



1. ENTAMU

Güei hai numberoses teoríes sobre la formación del Sistema Solar, siendo la más acentuada la teoría nebular moderna. Acordies con esta, la formación y evolución del Sistema Solar entamó hai más de 4.500 millones d'años col colapsu gravitacional d'una pequeña fraición d'una nube molecular xigante, dende la que se formaron el Sol, los planetes y los cuerpos menores.

Un cuerpu menor, según la UAI (Unión Astronómica Internacional), ye un cuerpu qu'orbita al rodiu del Sol y que nun ye planeta, planeta nanu o satélite. Poro, los oxetos tresneptunianos, los cometes, los meteoroides y los asteroides pertenecen a la categoría de cuerpos menores.

Los asteroides son oxetos peñosos qu'orbiten al rodiu del Sol y que tienen un tamaño enforma pequeñu pa consideralos planetes o planetes nanos. La composición d'estos cuerpos ye mui variada y bayurosa en dellos metales de gran

Carauterización taxonómica de los asteroides (704) Interamnia y (349) Dembowska per aciu de téuniques fotométriques y espectroscópiques

Por Isabel Vázquez González
María Rodríguez Morán
Enrique Díez Alonso
Francisco Javier de Cos Juez

Institutu Universitariu de Ciencies y Teunoloxíes Espaciales d'Asturies (ICTEA)
Universidá d'Uviéu

Asteroide (243) Ida, vistu pola sonda Galileo.
Fonte: <https://photojournal.jpl.nasa.gov>

interés económicu polo que, nos últimos años, el conceutu de *minería espacial* evolucionó notablemente.

La idea d'esplotar recursos de los asteroides escomenzó a desendolcase a lo cabero del sieglu xx, esperimentando un gran puxu nel añu 2015 cola robla nos EE.XX. de la llamada *Llei del Espaciu*. Esta dexa a les compañíes del país la explotación mineral espacial y l'apropiación d'asteroides y otros recursos espaciales per parte d'aquelles persones o empreses que desendolquen la teunoloxía acionada pal desplazamientu y la explotación d'estos cuerpos, ricos en minerales como'l platín, l'oru o'l fierro.

Sicasí, la reivindicación d'estos recursos per parte de los gobiernos ta espresamente prohibida nel Tratáu Internacional del Espaciu Ultraterrestre redautáu pola UNOOSA (Oficina de les

La sobreexplotación güei de los recursos presentes na Tierra ta escosando les reserves d'estos, polo que la carrera pola exploración y explotación llucrativa privada del espaciu yá entamó

Naciones Xuníes p'Asuntos del Espaciu Exterior), tratáu en vigor dende 1967, onde s'afita que la exploración y l'usu del espaciu ultraterrestre han facese en beneficiu ya interés de tolos países. Arriendes d'ello, la Lluna y otros cuerpos menores nun puen ser oxetu d'apropiación nacional o reivindicación de soberanía.

La sobreexplotación anguaño de los recursos presentes na Tierra ta escosando les reserves d'estos, polo que la carrera pola exploración y explotación llucrativa privada del espaciu yá

entamó. Numberoses empreses tán merguyaes nel desendolcu d'avances teunolóxicos quedexen averase a los asteroides pa sacar los sos recursos. Estes empreses persiguen que l'aprobación de la Llei del Espaciu per parte de los EE.XX. desanicie lo afitao nel tratáu de la UNOOSA, definiendo asina la marcación llegal d'un negociu que podría ser mui rentable.

La minería d'asteroides ye un conceutu recién, pero la idea de que l'espaciu ye fonte de recursos mineralóxicos surde hai dos siglos, cuando l'investigador de la Universidá de Berlín Ernst Chladni propunxo que los meteoritos nun tienen un aniciu terrestre. Esta hipótesis supón un finxu na mineraloxía, magar la oposición inicial de tola comunidá científica.

Los asteroides reflexen parte de la lluz solar incidente xenerando un espectru de reflexón que los carauteriza. Estos espectros de reflexón amuesen gran asemeyanza col espectru solar pero, por cuenta de los elementos presentes na superficie de los asteroides, amuesen bandes d'absorción que los estremen del espectru del Sol y amás faen posible identificar los elementos presentes nellos.

Nel añu 1984, David J. Tholen propunxo una clasificación de los asteroides d'acordies coles observaciones del espectru en banda ancha (ente 0,31 y 1,06 μm) de 600 asteroides, en combinación con midíes del so albedu¹ [1]. Esta clasificación, la más esparcida güei, estrema 14 tipoloxíes englobaes en dellos grupos, ente los que rescampen el grupu c (asteroides carbonáceos), el s (composición peñosa) y el x (asteroides con espectros asemeyaos, pero con diferentes composiciones y albedos).

1. Fraición de la lluz o otra radiación qu'incide sobre un cuerpu non lluminosu, como un planeta, o sobre una zona d'una superficie planetaria, que ye reflexada.

Evidentemente, como pasu previu a la explotación de los asteroides, ye necesario carauterizar dafechamente la so composición. Una carauterización mineralóxica previa de la qu'inferir el grupu de Tholen pue facese pente medies de filtros fotométricos, lo mesmo que per análisis espectroscópicu. Entrambos métodos desendólquense nesti artículu.

Les empreses mineres persiguen que la llei norteamericana del Espaciu (2015) desanicie lo afitao pol tratáu de la UNOOSA (1967): que la exploración y l'usu del espaciu ultraterrestre han facese en beneficiu ya interés de tolos países. Arriendes d'ello, la Lluna y otros cuerpos menores nun puen ser oxetu d'apropiación nacional o reivindicación de soberanía.

2. INSTRUMENTACIÓN

L'Observatoriu Astronómicu de la Escuela de Mines d'Uviéu (Fig. 1) dispón de la instrumentación necesaria pa carauterizar un asteroide, faciéndose nel cursu académicu 2018-2019 l'estudiu, per aciu de filtros fotométricos, del asteroide (704) *Interamnia* y per aciu d'espectroscopía del asteroide (349) *Dembowska*. Entrambos dos escoyéronse por tar visibles cuasi tola nueche nel tiempu nel que se fixeron les observaciones (febreru y marzu de 2019), por presentar un brillu lo suficientemente alto pal instrumental disponible y porque foi oxetu d'estudios anteriores, lo que facía posible validar los resultaos algamaos.

Interamnia descubriólu'l 2 d'ochobre de 1910 Vincenzo Cerulli. Pertenez al *Cintu Principal d'Asteroides*², y con un diámetru mediu de 317 km destaca por ser el quintu asteroide en masa. Describe una órbita con una semiexa mayor que mide 3.05 Unidaes Astronómiques³ (en delante UA), asitiándose a 2.58 UA del Sol nel periheliu⁴ y a 3.52 UA nel afeliu⁵. El so periodu de tresllación ye de 5 años y 127 díes. La so magnitú aparente⁶ algama'l valor $m \sim 11$ cerca de la oposición⁷.

Dembowska descubriólu'l 9 d'avientu de 1892 Auguste Charlois. Pertenez tamién al *Cintu Principal d'Asteroides* y destaca pol so albedo inusualmente altu (0.384), siendo'l segundu mayor albedo, per detrás de (4) *Vesta*, de los asteroides con un diámetru superior a 75 quilómetros (el so diámetru mediu ye de 140 km). La so semiexa mayor mide 2.92 UA, tando a 2.66 UA del Sol nel periheliu y a 3.19 UA nel afeliu. El so periodu de tresllación ye de 5 años y la so magnitú aparente mientres la oposición ye de ~ 9.2 .

Nel procesu de la carauterización mineralóxica d'un asteroide empléguese un refileru d'elementos ópticos, mecánicos y electrónicos. En primer llugar, ye necesariu un telescopiu afayadizu pa facer les observaciones, siendo un telescopiu de tipu catadióptricu l'emplegáu nesta

2. El Cintu Principal d'Asteroides ye una rexón con gran acumulación d'asteroides asitiada ente les órbites de Marte y Xúpiter.

3. La Unidá Astronómica (UA) ye'l radiu mediu de la órbita terrestre, $\sim 149\,598\,000\,000$ km.

4. El periheliu ye'l puntu de la órbita nel que la distancia al Sol ye mínima.

5. L'afeliu ye'l puntu de la órbita nel que la distancia al Sol ye máxima.

6. La magnitú aparente fai referencia al brillu col qu'un oxetu celeste ye visible dende la Tierra.

7. Momentu nel que s'allinien o aringleren el Sol, la Tierra y un oxetu más alloñáu como un planeta exterior o un asteroide.



ARRIBA

Figura 1. Telescopiu Schmidt-Cassegrain y Observatoriu Astronómicu de la Escuela de Mines de la Universidad d'Uviéu

investigación, en particular un telescopiu Schmidt-Cassegrain de 203 mm d'apertura con una rellación focal $f/6$ (Fig. 1).

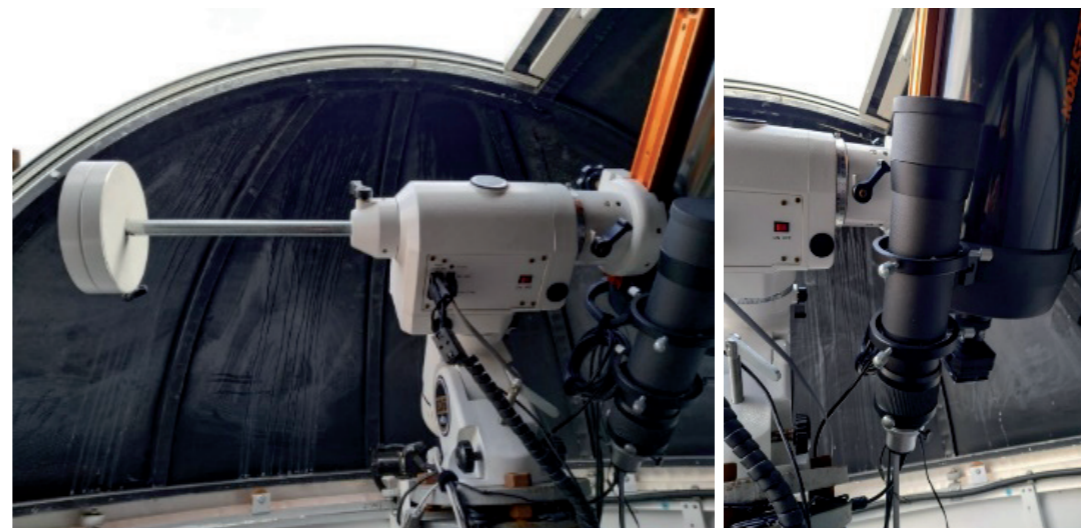
L'allugamientu na bóveda celeste del campu nel que s'alcuentren los asteroides al igual que l'apuntáu del telescopiu, son aspectos críticos, polo que la montura del telescopiu, de tipu ecuatorial alemán (skywatcher NEQ6), ha tar computerizada (Fig. 2). Amás, por mor de los llargos tiempos d'esposición (~ 200 s) de les imáxenes algamaes, ha tar asistida cola función d'autoguiáu. Esta consiste na deteición d'irregularidaes nel siguiemtu per aciu de la monitorización continua d'una estrella próxima

al campu que se va fotografiar, corrixendo estes imperfeiciones con sutiles impulsos unviaos a la montura. Nel nuesu montaxe, la vixilancia de la estrella de guiáu faise con una cámara de guiáu (Luna QHY 6) sobre un tubu en paralelo de 50 mm d'apertura (Fig. 3).

DERECHA

Figura 2. Montura emplegada

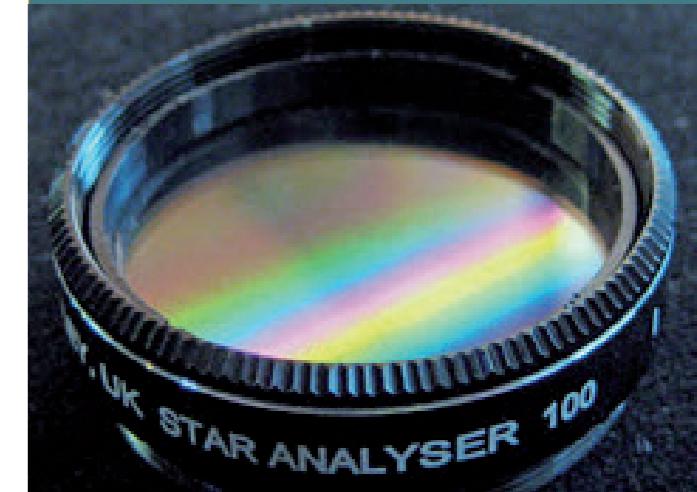
Figura 3. Tubu y cámara de guiáu emplegaos



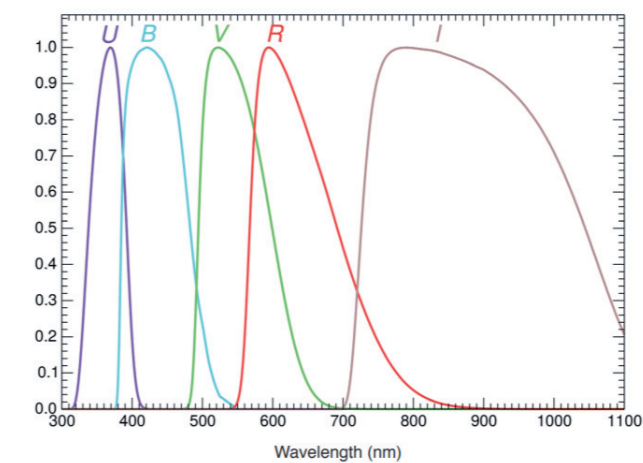
Pa la carauterización espectroscópica del asteroide Dembowska emplegóse la rede de difracción Star Analyser (resolución 100 llinies por mm), encargada de dispersar la lluz del asteroide pa tener el so espectru de reflexón (Fig. 4), amás d'un filtru infrarroxu que bloquia llongitúes d'onda per baxo de 750 nm y que tien como función iguar el problema de la superposición de los diferentes órdenes del espectru (esto esplica-se con detalle más alantre).

Na carauterización del asteroide *Interamnia* per aciu de filtros fotométricos empléguese los diferentes filtros Johnson-Cousins (sistema UBVR_I). Esti sistema desendócalu en 1953 Johnson y Morgan y meyóralu en 1973 Cousins. Les siglas UBVR_I correspuenden col rangu de llongitúes d'onda que cada filtru ye pa tresmitir: u: violeta, b: azul, v: verde, r: roxu, i: infrarroxu (Fig. 5).

Pa cabu, otru elementu necesariu pa entrambos métodos de carauterización ye la cámara CCD. Les cámaras CCD no respuesten d'igual mou pa toles llongitúes d'onda. Na so curva de respuesta pue observase la dependencia de la sensibilidá énte les diferentes llongitúes d'onda.



Johnson-Cousins passbands

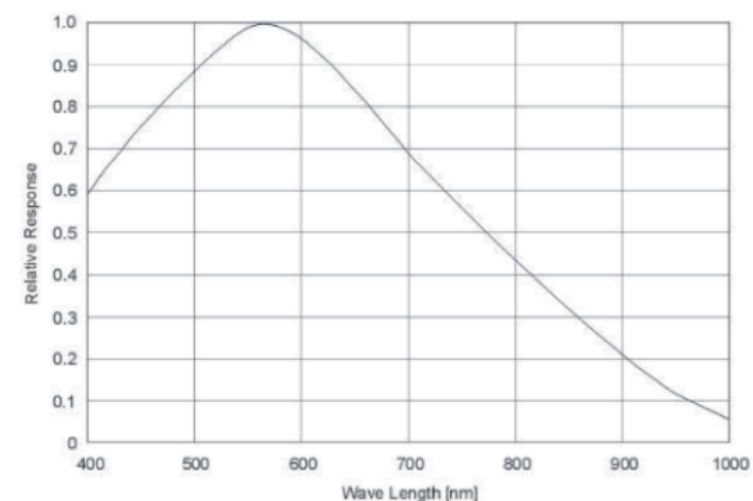
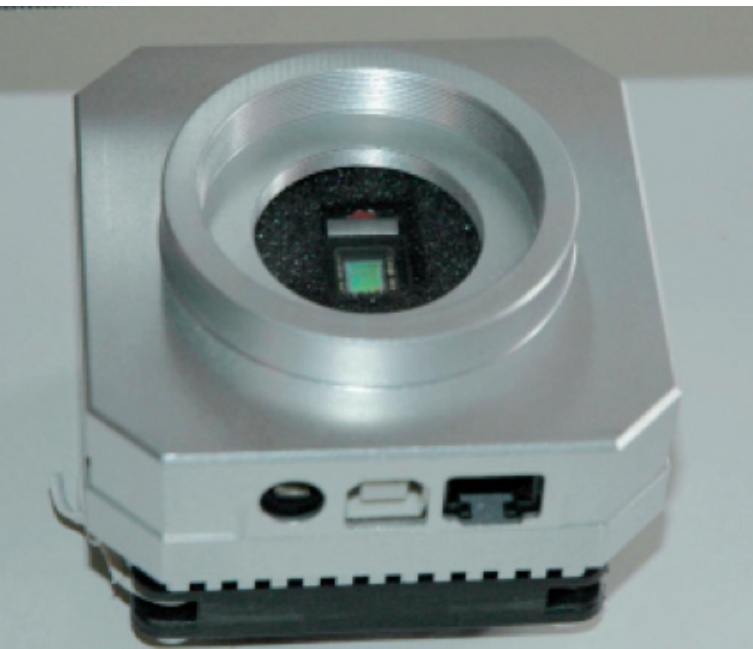


ARRIBA

Figura 4. Rede de difracción Star Analyser

Figura 5. Curves de sensibilidá espectral de los diferentes filtros del sistema UBVR_I

El modelo de cámara empleáu ye'l Luna QHY6 (Fig. 6), refrixerada col fin d'amenorgar el ruído térmico, y con una curva de respuesta na que s'aprecia que pa una llongitud d'onda superior a 830 nm la respuesta relativa d'esta ye inferior a 0,4 (Fig. 7).



ARRIBA

Figura 6. Cámara CCD QHY6

Figura 7. Curva de respuesta de la cámara CCD QHY6

3. TÉCNICAS EMPLEAES

3.1. Fotometría

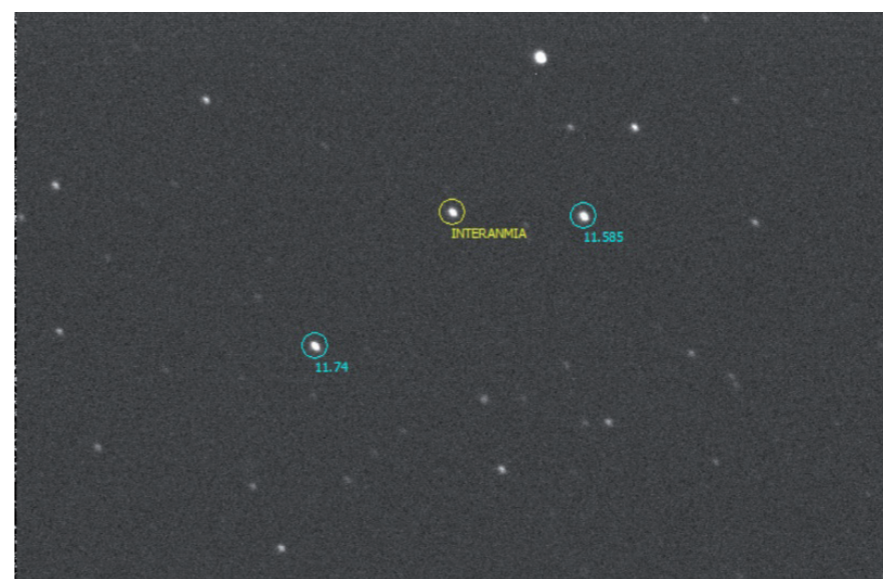
La técnica de caracterización fotométrica consiste en hacerse con múltiples imágenes del campo del asteroide con cada uno de los filtros fotométricos. Con estas imágenes logradas, calcúlase'l brillo del asteroide en cada rango de longitudes d'onda por comparación con estrellas del mesmu campo que nun seyan variables y con brillo bien determináu, técnica conocida como *fotometría diferencial*. D'esti mou pue llograse la magnitud del asteroide en cada banda y construir un espectro de perbaxa resolución, del que se pue inferir el so tipu de Tholen, y polo tanto facer una estimación preliminar de la composición. Hai que comentar que pa la caracterización fotométrica del asteroide Interamnia, namái s'emplegó fotometría llograda a partir de los filtros B, V y R.

Col envís de calibrar el nuesu sistema d'adquisición, la toma d'imágenes del asteroide ha acompañase de l'adquisición d'imágenes d'un campo de fotometría estándar con cada filtru fotométricu. Nel nuesu casu escuyóse'l campo de fotometría estándar correspondiente al cúmulo estelar Messier 67, asitiáu na constelación de Cáncer, próximamente a la zona del cielu na que s'atopaba l'asteroide Interamnia.

Amás de la toma de las imágenes de ciencia con cada filtru pa estrayer la fotometría, ye crucial una correuta adquisición d'imágenes de calibración (*darks*, *flats* y *bias*). L'oxetivu ye tomar una serie d'imágenes que representen les fontes de señal non astrofísica (ruído térmico, ruído de lectura, inhomoxeneidaes de sensibilidá nel detector CCD, manches nel tren ópticu...) pa corrixir darréu eses señales de les nueses imágenes de ciencia.

En calibrando correutamente les imágenes de ciencia (tanto del campo del asteroide

Los asteroides reflexen parte de la lluz solar incidente xenerando un espectru de reflexión que los caracteriza. Estos espectros de reflexión amuesen gran asemeyanza col espectru solar pero, por cuenta de los elementos presentes na superficie de so, amuesen bandes d'absorción que los estremen del espectru del Sol y amás faen posible identificar los elementos presentes nellos.



ARRIBA

Figura 8. Captura del programa Fotodif coles imágenes llograes col filtru B

como del campo de M 67) ha estimase'l brillo del asteroide en cada filtru. Pa estrayer esta fotometría escúeyense nel campo del asteroide una serie d'estrelles afayadices de calibración, con un brillo en cada rangu de longitudes d'onda que sacaremos de los catálogos astronómicos 2MASS [2] y UCAC4 [3]. Esti procesu fíxose nel nuesu casu col paquete *fotodif*⁸ (Fig. 8).

En calculando'l brillo del asteroide en cada filtru, llógrese los denomados índices de color B-V y V-R; L'índice B-V ye la diferencia ente la magnitud midida col filtru B y la magnitud midida col filtru V. Pela so parte, l'índice V-R ye'l resultáu de facer la diferencia ente la magnitud tomada col filtru V y el filtru R. La relación ente entrambos dos va dexanos conocer el tipu espectral aproximáu.

Úsense darréu les imágenes del campo estándar de Messier 67 pa calibrar el puntu cero del nuesu equipu. Ye un campo ampliamente estudiáu y pal que se determinó previamente la fotometría y los índices de color d'un gran número d'estrelles. Les diferencies ente los índices de color pa les estrelles d'esti campu algamaos per aciu de fotometría diferencial col nuesu sistema y les tablaes oficialmente, sedrán por mor de les peculiaridaes del nuesu sistema (sensibilidá de la cámara, transmisión de los filtros, tren ópticu...) y van valinos pa iguar estes peculiaridaes. Nel nuesu casu obtúvose que la diferencia ente los índices de color B-V y V-R instrumentales (sacaos pol nuesu sistema) y teóricos (los tablaos) ye de 0.00 ± 0.04 pa entrambos índices, concluyendo unos índices de color finales pa Interamnia $V-R=0.18 \pm 0.08$ y $B-V = 0.63 \pm 0.10$.

Con estos valores, representamos la posición de Interamnia nel espaciu V-R / B-V [4] (Fig. 9).

8. <http://www.astrosurf.com/orodeno/fotodif/>

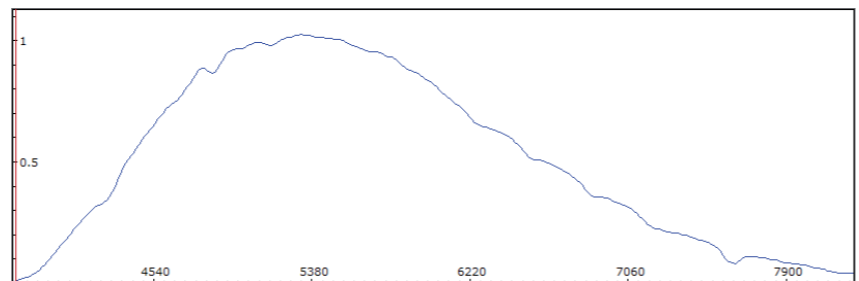
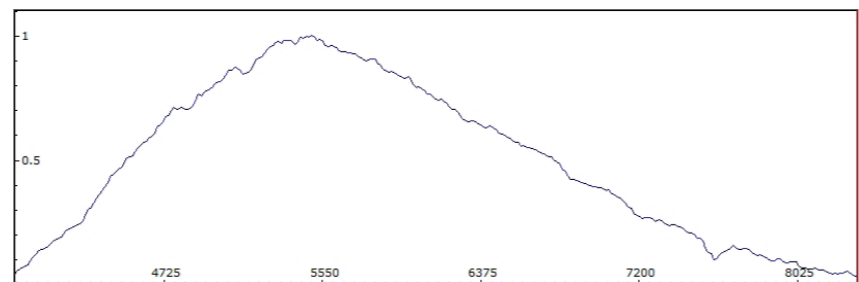
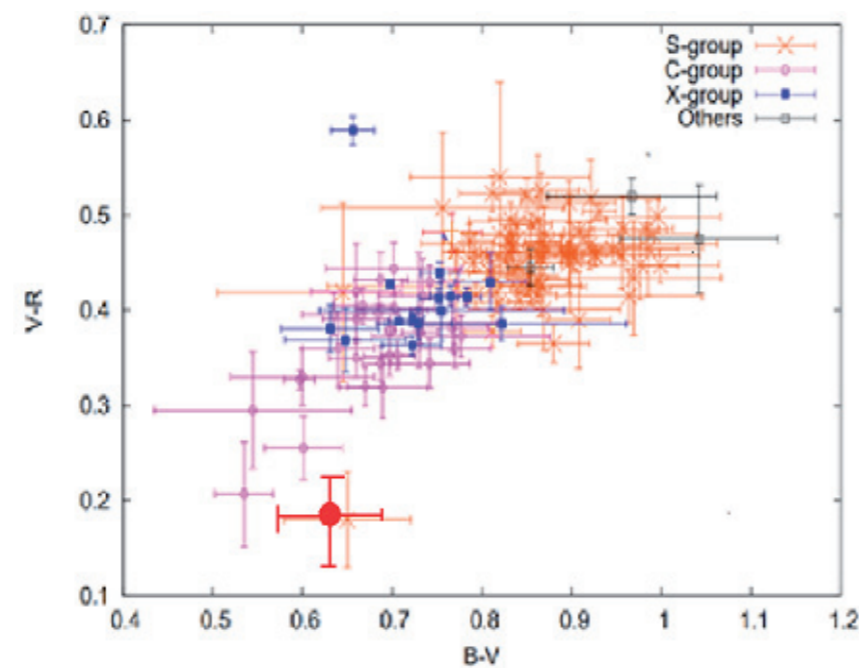
Una inspección visual ya apunta a qu'Interamnia pertenez al grupu c de Tholen. Esto verificase cuantitativamente calculando la distancia a una serie d'asteroides de diferentes tipos de Tholen con índices de color conocidos [5]. Escogéronse dellos asteroides de cada tipu espectral (c, s y x) y calculóse la norma mínima con respeto a Interamnia, sacando'l valor mínimu pal tipu espectral c.

3.2. Espectroscópica

Pa la caracterización espectroscópica del asteroide Dembowska, procedióse a l'adquisición d'imágenes del so espectru llográu per aciu de la rede de difracción Star Analyser. Nestes imágenes apaecen superpuestos los diferentes órdenes del espectru, de mou que la rexón azul del segundu orde superpónse a la rexón infrarroja del primer orde y asina de mou sucesivu.

Esta superposición implica que con una toma *clear* (ensin filtros) nun ye posible observar la parte infrarroja del primer orde (el más brillante y d'interés), de gran relevancia pa determinar la taxonomía del asteroide, darréu que s'alcuentra entemecida cola rexón azul del segundu orde. Pa iguar esti problema, amás de les tomes *clear*, de les que se sacará la información del espectru hasta una llongitud d'onda de 750 nm (non afectada de la superposición) fadránse tomes con un filtru infrarrojo que namás dexa'l pasu de llongitúes d'onda superiores a 750 nm, evitando d'esta miente'l pasu de fotones más azules que contaminen la zona infrarroja del primer orde.

En teniéndose les diferentes tomes *clear* ya infrarroxos del espectru del asteroide, calíbrense y apilen pa tener tomes promediu *clear* (con información del espectru hasta 750 nm) ya infrarroja (con información de 750 nm en delante, cortando en 830 nm por cuenta



ARRIBA

Figura 9. Espaciu V-R / B-V. El puntu coloráu gordu representa l'asitiamentu del asteroide Interamnia

Figura 10. Espectru de reflexión de Dembowska

Figura 11. Espectru de la estrella HIP 51574

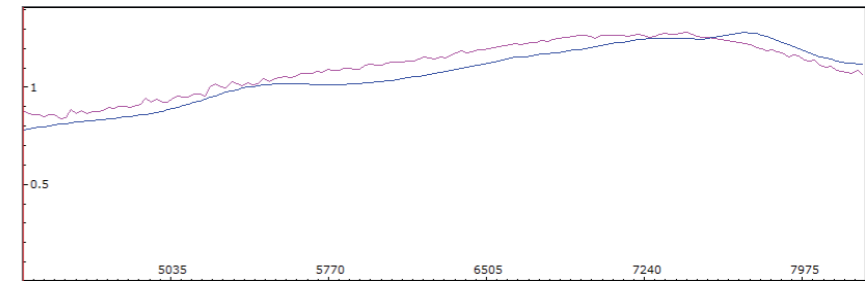
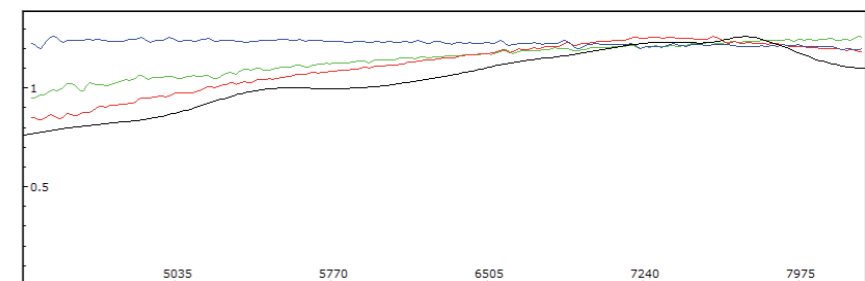
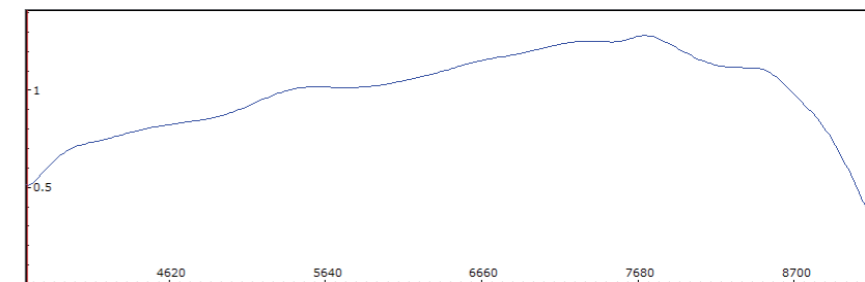
la cayida de sensibilidad del sensor CCD). Darréu, usando'l software *Visual Spec*⁹, los espectros calíbrense en llongitud d'onda y axúntense, llográndose l'espectru de reflexión del asteroide (Fig. 10).

La determinación del tipu de Tholen del asteroide faise calculando'l fluxu relativu del espectru en cada llongitud d'onda respective al fluxu del Sol. Pa calcular esi fluxu relativu ha adquirise un espectru d'una estrella análoga solar. El Sol ye una estrella de tipu G2V, polo que la nuesa estrella análoga solar ha de ser tamién d'esta mena. Nesti casu emplegóse la estrella HIP 51574, lo suficientemente brillante y próxima a les coordenaes de Dembowska nel tiempu de les observaciones (Fig. 11).

La determinación del tipu espectral faise estudiando'l llamáu espectru de relación del asteroide (Fig. 12). Esti ye'l resultáu de la división de los espectros del asteroide y de la estrella análoga solar, previu suavizáu d'estos pa desanicar les llinies d'absorción y telúriques presentes nellos.

Una y bones que s'obtuvo l'espectru de relación, la taxonomía infierse comparando esti espectru col d'asteroides prototipu de los diferentes grupos. En particular, la comparanza fíxose con (24) *Themis* del grupu c, (27) *Euterpe* del grupu s y (16) *Psyche* del grupu x.

Na Figura 13 representase l'espectru de relación algamáu nel nuesu estudiu pa Dembowska colos espectros consiguios pol proyeutu SMAS (Small Main – Belt Asteroid Spectroscopic Survey, [6]) pa Themis, Euterpe y Psyche. Una inspección visual ya indica que la tipoloxía ye la d'Euterpe (tipu s), lo que se pue



ARRIBA

Figura 12. Espectru de relación de Dembowska

Figura 13. Perfiles de los espectros de Dembowska (negro), Themis (azul), Euterpe (rojo) y Psyche (verde)

Figura 14. Azul: perfil del espectru de Dembowska llográu. Rosa: espectru de Dembowska llográu pol proyeutu SMAS

9. <http://astrosurf.com/vdesnoux/>

cuantificar estimando l'error cuadráticu mediu ente l'espectru de Dembowska y el de caún de los asteroides prototipu, siendo esti mínimu (0.03804, 2.97%) pa Euterpe.

Dientro del grupu s tán presentes dellos subgrupos d'asteroides polo que, col envís de determinar con mayor precisión la tipoloxía de Dembowska, comparóse'l so espectru col espectru d'un asteroide de tipu A, (289) *Nenetta*, un asteroide de tipu V, (4) *Vesta*, y un asteroide de tipu R, (2371) *Dimitrov* (espectros tamién sacaos del survey SMASS). Nesti casu obtiense que *Dimitrov* ye l'asteroide con espectru de rrellación más cercanu a Dembowska, concluyendo que la so tipoloxía de Tholen ye la R.

Na Figura 14 compárase'l perfil del espectru de Dembowska col llográu pol proyeutu SMASS.

4. DISCUTINIU Y CONCLUSIONES

Nesti estudiu concluyimos per aciú del métodu fotométricu qu'Interamnia pertenez a la tipoloxía C de Tholen, mientras que'l métodu espectroscópicu da una tipoloxía R pa Dembowska. ¿Qué información mineralóxica pue sacase a partir d'estos resultaos?

Los asteroides del grupu C (carbonáceos) al que pertenez Interamnia carauterícense por una banda d'absorción centrada en 0,7 μm qu'algama fondures del 5% baxo'l continuu. Esta carauterística espectral atribúise a filosilicatos productu de procesos d'alteración acuosa. Tamién tán presentes bandes más débiles, cen-

traes en 0.43 μm [7] y a 0.60-0.65 μm y 0.80-0.90 μm [8], que tán asociaes cola posible presencia d'óxidos de fierro nel so interior, resultáu de l'alteración d'anhidridos de silicatu. Amás del fierro, l'análisis espectral eshaustivu d'asteroides de tipu s revela la presencia d'amoniu, nitróxenu y hidróxenu.

Per otru llau, los asteroides del tipu s como Dembowska carauterícense por tener dos bandes d'absorción centraes en 0.60 y 0.67 μm . La banda de 0.60 μm atribúise a la existencia del compuestu metálicu Fe-Ni na superficie del asteroide, mientras que la centrada en 0.67 μm ta rrellacionada con minerales del grupu espinela.

Nesti estudiu nun se foi a algamar l'espectru de reflexón del asteroide nuna llonxítu d'onda superior a 0.83 μm pero estudios anteriores concluyeron que los asteroides de tipu s presenten una banda d'absorción de 0.9 a 1.0 μm atribuyida a certes combinaciones d'ortopiroxenu, clinopiroxenu y olivín de diversos conteníos de Mg, Fe y Ca, qu'han tar presentes tamién na superficie d'estos asteroides.

Con esti estudiu queda patente como, con medios modestos y dende tierra, ye posible facer una carauterización preliminar d'asteroides que sirva como orientación pa futuros programes d'observación qu'estudien estos con mayor detalle y concluyan el so interés d'esplotación, acercando más la llegada de la minería espacial.

Referencies bibliográfiques

- [1] T. D.J., Asteroid taxonomy from cluster analysis of photometry, 1984.
- [2] R. M. S. M. F. v. D. S. e. a. Cutri, «The Two Micron All Sky Survey (2MASS),» 2003.
- [3] N. F. C. T. G. T. M. e. a. Zacharias, «The Fourth US Naval Observatory CCD Astrograph Catalog (UCAC4),» *The Astronomical Journal*, 2013.
- [4] C.-H. L. *et al.*, «Detection of large color variation in the potentially hazardous asteroid (297274) 1996 SK,» *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2014.
- [5] J. Piironen, «Physical studies of asteroids. XXXII. Rotation periods and UBVRI-colours for selected asteroids,» *A&A*, 1998.
- [6] S. B. R. P. B. T. H. a. B. S. J. Xu, «Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey: Initial Results,» *Icarus*, 1995.
- [7] F. Vilas, S. M. Larson, E. C. Hatch y K. S. Jarvis, «CCD Reflectance Spectra of Selected Asteroids. II. Low-Albedo Asteroid Spectra and Data Extraction Techniques,» de *Icarus*, ElServier, 1993, pp. 67-78.
- [8] F. Vilas, K. S. Jarvis y M. J. Gaffey, «Iron Alteration Minerals in the Visible and Near-Infrared Spectra of Low-Albedo Asteroids,» de *Icarus*, ElSevier, 1994, pp. 274-283.