO-1 es el de adquirir imágenes de toda la superficie con los 8 filtros. Los mapas FC sin filtro que se obtienen desde los diferentes ángulos (nadir más al menos dos ángulos tomados con respecto la posición del nadir) se emplean para crear un modelo topográfico.

El plan de la órbita HAMO-1 es el más delimitado de todas las órbitas que se dan en torno a Vesta. Está constreñida por las limitaciones del volumen de datos que se pueden enviar a la estación en la Tierra, la necesidad de una cobertura global sistemática, así como de resistir las posibles pérdidas de datos.

La órbita HAMO-1 está dividida en 6 ciclos, cada uno de 10 órbitas y 5 días de duración. El primer y último ciclo se toma desde la posición nadir e incluyen imágenes a color.

Son los datos de esta órbita los que se han empleado para seleccionar la zona de estudio.

3.3 LAMO (Low Altitude Mapping Orbit)

En esta órbita predomina el empleo del instrumento GRaND, con el fin de recoger espectros de rayos gamma y neutrones, así como determinar el campo gravitatorio. Se planteó que durara al menos 70 días (10 ciclos) desde la finalización de la órbita HAMO-1 con una órbita de radio medio de 465km.

El objetivo de la LAMO es el de obtener espectros espacialmente resueltos de rayos gamma y de neutrones del asteroide, así como una cubierta global para determinar el campo gravitatorio. La estrategia es estar en la posición nadir tanto como sea posible para maximizar la acumulación de datos GRaND.

Los datos de FC y VIR son adquiridos durante menos de la mitad de las órbitas en la LAMO porque no hay suficiente tiempo de recuperación para enviar más datos a la estación en Tierra desde estos instrumentos sin quitarle tiempo en la posición nadir a las medidas de GRaND.

Durante los primeros 8 ciclos, cuando se toman los primeros datos de gravedad, hay imágenes tomadas a lo largo de la trayectoria con el filtro transparente de FC durante un tercio de las órbitas. Los datos VIR se toman en cuatro órbitas por ciclo (en torno a un quinto de las órbitas) debido al plan de adquisición de imágenes a color, lo que hace que los datos sean dispersos y la cobertura global sea relativamente baja.

Una órbita con imágenes tomadas con filtro transparente se toma en cada transferencia orbital para la navegación de la nave (OpNav). Las imágenes de color de FC con los filtros F2, F3 y F4 se toman en 10 órbitas por ciclo.

3.4 HAMO-2 (High Altitude Mapping Orbit-2)

Tiene un radio de 950km y tiene como objetivo adquirir imágenes de áreas que se han iluminado cuando no lo estaban durante la órbita HAMO-1 con el objetivo de aumentar el porcentaje de la superficie que ya se ha mapeado para mejorar los datos sobre topografía, por lo que la FC es el instrumento predominante en esta órbita y se utilizó para completar los mapas globales de FC. Una vez que terminó se encaminó la nave hacia una altura por

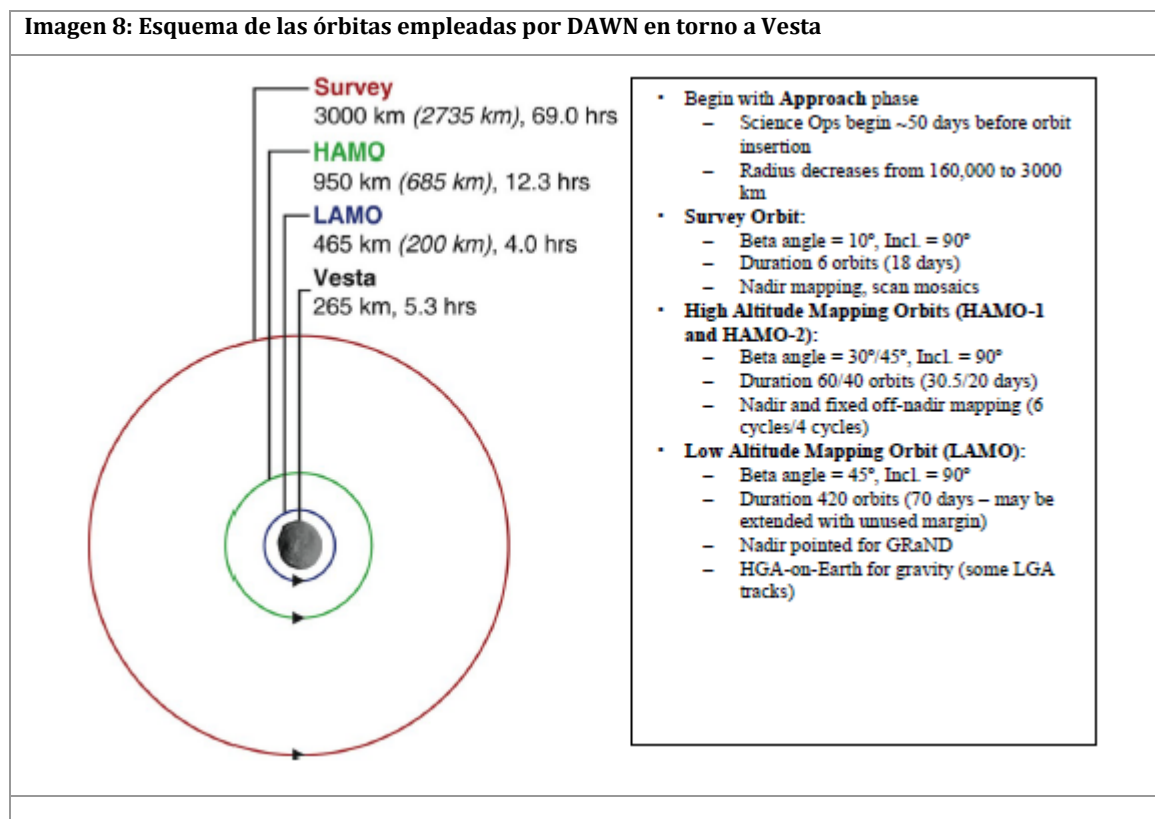
encima de la Survey Orbit para adquirir datos del hemisferio norte, que para entonces estaba iluminado.

La HAMO-2 se realiza a la misma altura que la HAMO-1, pero el ángulo beta de la órbita se aumenta desde los 30° hasta los 45°.

VIR también recolecta datos durante la HAMO-2, pero incluso cuando se combina con los datos de la HAMO-1, VIR tiene poca cobertura global. Los marcos de toma de datos VIR se toman a la par con los datos FC. Los datos VIR se toman a escalas más pequeñas que en las órbitas Survey, y para obtener una cobertura en alta resolución de las áreas de interés se miden desde todas las alturas de la nave cuando la geometría es favorable.

El esquema de las órbitas y sus radios que en un principio se planteó es el siguiente:

Imagen 8: Esquema de las órbitas empleadas por DAWN en torno a Vesta



III. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA A RESOLVER

Como ya se dijo en la introducción, el objetivo que se plantea en la presente Tesis de Fin de Máster es el desarrollo de un método que permita determinar la composición superficial de un lugar del cuerpo basáltico Vesta a partir del análisis de las imágenes aportadas por la Framing Camera que lleva la nave espacial DAWN. De cada una de las imágenes tomadas del mismo lugar con diferente filtro extraemos la reflectividad asociada a cada píxel, para luego ser comparadas con el espectro de reflectividad de tres meteoritos que se supone provienen de Vesta y determinar así el porcentaje presente de cada uno de los tres materiales que componen un meteorito HED (howardite, eucrite y diogenite) en dicha superficie.

La dificultad principal que se presenta es que las imágenes que toma la Framing Camera abarcan un espectro casi todo concentrado en el visible (de 400 a 900 nm), así como los pocos puntos de medida de los que se disponen: 7 puntos de medida que aportan los 7 filtros que se tienen en cuenta.

IV. PROCEDIMIENTO SEGUIDO

1. Obtención de Imágenes

Las imágenes se descargan de la página web “*Planetary Data System*” (referencia, pulsar [aquí](#)) donde podemos encontrar las imágenes FC asociadas a cada órbita. Una vez seleccionada una órbita, y dentro de ella un ciclo y una sub-órbita, podemos ver que cada imagen tiene asociada dos enlaces:

Imagen 9: Enlaces de descarga de las imágenes de la Framing Camera

Index of /archive/dawn/fc/DWNVFC2_1B/DATA/FITS/2011272_HAMO/2011272_CYCLE1/2011272_C1			
Name	Last modified	Size	Description
Parent Directory			
FC21B0006963_11272231114F1G.FIT	30-Oct-2013 19:38	4.03M	
FC21B0006963_11272231114F1G.LBL	30-Oct-2013 19:38	17K	
FC21B0006964_112722311129FNG.FIT	30-Oct-2013 19:38	4.03M	
FC21B0006964_112722311129FNG.LBL	30-Oct-2013 19:38	17K	
FC21B0006965_112722311129FNG.FIT	30-Oct-2013 19:38	4.03M	
FC21B0006965_112722311129FNG.LBL	30-Oct-2013 19:38	17K	

Fuente: Planetary Data System

El primer enlace termina en .FIT y es de donde se descarga la imagen en formato .FIT. Como se puede observar, cada una de las imágenes tiene en su nomenclatura un indicativo F(número) que indica el filtro con que están hechas las imágenes. No todas las imágenes de un mismo lugar tienen el mismo número de filtros, pero en el presente trabajo solo se han seleccionado regiones de estudio que tengan imágenes en los 8 filtros para no disminuir los puntos de observación, ya escasos de por sí.

El segundo enlace asociado a cada imagen tiene la información relevante de la misma indicando diferentes aspectos como las correcciones que tienen realizadas, las coordenadas de la zona, la altura a la que se tomó la imagen, distancia de Vesta al Sol en ese instante, etc. El origen de coordenadas en Vesta se toma con respecto al cráter Claudia.

Imagen 10: Ejemplo de datos asociados a una imagen

```

/*  ORBIT GEOMETRY  */

SUB_SPACECRAFT_LATITUDE      = 48.1453507993 <degree>
SUB_SPACECRAFT_LONGITUDE     = -134.6092241545 <degree>
SUB_SPACECRAFT_AZIMUTH       = 355.8637630385 <degree>
SPACECRAFT_ALTITUDE          = 684.998 <kilometer>
TARGET_CENTER_DISTANCE       = 934.327 <kilometer>
ORBIT_NUMBER                  = 0
SC_TARGET_POSITION_VECTOR    = (
    -87.066 <kilometer>
    ,54.053 <kilometer>
    ,-928.690 <kilometer>
)
SC_TARGET_VELOCITY_VECTOR     = (
    0.0717528047 <kilometer per second>
    ,-0.1153464061 <kilometer per second>
    ,-0.0153716410 <kilometer per second>
)
LOCAL_HOUR_ANGLE              = 60.4208333333 <degree>
SUB_SOLAR_LATITUDE            = -27.2057492260 <degree>
SUB_SOLAR_LONGITUDE           = -105.8124471199 <degree>
SUB_SOLAR_AZIMUTH             = 0.0444039580 <degree>
SOLAR_LONGITUDE               = 4.8416695573 <degree>
SOLAR_ELONGATION              = 100.3916110844 <degree>
TARGET_NAME                   = "4 VESTA"
TARGET_TYPE                   = "ASTEROID"

```

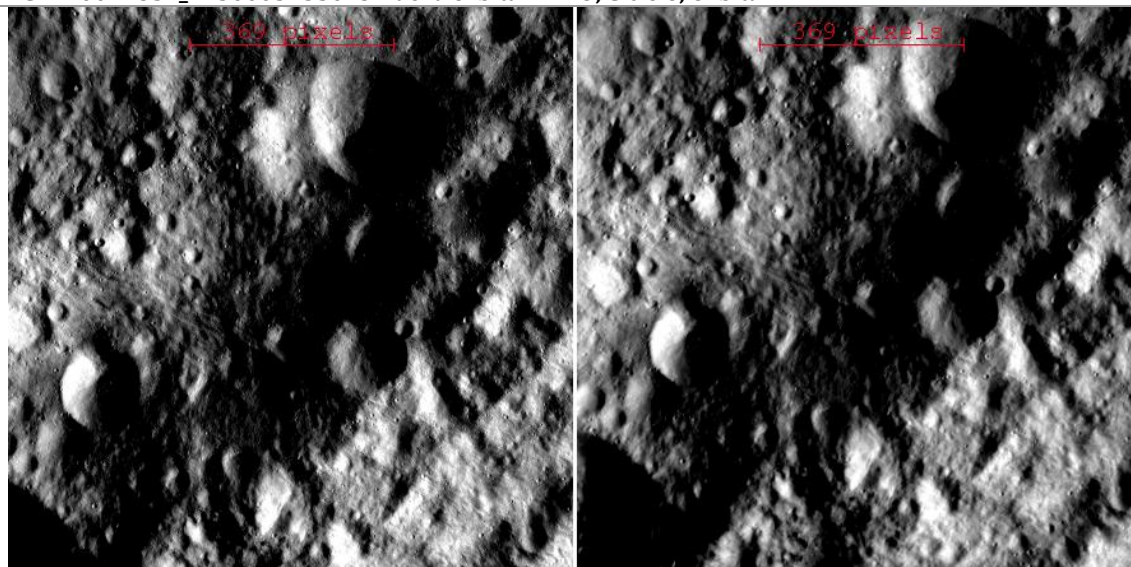
Fuente: Planetary Data system

Una vez obtenidas las imágenes hay que aplicarles una corrección a causa del desplazamiento que existe entre ellas.

2. Corrección de las imágenes

Dado que a medida que la FC va cambiando de filtros para fotografiar una determinada región la nave espacial DAWN se sigue moviendo, al final entre las imágenes resulta un desplazamiento entre sí que hay que corregir para que las imágenes se superpongan de la forma más precisa posible. Además del desplazamiento, muchas veces se encuentra una cierta rotación que es más difícil de corregir. El objetivo que se busca a la hora de centrar las imágenes es que los píxeles coincidan entre sí para luego determinar su reflectividad en cada una de las 8 imágenes.

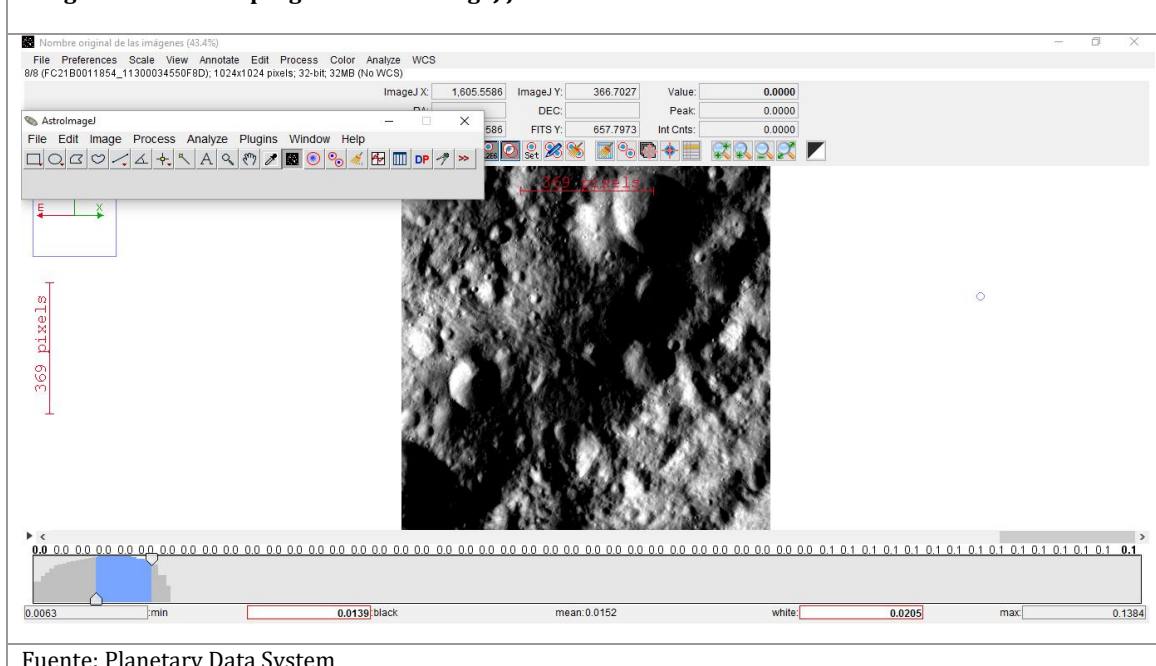
Imagen 11: Desplazamiento entre las imágenes FC21B0011847_11300034457F1D y FC21B0011854_11300034550F8D de la órbita HAMO, Ciclo 6, Órbita 2



Fuente: Planetary Data System

El programa que se emplea para analizar las imágenes de la FC es el programa de libre descarga AstroImageJ (enlace de descarga, pulsar [aquí](#)). En dicho programa la corrección de las imágenes puede realizarse tanto manualmente como por un método más mecánico.

Imagen 12: Vista del programa AstroImageJ junto con su barra de control



En el método manual se identifica una característica fácilmente reconocible en todas las imágenes y que sea lo más pequeña posible. Una vez identificada, se busca un píxel en su zona central y se mide su posición en las 8 imágenes; después, tomando como referencia el valor en una de las imágenes, se calculan las diferencias entre sí y se resta/suma en cada una de las coordenadas (x,y). Una vez centradas, se observa que en varias imágenes aparece un borde oscuro; dicho borde se debe a las zonas que no están presentes en una imagen una vez desplazada, por lo que se recorta a fin de que no introduzca ruido a la hora de asignar los valores de reflectividad a cada píxel. En este método hay que tener cuidado de que el píxel seleccionado como referencia sea el mismo en todas las imágenes y que sus coordenadas se miden de forma precisa, así como que una vez recortadas tengan todas el mismo número de píxeles.

Por otro lado, el método mecánico se basa en alineamientos mediante aperturas. En este método se abren las imágenes como una secuencia, es decir, aparecen en el mismo marco y se puede ver cada una por separado desplazando una barra situada en la parte inferior de la imagen. Se selecciona una zona iluminada rodeada de zonas más oscuras y que se mantenga en las 8 imágenes. Una vez marcada la apertura sobre dicha zona, se pasa a recorrer las imágenes desplazándolas con respecto a la posición de dicha apertura en la imagen que se toma como referencia. Una vez terminado este proceso se recortan las zonas oscuras de la última imagen, que siempre es la que experimenta los mayores desplazamientos y, por ello,

presenta las mayores zonas oscuras. Al recortar esta última imagen, el resto de imágenes experimentan el mismo recorte de forma que se obtienen el mismo número de píxeles en cada imagen. Por último, se emplea el estabilizador de imágenes, tanto en modo “Translation” (solo realiza desplazamientos), como en el modo “Affin” (realiza tanto desplazamientos como giros), varias veces cambiando el número máximo de iteraciones y otros factores según la precisión que deseemos. Una vez finalizado se da a la opción de guardar como imágenes separadas.

En el presente trabajo, siempre que se han alineado imágenes, se ha usado como referencia la imagen F1, de forma que la imagen con el filtro F8 es la que siempre ha experimentado mayor desplazamiento y, con ello, mayores zonas oscuras.

Una vez que tenemos las imágenes centradas y recortadas se pasa a la conversión de las imágenes en matrices cuyos valores son las reflectividades asociadas a cada píxel según el filtro con el que se hayan tomado dichas imágenes.

3. Conversión de la Imágenes en Matrices

El procedimiento para convertir las imágenes centradas y recortadas en matrices se realiza a través del programa de software libre GDL (Gnu Data Language), que surge a imitación del programa IDL (Interactive Data Language) muy empleado en el procesado de imágenes tanto en astronomía como en otras disciplinas.

La instalación del GDL se realizó en el sistema operativo Linux-Ubuntu, donde una vez instalado se le tuvo que incluir una librería de funciones aplicadas a la astronomía llamada IDL Astronomy Library. En esta librería interesaba una función en especial: la función `readfits`, para leer archivos `.FIT`; en nuestro caso las imágenes `.FIT` se leen como una matriz cuyos valores representan la reflectividad asociada a cada píxel para una determinada longitud de onda.

La línea de comandos que se emplean para convertir las imágenes `.FIT` en un archivo en el que aparezcan los valores de reflectividad asociado a cada píxel son:

```
IDL> openw,8,'f1-vesta.txt'
```


Se abre un archivo txt donde irá la información asociada a la imagen de filtro F1 (en este caso).

```
IDL> aa1=readfits('FC21B0012354_11301035848F1D.FIT',h)
% READFITS: Now reading 1024 by 1024 array
```

Se ejecuta la función de lectura readfits que lee el archivo .FIT entre paréntesis y se asigna a la variable aa1. Se imprime un mensaje que nos indica el número de píxels que tiene la imagen.

```
IDL> printf,8,aa1
```

Se imprime la lectura del archivo .FIT almacenada en la variable aa1 en el txt “f1-vesta.txt”.

```
IDL> close, 8
```

Se cierra el archivo.

Una vez obtenidos los txt, se pasa a realizar un programa que agrupe la información de un mismo píxel en los diferentes filtros y permita comparar con la reflectividad asociada a cada uno de los meteoritos que se tienen como referencia para discernir cuál es el material que representa dicho píxel. Por ejemplo, para el píxel (1,1), el programa almacenará el valor de la reflectividad de ese mismo píxel en las imágenes que se han tomado de la región de estudio con los filtros que se tienen en cuenta (de F2 al F8), acumulándose siete valores. Se repite el procedimiento para todos los píxeles, y se comparan con las reflectividades de los meteoritos. Pero antes de pasar a describir el procedimiento hay que comentar sobre estos meteoritos HED que se van a emplear como referencia.

4. Meteoritos HEDs empleados como referencia

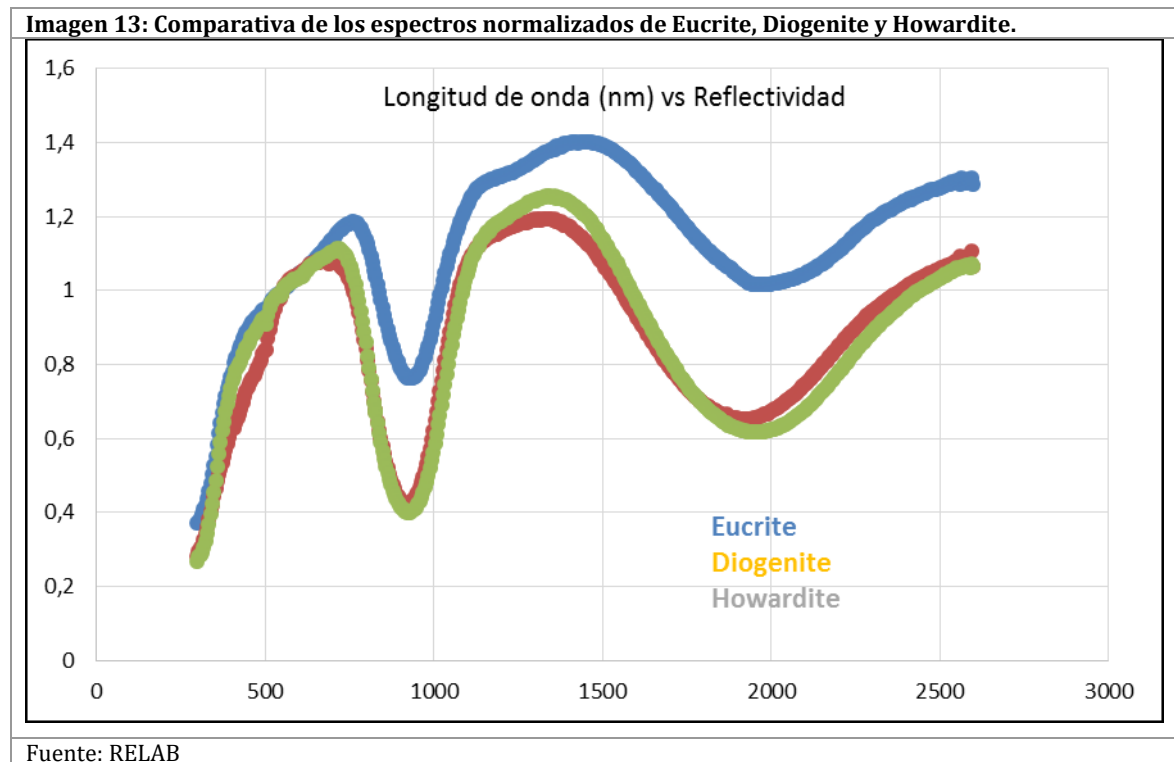
Los tres meteoritos que se van a emplear para contrastar la reflectividad asociada a un píxel y poder asignarle el material del que está compuesto son los siguientes:

- **MP-TXH-082A:** catalogado como Howardite.
- **MB-TXH-066A:** catalogado como Eucrite.

- **MP-TXH-068A:** catalogado como Diogenite.

Siendo catalogados por el laboratorio RELAB (Reflectance Experiment Laboratory), adjunto a la NASA (enlace para visitar la página, pulsar [aquí](#)).

Su espectro asociado (longitud de onda frente a reflectividad) en cada caso es el siguiente:



El espectro que se ve en la gráfica está normalizado con respecto al valor asociado a la longitud de onda del filtro F2 (555 nm); se elige esta longitud de onda por convenio en específico, ya que los materiales que analizamos no tienen ninguna banda de absorción para este valor e intervalo inmediato, de forma que no se perdería información.

Una vez normalizado el espectro, para las longitudes de onda efectivas que se emplean en cada filtro de la Framing Camera se seleccionan sus reflectividades asociadas que son las que se van a emplear como referencia para analizar la reflectividad de cada píxel de una imagen a fin de saber su composición predominante.

En el caso de esta experiencia, estos valores de referencia han sido los siguientes:

Tabla 1: Valores de referencia de reflectividad para identificar material howardite

Howardite (MP-TXH-082A):	
Filtro (longitud de onda efectiva(nm))	Reflectividad asociada
F8 (438)	0.829
F2 (555)	1
F7 (653)	1.075
F3 (749)	1.078
F6 (829)	0.673
F4 (917)	0.402
F5 (965)	0.440

Fuente: RELAB

Tabla 2: Valores de referencia de reflectividad para identificar material eucrite.

Eucrite (MB-TXH-066A)	
Filtro (longitud de onda efectiva(nm))	Reflectividad asociada
F8 (438)	0.871
F2 (555)	1
F7 (653)	1.086
F3 (749)	1.178
F6 (829)	1.038
F4 (917)	0.769
F5 (965)	0.793

Fuente: RELAB

Tabla 3: valores de referencia de reflectividad para identificar material diogenite.

Diogenite (MP-TXH-068A):	
Filtro (longitud de onda efectiva(nm))	Reflectividad asociada
F8 (438)	0.706
F2 (555)	1
F7 (653)	1.075
F3 (749)	1.035
F6 (829)	0.677
F4 (917)	0.421
F5 (965)	0.479

Fuente: RELAB

Una vez obtenidos los valores de referencia de reflectividad, se pasa a escribir el programa que va a analizar píxel por píxel de cada imagen y dar unos valores promedios de la composición global de la región de estudio.

5. Programa para la comparación de espectros

El lenguaje de programación que se ha empleado para realizar un programa de comparación de valores ha sido Java, siendo el criterio de selección el previo conocimiento y familiaridad del autor de este trabajo con dicho lenguaje.

El programa será detalladamente expuesto en un anexo en el que figurará el código tal y como se empleó, junto con explicaciones en cada parte para saber qué se está haciendo en cada subproceso.

El número de iteraciones con las que el programa repite cada subproceso depende del número de píxeles que tienen las imágenes, por esta razón es conveniente que las imágenes tengan todas las mismas medidas. En caso de que una calibración de imágenes se haya realizado de forma manual y que en el recorte de las zonas oscuras hubieran quedado imágenes con diferentes medidas, se emplearía como número de iteraciones el del número de píxeles de la imagen de menor tamaño. En los resultados que se presentan en este estudio las imágenes finales que se han obtenido antes de ser procesadas por el programa GDL han presentado el mismo tamaño en todos los casos.

De todas formas, dado que las imágenes de la Framing Camera se obtienen con una resolución de 1024x1024 píxeles, el máximo número de iteraciones que puede darse es 1,048,576.

La versión inicial del programa recogía en una única variable el resultado de multiplicar el número de píxeles de ancho y de largo para obtener el número de iteraciones. Dado que surgió el interés de saber las coordenadas de los píxeles que fueran de composición eucrite y diogenite, se tuvo que desglosar en dos variables que reflejaran el número de píxeles del ancho y largo de la imagen; después se establecen dos bucles anidados para ir recorriendo fila a fila cada píxel de forma que el número de iteraciones será el mismo que si se estableciera directamente el resultado de la multiplicación.

En la información asociada a cada imagen de la FC que se descargan (en los enlaces que terminan en .LBL) para realizar el presente trabajo, se explican los factores de corrección que llevan implícitas las imágenes (bias, flat field, tiempo de exposición), aun así faltan una

serie de correcciones que hay que introducir (tal y como se explica en Reddy et al. (2012) y en Schröder et Gutierrez-Marques (2013)) y que son las siguientes:

- Normalización con respecto a la reflectividad asociada a la longitud de onda del filtro F2.
- Inclusión de la distancia de Vesta al Sol en km en el momento de observación de una región de estudio.
- Inclusión de la respuesta de cada filtro al flujo solar a la distancia de 1AU.

El programa define una variable llamada `datos[][]`, que es un vector de una fila y 7 columnas donde se irán almacenando los valores de la reflectividad de cada píxel en los 7 filtros que se tienen en cuenta (F2, F3, F4, F5, F6, F7 y F8). El orden en el que se van guardando los datos en cada filtro sigue el orden creciente de sus longitudes de onda efectivas, de forma que sería: F8, F2, F7, F3, F6, F4 y F5.

Después, al resultado que se guarda en `datos[][]` se le aplican las dos últimas correcciones que se explican arriba (inclusión de la distancia al Sol y de la respuesta de cada filtro al flujo solar) y pasa a una variable llamada `datos_corr[][]`, siguiendo la fórmula que se indica en Reddy et al. (2012) y en Schröder et Gutierrez-Marques (2013):

$$(I/F)^i = \frac{\pi d_v^2 I_i}{F_{Sun}^i}$$

Donde $(I/F)^i$ es la reflectividad asociada a cada filtro, d_v es la distancia de Vesta al Sol, I_i es la radiancia para el filtro i -ésimo medida en la imagen (en nuestra experiencia ya está incluida en el valor de la reflectividad, de forma que no se tiene en cuenta) y F_{Sun}^i es el flujo solar para una distancia de 1 AU para cada filtro (también llamado respuesta de un filtro al flujo solar).

Los valores de d_v en cada medida se obtienen de la información que aporta cada imagen en su registro .LBL (por lo tanto, tendremos 7 medidas de distancia, ya que el movimiento de Vesta, sobre todo la rotación, es muy rápida), mientras que los valores de respuesta de los filtros al flujo solar son fijos y son los siguientes:

Tabla 4: valores de la respuesta de cada filtro al flujo solar

Filtro	$F_{\text{Sun}}(\text{Wm}^{-2}\text{nm}^{-1})$
F1	1.365
F2	1.863
F3	1.274
F4	0.865
F5	0.785
F6	1.058
F7	1.572
F8	1.743

Fuente: S.E. Schröder & P. Gutierrez-Marques (2013).

Finalmente, el valor de `datos_corr[][]` se normaliza con respecto al valor que `datos_corr[][]` tiene en el filtro F2 en cada píxel lo que hace que el valor para dicho filtro siempre sea 1, y se fija que el resultado de dicha división siempre tenga el mismo número de cifras. La variable que almacena la normalización se llama `normaliz[][]`.

En las variables `Euc`, `Dio` y `How` se van a ir almacenando las veces que sale que la composición en promedio de un píxel es eucrite, diogenite y howardite, respectivamente. Después en las variables `Euc_total`, `Dio_total` y `How_total` se almacena el porcentaje con respecto del total de las veces que ha salido eucrite, diogenite y howardite respectivamente, de forma que permite conocer el porcentaje de composición de cada uno de los materiales en la zona de estudio.

Una vez fijado el número de iteraciones y la distancia al Sol de la zona de estudio (la distancia sería un vector de 7 valores, una por cada imagen), el programa accede a los ficheros en formato .txt que se generaron en el programa GDL para cada uno de los filtros y que tienen los valores de reflectividad de cada imagen. En cada iteración el programa lee estos ficheros y selecciona en la misma posición de cada uno de ellos los valores que encuentra (por ejemplo, para el píxel (1,1) selecciona el valor (1,1) del filtro F8, después el de F2, etc hasta llegar a F5), de forma que se preseleccionan los valores que se guardan en la variable `datos[][]`, que después se corrigen generando la variable `datos_corr[][]` y, por último, `normaliz[][]`.

A continuación se generan tres variables: `dif_euc[][]`, `dif_dio[][]` y `dif_how[][]`, que son el resultado de calcular la raíz cuadrada de la suma de las diferencias al cuadrado de cada valor de `normaliz[][]` (de un mismo píxel) en los diferentes filtros con el valor de la

reflectividad que se ha marcado como referencia (para esos mismos filtros) para cada material en los tres meteoritos empleados como referencia. Este procedimiento sirve para determinar cómo de diferente es el valor de la reflectancia de un píxel respecto a los valores asociados a los materiales eucrite, diogenite y howardite que se toman como referencia.

Las expresiones de estas tres variables quedarían así:

```
dif_euc[i][1]= (float) Math.sqrt(
    Math.pow((normaliz[i][0]-0.870934895),2)+
    Math.pow((normaliz[i][1]-1),2)+
    Math.pow((normaliz[i][2]-1.085860881),2)+
    Math.pow((normaliz[i][3]-1.178224997),2)+
    Math.pow((normaliz[i][4]-1.03832738),2)+
    Math.pow((normaliz[i][5]-0.769017478),2)+
    Math.pow((normaliz[i][6]-0.793369077),2));
```

```
dif_dio[i][1]= (float) Math.sqrt(
    Math.pow((normaliz[i][0]-0.70610281),2)+
    Math.pow((normaliz[i][1]-1),2)+
    Math.pow((normaliz[i][2]-1.075217256),2)+
    Math.pow((normaliz[i][3]-1.035497439),2)+
    Math.pow((normaliz[i][4]-0.676677086),2)+
    Math.pow((normaliz[i][5]-0.420781304),2)+
    Math.pow((normaliz[i][6]-0.47940363),2));
```

```
dif_how[i][1]= (int) Math.sqrt(
    Math.pow((normaliz[i][0]-0.829196281),2)+
    Math.pow((normaliz[i][1]-1),2)+
    Math.pow((normaliz[i][2]-1.074897103),2)+
    Math.pow((normaliz[i][3]-1.078338401),2)+
    Math.pow((normaliz[i][4]-0.673516674),2)+
    Math.pow((normaliz[i][5]-0.401810592),2)+
    Math.pow((normaliz[i][6]-0.439768495),2));
```

Donde Math.sqrt es la función que calcula la raíz cuadrada y Math.pow(variable, potencia) es la función que eleva a una determinada potencia.

Después dif_euc[], dif_dio[] y dif_how[] pasan a compararse entre sí para discernir de qué material en su mayoría es el píxel que se está analizando. Según cuál de las tres variables tenga menor valor se aumentará el contador de Euc, Dio o How.

Para el caso en que el resultado de la comparación sea que el material es eucrite o diogenite (que son los menos comunes) el programa busca establecer sus coordenadas para ver su situación en la imagen. Como las imágenes pierden sus coordenadas al convertirse en ficheros .txt, se realiza un proceso de *"reassignado de coordenadas"* que consiste en determinar las coordenadas del primer píxel de la imagen abajo a la izquierda (dado que se toma como origen) y sabiendo que para pasar al siguiente píxel en la misma fila hay que sumarle +1 a la coordenada X y restar -1 a la coordenada Y, multiplicando ambas coordenadas por el número de píxel que se está analizando se obtienen las coordenadas precisas:

```
for(int y=0;y<b; y++){ //recorrido a lo largo del eje Y
    for(int i=0;i<a;i++){ //recorrido a lo largo del eje X
        ((.....))
        if ((dif_euc[i][1]<dif_dio[i][1]) & (dif_euc[i][1]<dif_how[i][1])){

            Euc=Euc+1;

            fy.write("Euc");
            fy.write(System.lineSeparator());

            double coord_x = 0.5+i; //(0.5, 963)=origen de coordenadas)
            double coord_y = 963.5-y;

            fu.write("Euc " + "(" + coord_x + ", " + coord_y+"");
            fu.write(System.lineSeparator());
```

Una vez terminado el análisis de cada píxel el programa genera 6 ficheros:

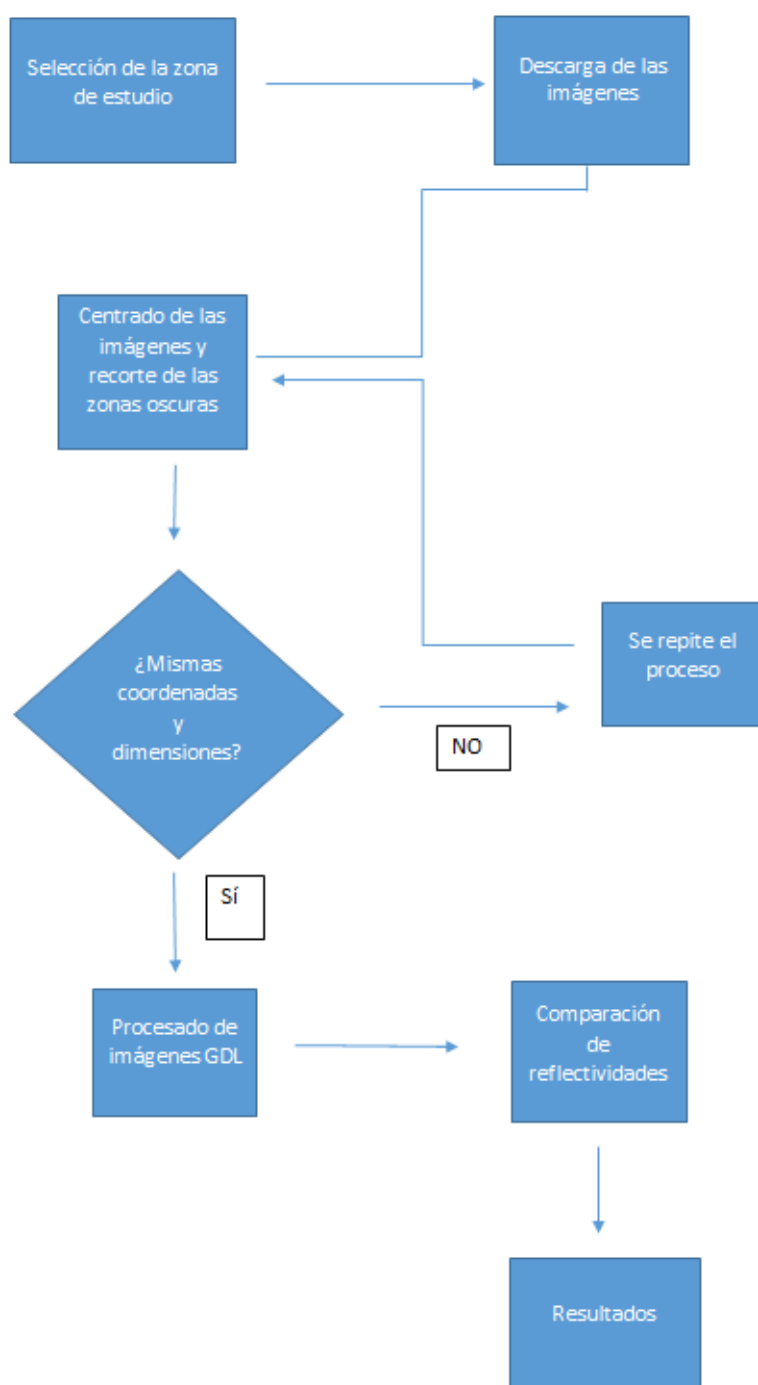
- **OrbitaXX-7columnsNormalizado.txt:** aparecen los valores de normaliz[][] para cada uno de los píxeles, de forma que tendrá 7 columnas y tantas filas como píxeles tuvieran las imágenes.
- **ComposiciónOrbitaX:** aparecen los valores de Euc, Euc_total, Dio, Dio_total, How y How_total. Euc, Dio y How aparecen con un número, un espacio y la palabra “veces” para saber el número de veces que han aparecido al finalizar el proceso; mientras que Euc_total, Dio_total y How_total aparecen con un número y un porcentaje, para saber el porcentaje con respecto al total que representa cada material.
- **ÓrbitaXX-CoordsEuc:** fichero de longitud variable donde se registran las coordenadas de los píxeles cuya composición dominante es eucrite.
- **ÓrbitaXX-CoordsDio:** fichero de longitud variable donde se registran las coordenadas de los píxeles cuya composición dominante es diogenite.
- **DiferenciasOrbitaX:** es un archivo de una sola columna y tantas filas como píxeles se hayan analizado. Contiene el resultado final (Euc, Dio o How) para cada píxel.
- **OrbitaX-7columns:** solo almacena los valores de datos_corr[], de forma que es un archivo con 7 columnas y tantas filas como píxeles.

Los ficheros que aportan la información relevante para este estudio son: *ComposiciónOrbitaX.txt*, *ÓrbitaXX-CoordsEuc.txt* y *ÓrbitaXX-CoordsDio.txt*, mientras que el resto sirven de apoyo en caso de que se produzca una anomalía el poder identificar mejor dónde se encuentra.

6. Diagrama de flujo: resumen del procedimiento

Todo el proceso descrito en la sección IV se puede resumir en el siguiente diagrama de flujo

Imagen 14: Diagrama de flujo del proceso de análisis de las imágenes FC expuesto en el presente trabajo.



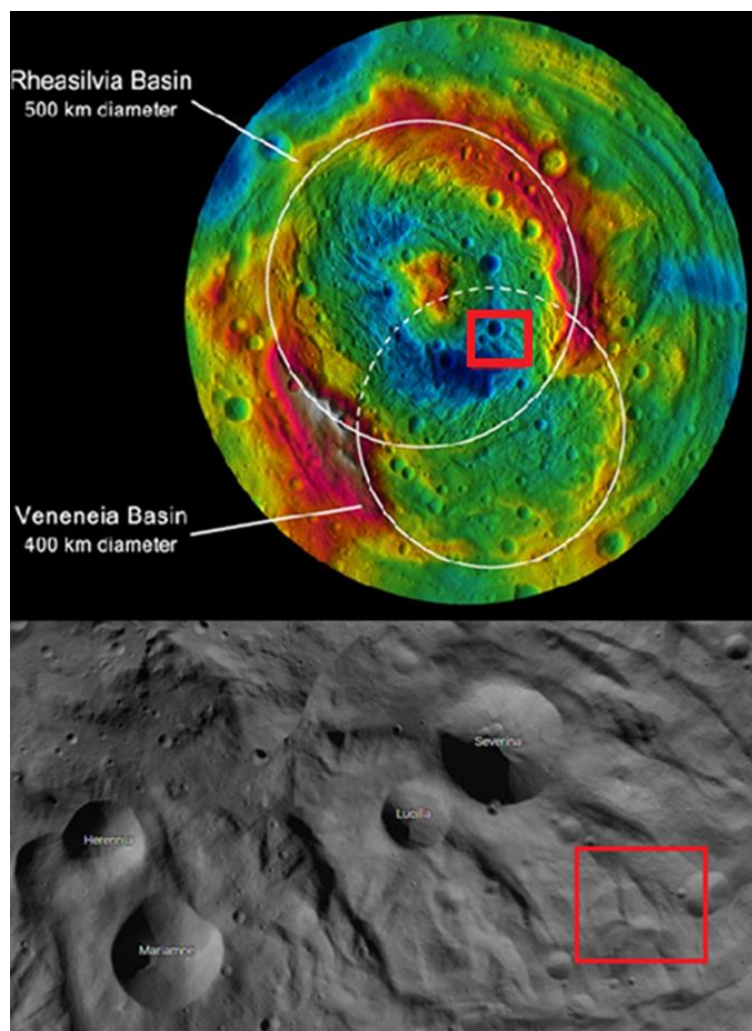
Fuente: Elaboración propia.

V. RESULTADOS

1. Selección de la zona de estudio

La zona que se ha elegido se encuentra en el hemisferio sur, concretamente en el polo sur, en una región cercana a los cráteres Severina y Lucilla, muy próximo a la elevación del centro del cráter Rheasilvia, abarcando el intervalo de latitudes $(-77.1^{\circ}, -66.8^{\circ})$ y el intervalo de longitudes $(100.4^{\circ}, 153.1^{\circ})$. El centro de la zona de estudio está situado en las coordenadas $(125.2^{\circ}, -64.8^{\circ})$.

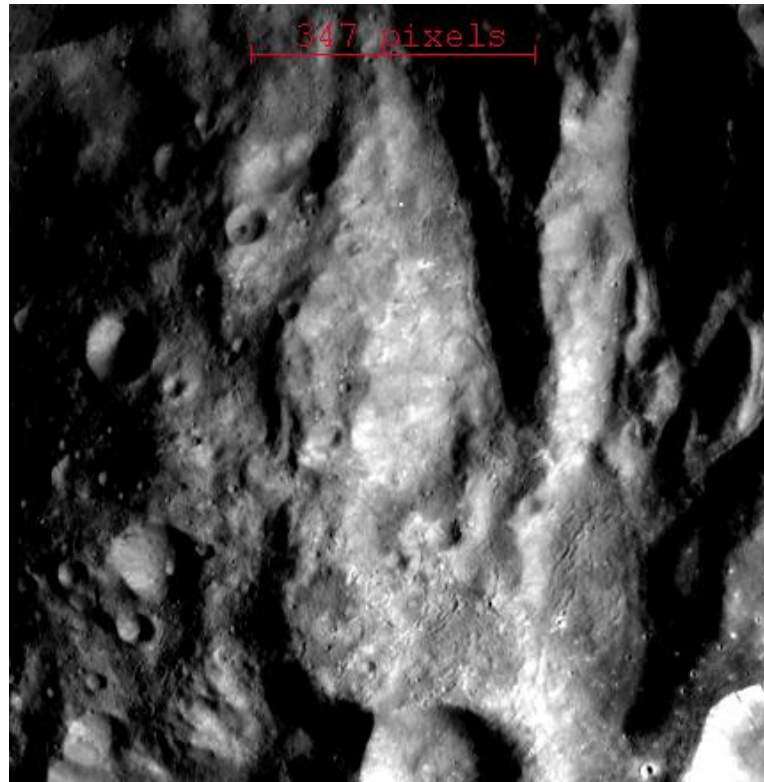
Imagen 15: Imagen15A: localización de la región de estudio dentro de la intersección del cráter Rheasilvia y Veneia. Imagen 15B: ampliación de la región de estudio.



La selección de esta zona de estudio se debe a su historia morfológica: al situarse dentro de la intersección del cráter Rheasilvia y Veneia es más fácil encontrar una mezcla de los tres materiales de interés, ya que los impactos que crearon estos cráteres fue de tal magnitud que excavó varias de las capas que componen Vesta. Por lo tanto, se piensa que la concentración de los tres materiales será tal que será fácilmente apreciable por el método que se va a emplear en el análisis de las imágenes de la FC en dicha región.

La vista de la región de estudio tiene el siguiente aspecto a través del programa AstrolImageJ:

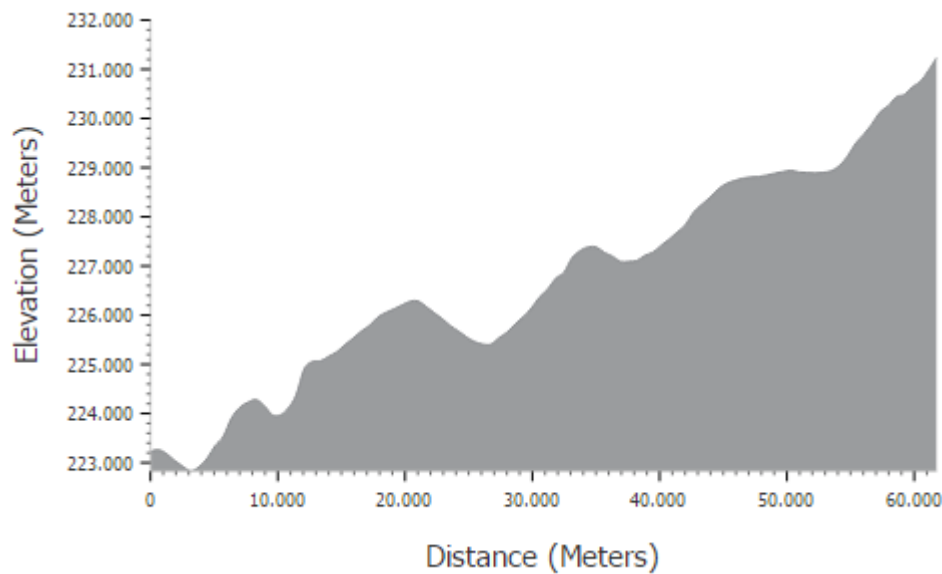
Imagen 16: Región de estudio a través del programa AstrolImageJ.



Fuente: Planetary Data System

Es una zona que presenta una creciente elevación a medida que se aleja del cráter Severina (se está recorriendo en el sentido que va desde la parte baja de la imagen hasta la parte alta).

Imagen 17: Morfología del terreno sobre la zona de estudio



A continuación, se presentan los resultados obtenidos después del tratamiento de las imágenes.

2. Procesamiento de las imágenes

Las imágenes de la zona de estudio seleccionada son las siguientes:

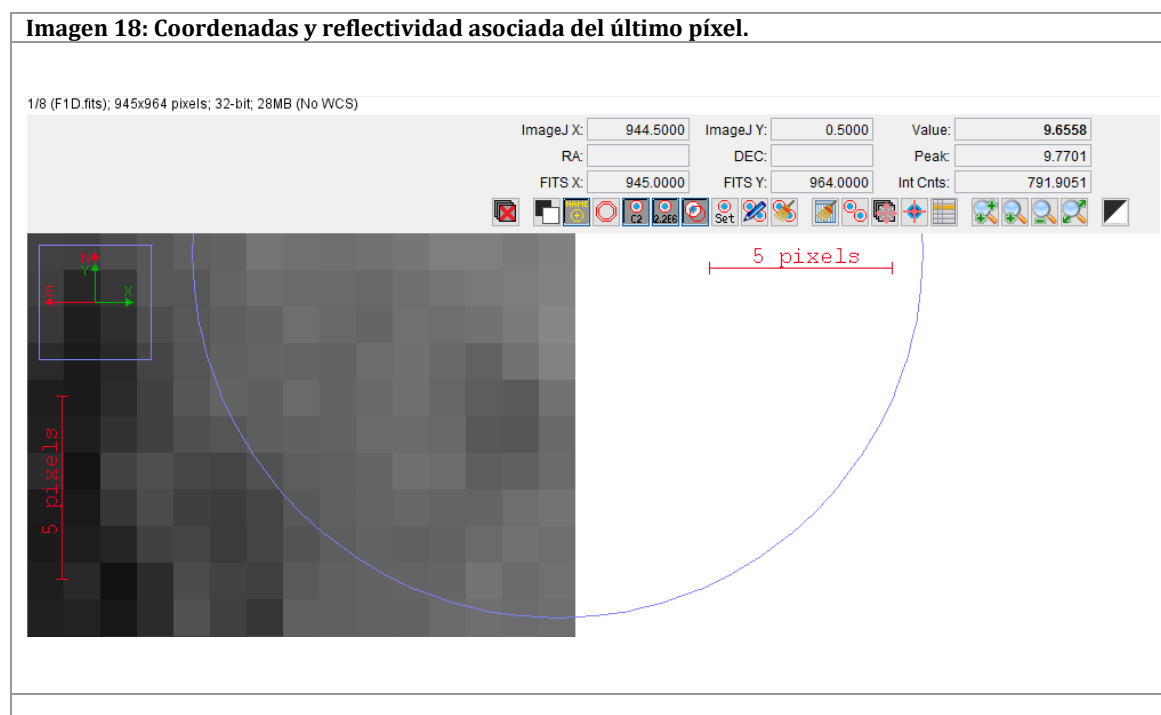
Tabla 5: Nomenclatura de las imágenes de la zona de estudio.

Filtro	Nombre de la imagen
F1	FC21B0011700_11299174059F1D.FIT
F2	FC21B0011701_11299174105F2D.FIT
F3	FC21B0011702_11299174111F3D.FIT
F4	FC21B0011703_11299174117F4D.FIT
F5	FC21B0011704_11299174124F5D.FIT
F6	FC21B0011705_11299174133F6D.FIT
F7	FC21B0011706_11299174144F7D.FIT
F8	FC21B0011707_11299174152F8D.FIT

Fueron tomadas durante la órbita 1 del ciclo 6 de la órbita HAMO-1.

Para centrar las imágenes y eliminar las zonas oscuras que surgen en este proceso se eligió el método de alineamiento con aperturas a fin de obtener un resultado lo más preciso posible y con las imágenes resultantes del mismo tamaño. Dicho tamaño fue de 945 x 964 píxeles, lo que hace que el número total de píxeles analizados hayan sido 910,980.

Una vez recortadas y centradas las imágenes, se pasa a emplear el programa GDL para transformarlas en archivos .txt, donde para cada píxel queda reflejado el valor de su reflectividad. Para saber si el programa GDL ha funcionado correctamente se puede realizar una sencilla prueba: localizando el último píxel de la imagen en AstroImageJ (arriba a la derecha) podemos ver sus coordenadas y reflectividad asociada (en este caso 9.6558 para la imagen F1D):



Y abriendo el fichero .txt asociado (en este caso f1.txt) podemos ver que el último valor tiene que coincidir:

Imagen 19: reflectividad asociada al último píxel de la imagen FC21B0011700_11299174059F1D.FIT

f1: Bloc de notas

Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda								
553	5,70149	4,80035	3,76659	3,42280	4,14261	4,69971	4,36270	4,31099	5,0256			
75957	7,84690	7,17537	7,67675	7,54546	7,36474	7,51826	7,40450	7,21205	7,45			
9,34545	9,27979	9,12038	8,94832	8,99701	8,97944	8,89096	8,85667	9,09304	9,			
8,63025	8,49774	8,39872	8,59485	8,58509	8,51124	8,62202	8,36446	8,71952				
6,06738	5,70499	4,83568	4,45087	4,19481	4,23915	4,16326	4,12714	4,44401				
0	7,17500	7,21108	7,35236	7,11878	7,02102	7,23992	7,44394	7,55822	7,85288			
372	7,88486	7,92997	7,94244	7,83181	7,73672	7,73561	8,01952	8,10439	8,2834			
61920	6,70019	5,83340	4,99893	6,08849	5,88494	5,16903	4,58540	4,73161	4,67			
4,50712	4,69735	4,44978	4,43755	4,55170	4,66848	5,40459	4,92392	5,12761	5,			
4,55857	4,32880	4,79943	5,38121	5,83939	5,90411	6,47928	6,93364	7,29944				
7,42305	7,70271	7,72821	7,59611	7,88649	8,27093	8,39964	8,35029	8,19142				
261	6,62855	6,70559	6,33784	6,34472	6,36591	6,33849	6,45105	6,34526	6,3926			
85273	3,45375	3,01759	2,91658	2,79821	2,85062	3,28652	3,16681	2,96538	3,25			
8,60683	8,49349	8,47597	8,45896	8,42752	8,29066	8,08376	8,34785	8,35126	7,			
8,73251	8,72923	8,85027	8,94350	9,29673	9,66328	9,68628	9,58102	9,32796				
8,64517	8,52839	8,82823	8,90553	8,38544	7,90532	7,82735	7,60521	8,11041				
665	6,97753	7,04806	6,50362	6,24647	6,26758	6,40788	6,24203	5,94790	5,8582			
74260	6,09761	6,22389	6,37904	6,59433	6,94750	7,61319	7,52692	7,46703	7,66			
6,75740	6,78558	7,01791	7,31730	6,98761	6,99706	6,88001	7,11293	7,36468	7,			
5,52979	5,40435	5,05465	5,09206	5,51195	5,68327	5,41833	4,65625	4,96286				
7,08713	7,37854	5,62955	6,13512	6,84926	6,10758	5,93096	5,67686	5,42412				
2	3,70287	3,35988	3,46275	3,51895	3,48070	3,78988	3,68093	3,91003	3,98845			
371	9,35087	9,43977	9,62649	9,61507	9,51590	9,65581						

Una vez obtenidos los txt asociados a cada imagen y comprobado que los valores asociados a cada píxel son los correctos, se pasa a preparar el programa que va a realizar la comparación de reflectividades poniendo los valores específicos de ancho y largo de la imagen, así como la distancia al Sol a la que se tomó cada imagen.

En cuanto al ancho y el largo de la imagen (en número de píxeles) se han introducido los valores:

```
//Ancho (eje x)
int a=944;
```

```
//Largo (eje y)
int b=963;
```

Mientras que para las distancias se tienen los siguientes valores:

Tabla 6: Resumen de las distancias al Sol a la que fueron tomadas las imágenes de la región de estudio.

Imágenes	Distancias (km)
FC21B0011700_11299174059F1D.FIT	346664373.990
FC21B0011701_11299174105F2D.FIT	346664384.989
FC21B0011702_11299174111F3D.FIT	346664396.148
FC21B0011703_11299174117F4D.FIT	346664406.144
FC21B0011704_11299174124F5D.FIT	346664418.037
FC21B0011705_11299174133F6D.FIT	346664434.414
FC21B0011706_11299174144F7D.FIT	346664453.969
FC21B0011707_11299174152F8D.FIT	346664468.058

Por lo tanto, el vector de distancias que se introduce es el siguiente:

//Distancia de Vesta al Sol en km en el momento de observación.

```
float dv[]={346664468.058F,  
            346664384.989F,  
            346664453.969F,  
            346664396.148F,  
            346664434.414F,  
            346664406.144F,  
            346664418.037F};
```

Una vez que se introducen las especificaciones de la zona de estudio solo queda ejecutar el programa para obtener los resultados.

3. Resultados obtenidos

Como se dijo anteriormente, una vez ejecutado el programa de comparación de las reflectividades, se obtienen seis archivos, de los cuales tres aportan información relevante (ComposiciónOrbita1.txt, Órbita1-CoordsEuc.txt y Órbita1-CoordsDio.txt), mientras que los otros tres sirven de apoyo para encontrar mejor el origen de una anomalía (Orbita1-7columns, Orbita1-7columnsNormalizado.txt, y DiferenciasOrbita1).

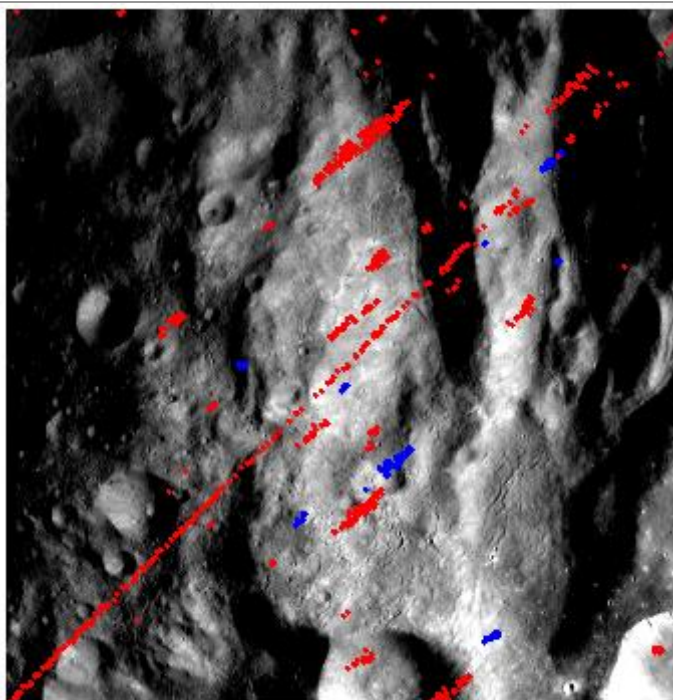
Para la región de estudio, el resultado que aporta ComposiciónOrbita1.txt es el siguiente:

Tabla 7: Distribución por materiales de la zona de estudio.

Material	Nº de píxels	Porcentaje (%)
Eucrite	1428	0
Diogenite	222	0
Howardite	907422	99

Por otro lado, la información que aportan los ficheros Órbita1-CoordsEuc.txt y Órbita1-CoordsDio.txt acerca de las coordenadas de los materiales eucrite y diogenite se refleja en la siguiente imagen donde sobre la región de estudio se han dibujado con puntos rojos las coordenadas de los píxeles eucrite, mientras que con puntos azules los de material diogenite:

Imagen 20: Distribución de los píxeles asociados con material eucrite (rojo) y diogenite (azul) sobre la región de estudio



VI. CONCLUSIONES

Sobre los resultados expuestos en el apartado anterior, se puede decir que el material predominante sobre la superficie de la región de estudio es el howardite, mezcla de eucrite y diogenite, esto se debe a que es el material predominante sobre la superficie como resultado de eones de impactos sobre la superficie que han dado como resultado una mezcla homogénea. Por lo tanto, es normal que el elemento predominante siempre sea el howardite.

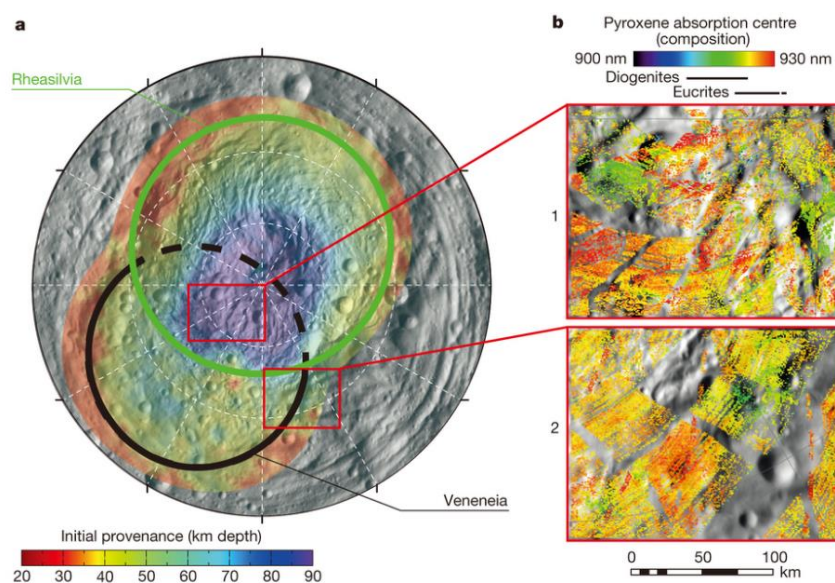
Sin embargo, hay concentraciones apreciables de eucrite (sobre todo) y diogenite, algo que no ocurre en otras regiones que se han empleado de prueba para corroborar los resultados de la zona de estudio y que tenían un historial de impactos menos importante en magnitud. Por lo tanto, todo indica que el material howardite es el elemento predominante sobre la superficie de Vesta, pero cabría preguntarse si con las deficiencias que se presentan en este método de análisis (poca amplitud de longitudes de onda a la hora de tomar las medidas, así como pocos puntos de observación) cuántos píxeles que se declaran como howardite en verdad no serían eucrites o diogenites; sobre todo eucrites, ya que tal y como se indica en Thangjam et al. (2013), las howardites en promedio son más eucrites (75-80%) que diogenites (20-25%) en su mezcla.

Como se puede observar en la imagen 13, donde se pueden observar los espectros de los tres materiales, para las longitudes de onda de los filtros que se sitúan en el visible, el espectro howardite coincide muy bien con el del eucrite, mientras que para las de los filtros situados en el infrarrojo y más adelante el espectro se acerca más al del diogenite. Esto hace que para próximos estudios similares a la misión DAWN, si se emplea un instrumento parecido a la Framing Camera que vaya a funcionar durante la mayor parte de la misión a diferencia de otros instrumentos, se plantee la necesidad de incorporar mayor cantidad de filtros que abarquen también una mayor cantidad de longitudes de onda (o mismo número de filtros, pero que abarcaran rangos más amplios de longitud de onda), ya que permitiría discernir mejor la composición. Así se podrían establecer unas primeras zonas de interés que volverían a ser analizadas por otros instrumentos de la nave de forma más detallada cuando se estuviera en órbitas que permitieran su uso.

Por último, hay que destacar en la imagen 20 la disposición de eucrites y diogenites en forma de brechas a lo largo de la imagen que coincide muy bien con lo expuesto en el apartado 1.4. referente a composición, en el cual se señalaba la disposición en forma de brechas de las eucrites en el regolito litificado. También coincide bastante bien, aunque salvando las diferencias de las escalas, con lo expuesto en la imagen 21 (Clenet et al. (2014)) en la que se puede observar para la región donde se encuentra la zona de estudio una disposición en forma de brechas de materiales con la misma absorción. En esta imagen el material eucrite estaría representado por colores rojo/amarillo, mientras que los diogenites serían verdes.

Por lo tanto, el método aquí presentado podría ser una propuesta aceptable para determinar la composición superficial mediante el empleo de imágenes FC y a la que se le podrían añadir mejoras para superar las debilidades que presenta, como veremos más adelante.

Imagen 21: Disposición de material con idéntica absorción sobre los cráteres Rheasilvia y Veneneia donde se encuentra la zona de estudio. Clenet et al. (2014).



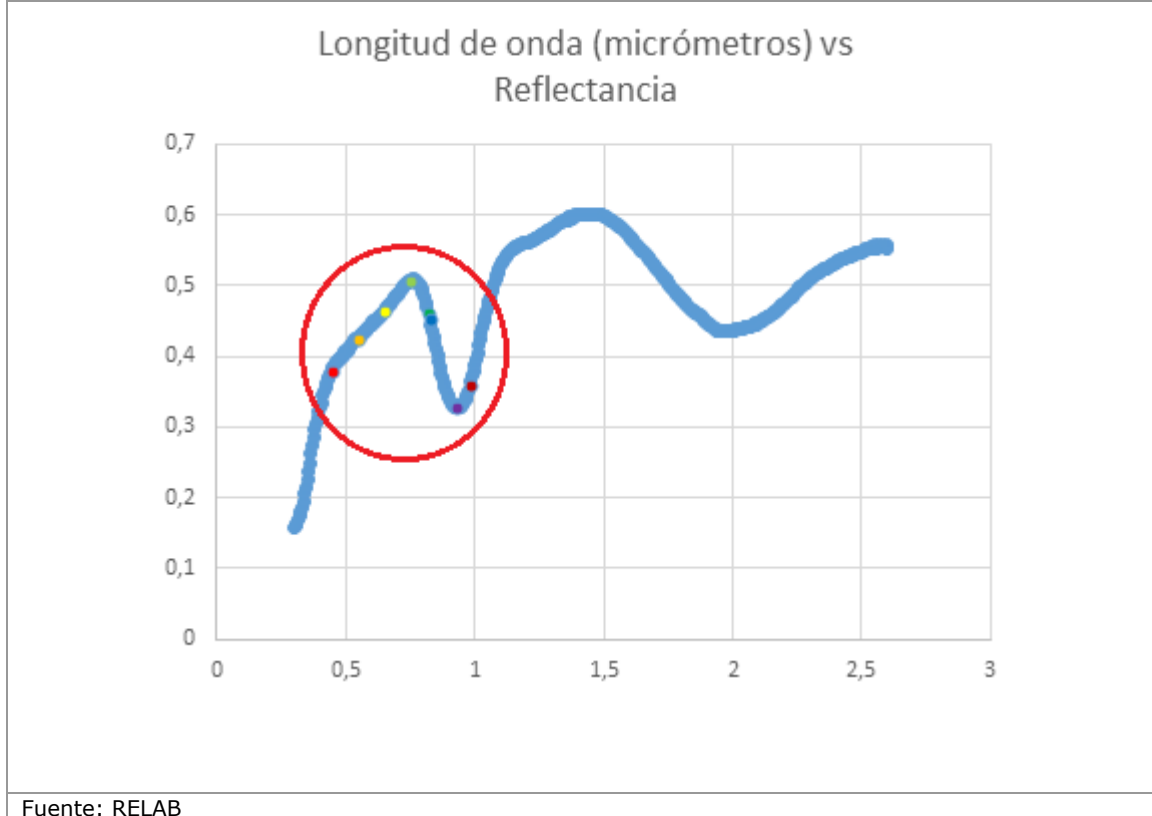
VII. LIMITACION DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Una vez dado el gran paso que supone el desarrollar un método de análisis de las imágenes de la FC, cabe identificar las limitaciones encontradas como paso imprescindible para añadir mejoras en futuras investigaciones.

La primera razón sería el escaso rango de longitudes de onda que abarcan los filtros que se emplean para tomar las imágenes FC, el cual abarca desde los 438 nm (longitud de onda efectiva del filtro F8) hasta los 965 nm (longitud de onda efectiva del filtro F5); por lo tanto, casi todo este intervalo de longitudes de onda que puede abarcar la FC se encuentra en el visible (380-780 nm) (filtros: F8, F2, F7, F3) y una pequeña parte en el infrarrojo cercano (filtros: F6, F4, F5).

Otra razón sería los escasos puntos de medida que se obtienen con la FC: 7 puntos, que unido a lo explicado en el párrafo anterior hace que solo se registre una pequeña cantidad de información. Esto hace que muchas veces haya sospechas acerca de la precisión a la hora de determinar la composición predominante de un píxel.

En el siguiente gráfico en el que se representa el espectro del eucrite empleado como referencia, se señalan las posiciones de las longitudes de onda efectivas de los filtros para dar una mejor idea de lo que se está exponiendo:

Imagen 22: Representación del espectro eucrite que se toma como referencia.²

Por lo tanto, una escasa amplitud del intervalo de medidas, así como pocos registros hacen que los resultados obtenidos sobre la composición superficial de Vesta empleando las imágenes de la FC no sean lo precisos que se hubieran deseado.

Pero entonces cabría la pregunta del porqué de la selección de los datos que aporta la FC para realizar el presente estudio a pesar de todas las debilidades manifiestas de la información que aportan. La principal razón es que de todos los instrumentos de la nave espacial DAWN, la FC fue el único instrumento que se empleó en todo momento durante todas las órbitas, por lo tanto, contiene un registro global de Vesta a diferencia de otros instrumentos como el VIR y el GRaND. Otro motivo es que a diferencia de otros instrumentos, los datos que aporta la FC incluyen la morfología de la región de estudio, que es uno de los factores que interesaba conocer a la hora de determinar la composición superficial.

Por lo tanto, a pesar de las incertidumbres y debilidades de la información contenida en las imágenes de la FC, tómese el presente estudio como una propuesta de método para poder

² Se señalan en puntos de colores los valores de longitud de onda y reflectividad asociados a cada filtro para indicar la poca amplitud de longitudes de onda, con respecto al espectro global que se está abarcando.

determinar a grandes rasgos la composición superficial de Vesta en aquellas regiones donde el único instrumento de medida ha sido la FC.

VIII. PROPUESTAS DE LINEAS FUTURAS DE INVESTIGACION

En Thangjam et al. (2013) se definen una serie de parámetros que se pueden emplear para analizar mejor la espectroscopía y, con ello, la composición superficial, teniendo en cuenta factores que pueden afectar como el tamaño de los granos o la concentración de hierro. Estas técnicas ya se emplearon con éxito a la hora de estudiar e identificar terrenos lunares.

Estos factores son BC (Band Curvature), BT (Band Tilt) y BS(Band Strength):

Imagen 23: Expresiones BC(Band Curvature), BT (Band Tilt) y BS (Band Strength). R es el valor de la reflectividad para cada longitud de onda que tiene como subíndice. Fuente: Thangjam et al.(2013).

$$BC = \frac{R_{0.749} + R_{0.964}}{R_{0.918}}$$

$$BT = \frac{R_{0.918}}{R_{0.964}}$$

$$BS = \frac{R_{0.964}}{R_{0.749}}$$

Según las conclusiones del trabajo de Thangjam et al. (2013), BS está fuertemente influenciado por el tamaño de las partículas y la abundancia de opacos (condritas de origen carbónico) sobre la superficie, lo que lo hace el indicador menos fiable por la abundancia de hierro ferroso. Esto puede verse en los análisis de HEDs que se presentan donde tienen un amplio rango de variación en los valores de BS, superponiéndose eucrites, diogenites y howardites a causa del tamaño de las partículas, pero, por lo general, las diogenites tienen rangos de BS más bajos, lo que implica bandas de profundidad más profundas comparadas con las eucrites y howardites.

Por otro lado, BC y BT estarían fuertemente influenciados por la química del piroxeno y son buenos indicadores para identificar regiones ricas en eucrites o diogenites. En los análisis

del espectro de los HEDs, se ha determinado que la BC y la BT son los parámetros espectrales más robustos para distinguir las eucrites de las diogenites. Al igual que BS, valores altos de BC elevados están asociados con diogenites, mientras que valores bajos con eucrites (en BT es al revés). Los valores intermedios se deben a howardites. La representación de BC frente a BT muestra diferentes distribuciones espaciales para las eucrites y las diogenites, con las howardites en medio. Esta diferencia se debe a que BC está más afectado por el tamaño de las partículas en mayor medida que BT.

Por lo tanto, BT sería el parámetro más fiable a la hora de determinar la composición superficial de Vesta, pero como BS y BC tienen una fuerte correlación con el albedo no se puede descartar su información, ya que puede ser complementaria con la que aporte BT.

Por estas razones expuestas, además del empleo del método que se ha explicado en este trabajo para determinar la composición superficial de Vesta, se podría complementar en el futuro con el empleo de las técnicas que se describen en Thangjam et al. (2013). En los métodos que se describen en dicho trabajo se utilizan los mismos datos de partida, pero de tal forma que se pueden superar problemas que plantean otros factores que no se han tenido en cuenta en el presente trabajo: el tamaño de las partículas y el contenido de hierro ferroso; así como obtención de más información que la obtenida empleando las imágenes FC como se indica en este trabajo, lo que puede suplir si para siguientes misiones se siguen empleando instrumentos similares a la FC que contengan el mismo número de filtros y abarquen el mismo espectro con sus longitudes de onda efectivas.

A su vez, sería complementado con el empleo de los datos del instrumento VIR para confirmar o desmentir las hipótesis que se obtendrían del análisis de las imágenes FC mediante los dos métodos anteriores.

IX. BIBLIOGRAFIA

1. Artículos

Burbine, T. H., Buchanan, P. C., Dolkar, T., & Binzel, R. P. (2009). Pyroxene mineralogies of near-Earth vestoids. *Meteoritics & planetary science*, 44(9), 1331-1341.

- Clenet, H., Jutzi, M., Barrat, J. A., Asphaug, E. I., Benz, W., & Gillet, P. (2014). A deep crust-mantle boundary in the asteroid 4 Vesta. *Nature*, 511(7509), 303-306.
- Drake, M. J. (2000). The Eucrite/Vesta Story. *Meteoritics and Planetary Science Supplement*, 35, A49.
- Drake, M. J. (2001). Presidential Address: Presented 2000 August 28, Chicago, Illinois, USA The eucrite/Vesta story. *Meteoritics & Planetary Science*, 36(4), 501-513.
- Duffard, R. (2012). *Mineralogy of Basaltic Material on the Minor Bodies of Our Solar System*. INTECH Open Access Publisher.
- Duffard, R., Lazzaro, D., & León, J. (2005). Revisiting spectral parameters of silicate-bearing meteorites. *Meteoritics & Planetary Science*, 40(3), 445-459.
- Ghosh, A., & McSween, H. Y. (1998). A thermal model for the differentiation of asteroid 4 Vesta, based on radiogenic heating. *Icarus*, 134(2), 187-206.
- Klačka, J. (1992). Mass distribution in the asteroid belt. *Earth, Moon, and Planets*, 56(1), 47-52.
- Rayman, M. D., Fraschetti, T. C., Raymond, C. A., & Russell, C. T. (2006). Dawn: A mission in development for exploration of main belt asteroids Vesta and Ceres. *Acta Astronautica*, 58(11), 605-616.
- Rayman, M. D., Fraschetti, T. C., Raymond, C. A., & Russell, C. T. (2013): DAWN, Science Plan, Vesta Release. *National Aeronautics and Space Administration-Jet Propulsion Laboratory (California Institute of Technology, Pasadena, California) (NASA-JPL). JPL D-31827. DAWN-21-4137*.
- Reddy, V., Nathues, A., Le Corre, L., Sierks, H., Li, J. Y., Gaskell, R., ... & Becker, K. J. (2012). Color and albedo heterogeneity of Vesta from Dawn. *Science*, 336(6082), 700-704.
- Righter, K., & Drake, M. J. (1997). A magma ocean on Vesta: Core formation and petrogenesis of eucrites and diogenites. *Meteoritics & Planetary Science*, 32(6), 929-944.
- Russell, C. T., Coradini, A., Christensen, U., De Sanctis, M. C., Feldman, W. C., Jaumann, R., ... & McSween, H. Y. (2004). Dawn: A journey in space and time. *Planetary and Space Science*, 52(5), 465-489.
- Russell, C. T., Capaccioni, F., Coradini, A., De Sanctis, M. C., Feldman, W. C., Jaumann, R., ... & Pieters, C. M. (2005). Dawn mission to Vesta and Ceres: Symbiosis between terrestrial observations and robotic exploration, in "Solar System small Bodies: Synergy between In Situ and Remote Sensing Observation".
- Russell, C. T., Capaccioni, F., Coradini, A., Christensen, U., De Sanctis, M. C., Feldman, W. C., ... & McFadden, L. A. (2006). Dawn discovery mission to Vesta and Ceres: Present status. *Advances in Space Research*, 38(9), 2043-2048.

McSween, H. Y., Binzel, R. P., De Sanctis, M. C., Ammannito, E., Prettyman, T. H., Beck, A. W., ... & Raymond, C. A. (2013). Dawn; the Vesta–HED connection; and the geologic context for eucrites, diogenites, and howardites. *Meteoritics & Planetary Science*, 48(11), 2090-2104.

Schröder, S.E., Gutierrez-Marques, P. (2013). DAWN-FC. DAWN-Framing Camera. Calibration Pipeline.

Spicuzza, M. J., Day, J. M., Taylor, L. A., & Valley, J. W. (2007). Oxygen isotope constraints on the origin and differentiation of the Moon. *Earth and Planetary Science Letters*, 253(1), 254-265.

Takeda, H. (1997). Mineralogical records of early planetary processes on the howardite, eucrite, diogenite parent body with reference to Vesta. *Meteoritics & Planetary Science*, 32(6), 841-853.

Thangjam, G., Reddy, V., Le Corre, L., Nathues, A., Sierks, H., Hiesinger, H., ... & Raymond, C. (2013). Lithologic mapping of HED terrains on Vesta using Dawn Framing Camera color data. *Meteoritics & Planetary Science*, 48(11), 2199-2210.

Vernazza, P., Mothé-Diniz, T., Barucci, M. A., Birlan, M., Carvano, J. M., Strazzulla, G., ... & Migliorini, A. (2005). Analysis of near-IR spectra of 1 Ceres and 4 Vesta, targets of the Dawn mission. *Astronomy & Astrophysics*, 436(3), 1113-1121.

X. ANEXOS

1. Anexo 1: Definiciones mineralógicas y compuestos empleados en el presente trabajo

- a) **Condritas:** las condritas o condritos son meteoritos no metálicos de tipo rocoso que no han sufrido procesos de fusión o de diferenciación en los asteroides de los que proceden. Su conocimiento aporta claves importantes para comprender el origen y la edad del Sistema Solar, la síntesis de compuestos orgánicos, el origen de la vida o la presencia de agua en la Tierra.

Su característica fundamental son los cóndrulos, que son esferas submilimétricas formadas por distintos minerales, y que suelen constituir entre el 20% y el 80% del volumen de las condritas.

Se diferencian de los meteoritos metálicos por su composición pobre en hierro (Fe) y níquel (Ni).

- b) Olivino:** es un grupo de minerales constituyentes de roca, aunque el nombre se suele emplear para designar a la principal solución sólida del grupo que es entre forsterita (Mg_2SiO_4) y fayalita (Fe_2SiO_4). Los olivinos son de los minerales más importantes en la clasificación de rocas ígneas.
- c) Regolito:** capa de materiales no consolidados y alterados, como fragmentos de roca, granos minerales y otros depósitos superficiales, que descansa sobre roca sólida inalterada. También se define como regolito la capa continua de material fragmentario, incoherente, producida por impactos meteoríticos, que forma normalmente los depósitos superficiales en planetas, satélites y asteroides donde la atmósfera es delgada o ausente.
- d) Rocas plutónicas o rocas intrusivas:** son un tipo de rocas ígneas las que se forman a partir de un enfriamiento lento, a gran profundidad y en grandes masas del magma. Se oponen así a la roca volcánica o extrusiva que, por el contrario, se forma al solidificarse el magma (lava) que emerge a la superficie de la corteza, entrando en contacto abrupto con la atmósfera o cuerpos de agua.

Durante su formación el enfriamiento es muy lento, lo que permite el crecimiento de grandes cristales de minerales puros y resultando una textura heterogénea, granulosa a simple vista.

Las rocas plutónicas, y en general las ígneas, son las rocas primarias, a partir de cuyos materiales evolucionan las demás. Constituyen la masa de muchos cuerpos rocosos del Sistema Solar formada por el enfriamiento y cristalización, tras su fusión, de los materiales silicatados con que se componen los planetas durante su acreción.

- e) Piroxeno:** Los piroxenos son un importante grupo de silicatos que forman parte de muchas rocas ígneas y metamórficas.

Tienen una estructura común que consiste en cadenas simples de tetraedros de sílice. Su fórmula general es $\text{XY}(\text{Si}, \text{Al})_2\text{O}_6$, donde "X" representa calcio, sodio, hierro²⁺, manganeso, litio o magnesio, e "Y" representa iones de menor tamaño como el cromo, aluminio, hierro²⁺, hierro³⁺, magnesio, manganeso o titanio. Entre

los diferentes piroxenos según su química existe una gran cantidad de miscibilidad. Las variedades ricas en hierro, magnesio y calcio son las más comunes. (Encyclopedia Britannica, 2016)

Se clasifican en dos grandes grupos según su cristalización:

- Clinopiroxenos: cristalizan en sistema monoclinico.
- Ortopiroxenos: lo hacen en el ortorrómbico.

f) Pigeonita: Es un inosilicato sin aluminio anhidro de magnesio, hierro o calcio. Dentro de los inosilicatos está dentro del grupo de los piroxenos, y, a su vez, dentro del subgrupo de clinopiroxenos que son los que cristalizan en el sistema cristalino monoclinico. Es un mineral común en las rocas volcánicas silíceas formadas por enfriamiento rápido.

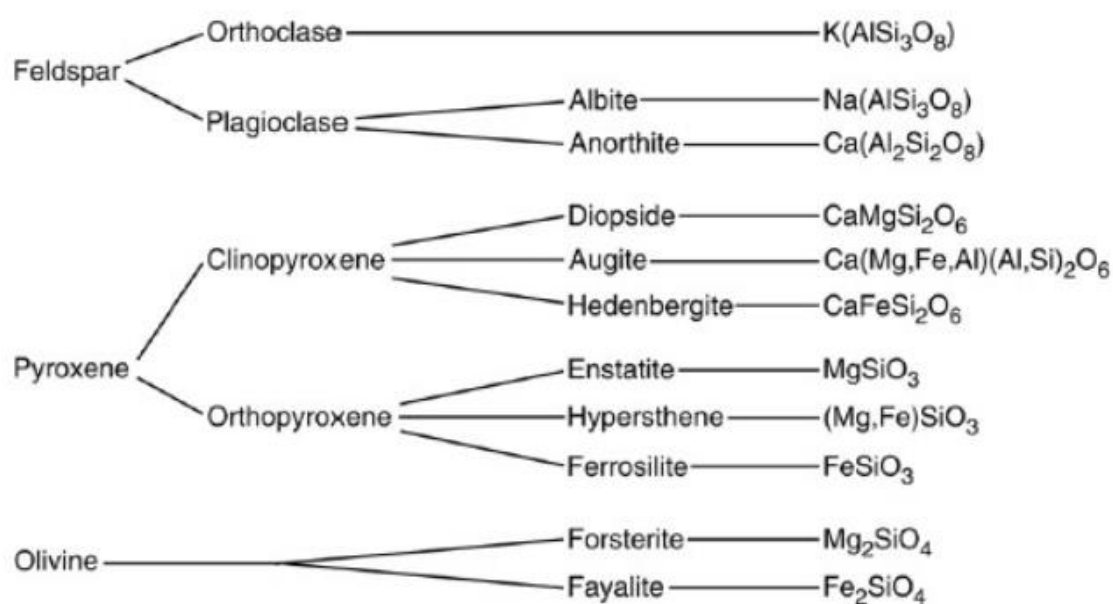
g) Plagioclasas: es un conjunto de minerales que comprenden la serie albita-anortita, sección triclinica del grupo de los feldespatos, perteneciente al grupo de los tectosilicatos, que es un constituyente importante de muchas rocas.

Específicamente están constituidas por una solución sólida isomorfa comprendida entre la albita (68.7% de sílice, 19.5% de óxido de sodio y 11.8% de sesquióxido de aluminio) y la anortita (43.2% de sílice, 36.7% de sesquióxido de aluminio y 20.1% de óxido de calcio).

2. Anexo 2: Esquema químico de los minerales que aparecen en el presente estudio

En la siguiente imagen se expone un esquema de la relación y composición de los materiales y minerales que se han descrito en el anexo anterior

Imagen 24: Esquema de la composición química de los minerales que aparecen en la composición superficial de Vesta.



Fuente: Russell et al. (2006).

3. Anexo 3: Programa completo de comparación de reflectividades

Programa completo de comparación de reflectividades

```

package com.berni.filtromodif;

import java.io.BufferedReader;
import java.io.File;
import java.io.FileNotFoundException;
import java.io.FileReader;
import java.io.FileWriter;
import java.io.IOException;
import java.io.PrintWriter;
import java.text.DecimalFormat;
import java.util.Scanner;
  
```

```
//Nombre del programa:
public class ComparacionReflectividades {

    public static void main(String[] args) throws IOException {

        //Aquí se introduce el número de iteraciones que se van a realizar y que coincide
        con el número de píxeles de la imagen.

        //Ancho (eje x)
        int a=944;

        //Largo (eje y)
        int b=963;

        //Distancia de Vesta al Sol en km en el momento de observación.
        float dv[]={346664468.058F,
                    346664384.989F,
                    346664453.969F,
                    346664396.148F,
                    346664434.414F,
                    346664406.144F,
                    346664418.037F};

        //Flujo Solar a la distancia de 1AU:
        float flujo[] = {1.863F,
                        1.274F,
                        0.865F,
                        0.785F,
                        1.058F,
                        1.572F,
                        1.743F};

        //Definimos las variables que se van a emplear en el programa:

        //Variables que guardan la composición de cada píxel:
        int Euc=0;
        int Dio=0;
        int How=0;

        //Variables que guardan el porcentaje de composición.
        int Euc_total=0;
        int Dio_total=0;
        int How_total=0;

        //Variables que guardan el resultado de calcular las diferencias de
        reflectividad
        float dif_euc[][]= new float[a][2];
        float dif_dio[][]= new float[a][2];
        float dif_how[][]= new float[a][2];
```

```

//Variables que agrupan y operan los valores de reflectividad de un mismo
pixel
    float datos[][] = new float[a][7];
    float datos_corr[][] = new float[a][7];
    float normaliz[][] = new float[a][7];

//Acceso y búsqueda de los archivos .txt en sus directorios
Scanner sc2,sc3,sc4,sc5,sc6,sc7,sc8;

try {
    sc2 = new Scanner(new File("C:\\Users\\f2.txt"));
    sc3 = new Scanner(new File("C:\\Users\\f3.txt"));
    sc4 = new Scanner(new File("C:\\Users\\f4.txt"));
    sc5 = new Scanner(new File("C:\\Users\\f5.txt"));
    sc6 = new Scanner(new File("C:\\Users\\f6.txt"));
    sc7 = new Scanner(new File("C:\\Users\\f7.txt"));
    sc8 = new Scanner(new File("C:\\Users\\f8.txt"));

    //fichero que da normalizado para cada píxel el valor de las reflectancias
    en cada filtro (ordenados por F8/F2/F7/F3/F6/F4/F5).
    FileWriter fw;
    fw = new FileWriter(new File("C:\\Órbita1 7columnsNormalizado.txt"));

    //aquí escribiríamos otro fichero indicando el resultado si es
    eucrite/diogenite/howardite
    FileWriter fx;
    fx = new FileWriter(new File("C:\\ComposicionÓrbita1.txt"));

    //fichero que indica fila a fila el resultado.
    FileWriter fy;
    fy = new FileWriter(new File("C:\\DiferenciasÓrbita1.txt"));

    //fichero que da sin normalizar para cada píxel el valor de las reflectancias
    en cada filtro (ordenados por F8/F2/F7/F3/F6/F4/F5).
    FileWriter fz;
    fz = new FileWriter(new File("C:\\Órbita1-7columns.txt"));

    //fichero que nos indica las coordenadas de un píxel cuando sale el
    mensaje "Euc":
    FileWriter fu;
    fu = new FileWriter(new File("C:\\Órbita1-CordsEuc.txt"));

    //fichero que nos indica las coordenadas de un píxel cuando sale el
    mensaje "Dio":
    FileWriter fv;
    fv = new FileWriter(new File("C:\\Órbita1-CordsDio.txt"));

    //Se inicia el proceso
    for(int y=0;y<b; y++){
        for(int i=0;i<a;i++){

            //El programa accede a los ficheros en el orden que le pedimos
            (F8/F2/F7/F3/F6/F4/F5) y continúa el recorrido mientras haya datos. Se van
            creando los componentes del vector datos[][] para cada píxel.
            if (sc8.hasNextFloat()) {
                datos[i][0] = sc8.nextFloat();
            }
        }
    }
}

```

```

    }

    if (sc2.hasNextFloat()) {
        datos[i][1] = sc2.nextFloat();
    }

    if (sc7.hasNextFloat()) {
        datos[i][2] = sc7.nextFloat();
    }

    if (sc3.hasNextFloat()) {
        datos[i][3] = sc3.nextFloat();
    }

    if (sc6.hasNextFloat()) {
        datos[i][4] = sc6.nextFloat();
    }

    if (sc4.hasNextFloat()) {
        datos[i][5] = sc4.nextFloat();
    }

    if (sc5.hasNextFloat()) {
        datos[i][6] = sc5.nextFloat();
    }

    //se corrigen los datos[][] aplicando las correcciones de distancia al Sol
    y respuesta de cada filtro al flujo solar.
    for(int j=0;j<7;j++){

        datos_corr[i][j]= (float) ((datos[i][j])*
                                   (Math.PI)*
                                   (Math.pow(dv[j],2))*
                                   (Math.pow(flujo[j],-1)));

        System.out.print(datos_corr[i][j] + " ");
        fz.write(datos_corr[i][j] + " ");

    }

    System.out.println();
    fz.write(System.lineSeparator());

    //se normalizan los datos corregidos con respeto al valor en el F2 y se
    hace que tengan el mismo número de cifras:
    for(int j=0;j<7;j++){

        normaliz[i][j]=(float)(
                                   (datos_corr[i][j]/datos_corr[i][1]));
    }

```

```
double x = (double)normaliz[i][j];

DecimalFormat df = new DecimalFormat("#0.00000000");

//df.format(x);
String x1=df.format(x);

System.out.print(x1 + " ");
fw.write(x1 + " ");

}

System.out.println();
fw.write(System.lineSeparator());

//se crean las magnitudes que se van a emplear para dilucidar la
composición predominante en el píxel.
dif_euc[i][1]= (float) Math.sqrt(
    Math.pow((normaliz[i][0]-0.870934895),2)+
    Math.pow((normaliz[i][1]-1),2)+
    Math.pow((normaliz[i][2]-1.085860881),2)+
    Math.pow((normaliz[i][3]-1.178224997),2)+
    Math.pow((normaliz[i][4]-1.03832738),2)+
    Math.pow((normaliz[i][5]-0.769017478),2)+
    Math.pow((normaliz[i][6]-0.793369077),2));

dif_dio[i][1]= (float) Math.sqrt(
    Math.pow((normaliz[i][0]-0.70610281),2)+
    Math.pow((normaliz[i][1]-1),2)+
    Math.pow((normaliz[i][2]-1.075217256),2)+
    Math.pow((normaliz[i][3]-1.035497439),2)+
    Math.pow((normaliz[i][4]-0.676677086),2)+
    Math.pow((normaliz[i][5]-0.420781304),2)+
    Math.pow((normaliz[i][6]-0.47940363),2));

dif_how[i][1]= (int) Math.sqrt(
    Math.pow((normaliz[i][0]-0.829196281),2)+
    Math.pow((normaliz[i][1]-1),2)+
    Math.pow((normaliz[i][2]-1.074897103),2)+
    Math.pow((normaliz[i][3]-1.078338401),2)+
    Math.pow((normaliz[i][4]-0.673516674),2)+
    Math.pow((normaliz[i][5]-0.401810592),2)+
    Math.pow((normaliz[i][6]-0.439768495),2));

//Se comparan los valores de las diferencias de reflectividad. El menor valor
es el que determina la composición del píxel. En caso de que salgan Euc y Dio se
escriben sus coordenadas.
if ((dif_euc[i][1]<dif_dio[i][1]) & (dif_euc[i][1]<dif_how[i][1])){

    Euc=Euc+1;

    fy.write("Euc");
    fy.write(System.lineSeparator());
```



```

        double coord_x = 0.5+i;
        double coord_y = 963.5-y;

        fu.write("Euc " + "(" + coord_x + ", " + coord_y + ")");
        fu.write(System.lineSeparator());

        fu_crudo.write(coord_x + " " + coord_y);
        fu_crudo.write(System.lineSeparator());

    }

    if((dif_dio[i][1]<dif_euc[i][1]) & (dif_dio[i][1]<dif_how[i][1])){

        Dio=Dio+1;

        fy.write("Dio");
        fy.write(System.lineSeparator());

        double coord_x = 0.5+i;
        double coord_y = 963.5-y;

        fv.write("Dio " + "(" + coord_x + ", " + coord_y + ")");
        fv.write(System.lineSeparator());

        fv_crudo.write(coord_x + " " + coord_y);
        fv_crudo.write(System.lineSeparator());
    }

    if((dif_how[i][1]<dif_euc[i][1]) & (dif_how[i][1]<dif_dio[i][1])){

        How=How+1;

        fy.write("How");
        fy.write(System.lineSeparator());

    }

}

}

//se cierran la mayoría de los ficheros creados una vez acabado el
recorrido por todos los píxeles.
    fu.flush();
    fu.close();

    fu_crudo.flush();
    fu_crudo.close();

    fv.flush();
    fv.close();

    fv_crudo.flush();
    fv_crudo.close();

```

```
fw.flush();
fw.close();

fz.flush();
fz.close();

Euc_total=(Euc*100)/(Euc+Dio+How);
Dio_total=(Dio*100)/(Euc+Dio+How);
How_total=(How*100)/(Euc+Dio+How);

System.out.println(Euc);
System.out.println(Dio);
System.out.println(How);

System.out.println(Euc_total);
System.out.println(Dio_total);
System.out.println(How_total);

fx.write("[\"+(Euc_total "+Euc_total+ "% " +") " +
        "(Euc "+Euc+ " veces" +")"+ "]" + "\t" +
        "[\"+(Dio_total "+Dio_total+ "% " +") " +
        "(Dio "+Dio+ " veces" +")"+ "]" + "\t" +
        "[\"+(How_total "+How_total+ "% " +") " +
        "(How "+How+ " veces" +")"+ "]" );

fx.flush();
fx.close();

fy.flush();
fy.close();

} catch (FileNotFoundException e) {
    // TODO Auto-generated catch block
    e.printStackTrace();
}

finally{
}

}

}
```