



Los satélites pequeños de Saturno: origen y craterización

N.L. Rossignoli¹, R.P. Di Sisto^{1,2} & M. Zanardi¹

¹ Instituto de Astrofísica de La Plata, CONICET-UNLP, Argentina

² Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, UNLP, Argentina

Contacto / nrossignoli@fcaglp.unlp.edu.ar

Resumen / En este trabajo estudiamos el proceso de craterización en los satélites pequeños de Saturno debido a objetos Centauros. Modelamos la producción de cráteres en sus superficies considerando dos índices para la distribución diferencial de tamaños de los Centauros pequeños y obtenemos que la distribución de cráteres correspondiente al índice $s_2 = 3.5$ se ajusta mejor a las observaciones realizadas por las misiones Voyager y Cassini. En los casos de disrupción de satélites debido a una colisión catastrófica, encontramos que entre este grupo de satélites pequeños, los más grandes podrían ser primordiales, mientras que los más pequeños no podrían haber sobrevivido a las colisiones producidas por Centauros en la configuración actual del Sistema Solar.

Abstract / We study the cratering process by Centaur objects on Saturn's small satellites. We model the crater production on their surfaces considering two indexes of the differential size distribution of Centaurs for small sizes and find that the crater counts corresponding to the $s_2 = 3.5$ index fit better the observations made by the Voyager and Cassini missions. In the cases of satellite disruption due to a catastrophic collision, we find that among this group of "small satellites", the largest ones may be primordial, while the smallest ones could not have survived the collisions by Centaurs in the present configuration of the Solar System.

Keywords / Kuiper belt: general — Planets and satellites: individual: Saturn — Planets and satellites: surfaces

1. Introducción

En nuestro Sistema Solar existen numerosas evidencias de actividad colisional presentes tanto en los planetas como en los satélites y pequeños cuerpos. Los planetas exteriores han sido estudiados por varias misiones espaciales en los últimos años. Recientemente, la misión *Cassini-Huygens* exploró el sistema de satélites de Saturno obteniendo numerosos resultados y observaciones con gran resolución de los cráteres en las superficies de los mismos (Thomas et al., 2013).

Se piensa que los cráteres en los satélites de los planetas gigantes se podrían haber formado por impactores heliocéntricos y/o planetocéntricos. Este último grupo lo constituirían objetos en órbita alrededor del planeta del tamaño de al menos decenas de metros, como para provocar cráteres observables. Sin embargo, no se ha observado tal fuente y hasta el momento no es posible cuantificarla. La principal fuente heliocéntrica de cráteres serían los objetos Centauros provenientes del Disco Dispersado (SD) en la Región Transneptuniana, ya que son los pequeños cuerpos que cruzan las órbitas de los planetas gigantes.

En base a simulaciones numéricas previas, Di Sisto & Brunini (2011) desarrollaron un modelo de craterización que fue aplicado al satélite de Saturno Phoebe, asumiendo como fuente principal los Centauros del SD. En este trabajo, aplicamos dicho modelo a los satélites pequeños de Saturno y lo contrastamos con las observaciones disponibles, para obtener así restricciones sobre el origen y evolución de cada uno de estos cuerpos.

Los satélites pequeños de Saturno

Los satélites pequeños de Saturno presentan una gran variedad de formas y tamaños, con radios que oscilan entre los 300 m y los 135 km. En general son cuerpos de alta porosidad y baja densidad, aproximadamente la mitad de la del agua (Thomas et al., 2013). Sus parámetros físicos y dinámicos se muestran en la Tabla 1.

La mayoría de estos satélites están fuertemente relacionados con el sistema de anillos de Saturno. Pan, Daphnis y Atlas están vinculados al anillo A; Prometheus y Pandora orbitan dentro y fuera del anillo F respectivamente; Janus y Epimetheus son satélites coorbitales; entre ellos y Enceladus se encuentran los muy pequeños Aegaeon, Methone, Anthe y Pallene embebidos en "arcos de escombros"; Telesto y Calypso son Troyanos de Tethys y Helene y Polydeuces, Troyanos de Dione; y el más grande del grupo es Hyperion.

La misión Cassini obtuvo numerosas observaciones de estos cuerpos, descubriendo características físicas y dinámicas nunca antes vistas en el Sistema Solar. En los casos en los que se obtuvieron imágenes con gran resolución, se develaron detalles sorprendentes de sus superficies, motivando numerosos estudios sobre los procesos físicos y químicos que ocurren en estos objetos y su relación con su entorno dinámico.

2. Métodos

Para estudiar la producción teórica de cráteres es necesario caracterizar la población impactora. Consideramos como fuente principal los Centauros provenientes del SD, y seguimos el modelo de Di Sisto & Brunini

(2011). De esta manera, la distribución acumulada de tamaños (CSD) de la población impactora estará dada por:

$$N(> d) = C_0 \left(\frac{1 \text{ km}}{d} \right)^{s_2 - 1} \quad \text{para } d \leq 60 \text{ km},$$

$$N(> d) = 3.5 \times 10^5 \left(\frac{100 \text{ km}}{d} \right)^{s_1 - 1} \quad \text{para } d > 60 \text{ km}, \quad (1)$$

donde $C_0 = 3.5 \times 10^5 \times 100^{s_1 - 1} \times (60)^{s_2 - s_1}$. Consideramos un quiebre en la CSD en $d = 60 \text{ km}$, siendo $s_1 = 4.7$ el índice de la distribución diferencial para $d > 60 \text{ km}$ y 2 posibles valores para s_2 : 2.5 y 3.5 (ver Di Sisto & Brunini (2011) para un análisis detallado).

Calculamos el número de colisiones sobre cada satélite con el método de Di Sisto & Brunini (2011) y Di Sisto & Zanardi (2013). Estos autores usan los archivos de encuentros de Centauros con Saturno y mediante la aproximación de partícula en una caja, calculan el número de colisiones entre Centauros y satélites. De esta manera, el número acumulado de colisiones sobre cada satélite en función de la CSD de los impactores es:

$$N_c(> d) = \frac{v_i R_G^2}{v(R_H) R_H^2} 10.257 N(> d), \quad (2)$$

donde v_i es la velocidad de colisión relativa sobre cada satélite, $v(R_H)$ es la velocidad media de encuentro de los Centauros al entrar a la esfera de Hill (de radio R_H) de Saturno y R_G es el radio gravitacional del satélite dado por: $R_G = R_s(1 + (v_{esc}/v(R_H))^2)^{1/2}$.

Para obtener la producción de cráteres usamos la ley de escala de Holsapple & Housen (2007) que da el diámetro D_t del cráter generado por un impactor de diámetro d dada por:

$$D_t = K_1 d \left[\left(\frac{gd}{2v_i^2} \right) \left(\frac{\rho_t}{\rho_i} \right)^{\frac{2\nu}{\mu}} + K_2 \left(\frac{Y}{\rho_t v_i^2} \right)^{\frac{2+\mu}{2}} \left(\frac{\rho_t}{\rho_i} \right)^{\frac{\nu(2+\mu)}{\mu}} \right]^{-\frac{\mu}{2+\mu}}, \quad (3)$$

donde $\mu = 0.38$, $\nu = 0.397$, $K_1 = 1.67$, $K_2 = 0.351$ y el coeficiente de cohesión es $Y = 1.5 \times 10^5 \text{ dyn/cm}^2$ (Di Sisto & Zanardi, 2013). El primer término en la Ec. 3 refiere a la importancia de la gravedad del blanco (régimen gravitatorio) y el segundo a la importancia de la fuerza de cohesión del mismo (régimen de cohesión). Al igualar ambos términos se obtiene el diámetro de transición entre ambos regímenes (D_1 , d_1).

Algunos de los satélites estudiados son muy pequeños, por lo cual estudiamos los casos en los que una colisión catastrófica puede producir su ruptura. Para ello nos basamos en el trabajo de Benz & Asphaug (1999) donde, mediante experimentos de laboratorio, los autores encuentran una expresión analítica para la energía cinética de la colisión por unidad de masa para un evento dispersivo dada por:

$$Q_D^* = Q_0 \left(\frac{R_s}{1 \text{ cm}} \right)^\alpha + B \rho \left(\frac{R_s}{1 \text{ cm}} \right)^\beta, \quad (4)$$

donde R_s es el radio en cm y ρ la densidad del blanco en g/cm^3 . Q_0 , B , α y β son constantes que para el hielo

valen: $Q_0 = 1.6 \times 10^7 \text{ erg/g}$, $B = 1.2 \text{ erg.cm}^3/\text{g}^2$, $\alpha = -0.39$ y $\beta = 1.26$.

Q_D^* es la energía específica requerida para dispersar los fragmentos de la colisión considerando reacumulación y dejando el mayor fragmento con masa igual a la mitad de la masa del blanco. Igualando esta expresión a la energía cinética de la colisión por unidad de masa dada por $Q = \frac{1}{2} \left(\frac{M_p}{M_s + M_p} \right) v_i^2$, es posible obtener el radio del proyectil que fragmenta catastróficamente el blanco:

$$R_p = \left[\frac{6Q_D^* M_s}{4\pi \rho_p (v_i^2 - 2Q_D^*)} \right]^{\frac{1}{3}}. \quad (5)$$

Para los satélites que sufren una o más colisiones catastróficas, es posible calcular sus edades siguiendo los lineamientos del trabajo de Di Sisto & Zanardi (2016) (Eq. 5), donde las autoras encuentran que el número acumulado de cráteres en función del tiempo es:

$$N_c(> D, t) = F(t) N_c(> D), \quad (6)$$

donde $N_c(> D)$ es el número total de cráteres con diámetros mayores a D producidos a lo largo de la edad del Sistema Solar (que se obtiene de las Ec. 2 y 3) y $F(t) = a \ln t + b$, con $a = 0.198406 \pm 0.0002257$ y $b = -3.41872 \pm 0.004477$. Así, si $d_{rup} = 2R_p$, la última colisión que fragmentó catastróficamente el satélite se producirá a un tiempo t que puede obtenerse de la condición $N_c(> D_{rup}, t_f) - N_c(> D_{rup}, t) = 1$, donde D_{rup} es el diámetro del cráter correspondiente a un impactor de diámetro d_{rup} . De esta forma, la edad del satélite, es decir el lapso de tiempo desde su formación al presente está dada por:

$$\tau = t_f - t = t_f \left[1 - e^{-\frac{1}{a N_c(> D_{rup})}} \right], \quad (7)$$

donde $t_f = 4.5 \text{ Gyr}$ es la edad del Sistema Solar.

3. Resultados y conclusiones

Siguiendo el método descrito, calculamos la producción de cráteres en los satélites pequeños durante la edad del Sistema Solar por objetos Centauros. Nuestros resultados se muestran en la Fig. 1 para los dos valores del índice de distribución del tamaño de los impactores ($s_2 = 2.5$ y $s_2 = 3.5$). Para analizar y comparar nuestros resultados teóricos, utilizamos los conteos de cráteres disponibles en la literatura, fundamentalmente de Thomas et al. (2013), Hirata et al. (2014) y Plescia & Boyce (1985). En general y a pesar de que cada pequeño satélite tiene un ambiente peculiar, encontramos que la distribución de tamaños de la población impactora con $s_2 = 3.5$ es la más consistente con las observaciones. Por lo tanto, el análisis de los resultados corresponde a este caso.

Se calcularon el tamaño del impactor (d_m) que produce el cráter más grande (D_m) y el diámetro del cráter de transición entre los regímenes gravitatorio y de cohesión (D_l), presentados en la Tabla 1. Algunos de estos satélites son muy pequeños; es el caso de Pan, Daphnis, Atlas, Aegaeon, Methone, Anthe, Pallene, Calypso y Polydeuces. Encontramos que estos satélites sufren una o más colisiones catastróficas durante la edad del Sistema Solar.

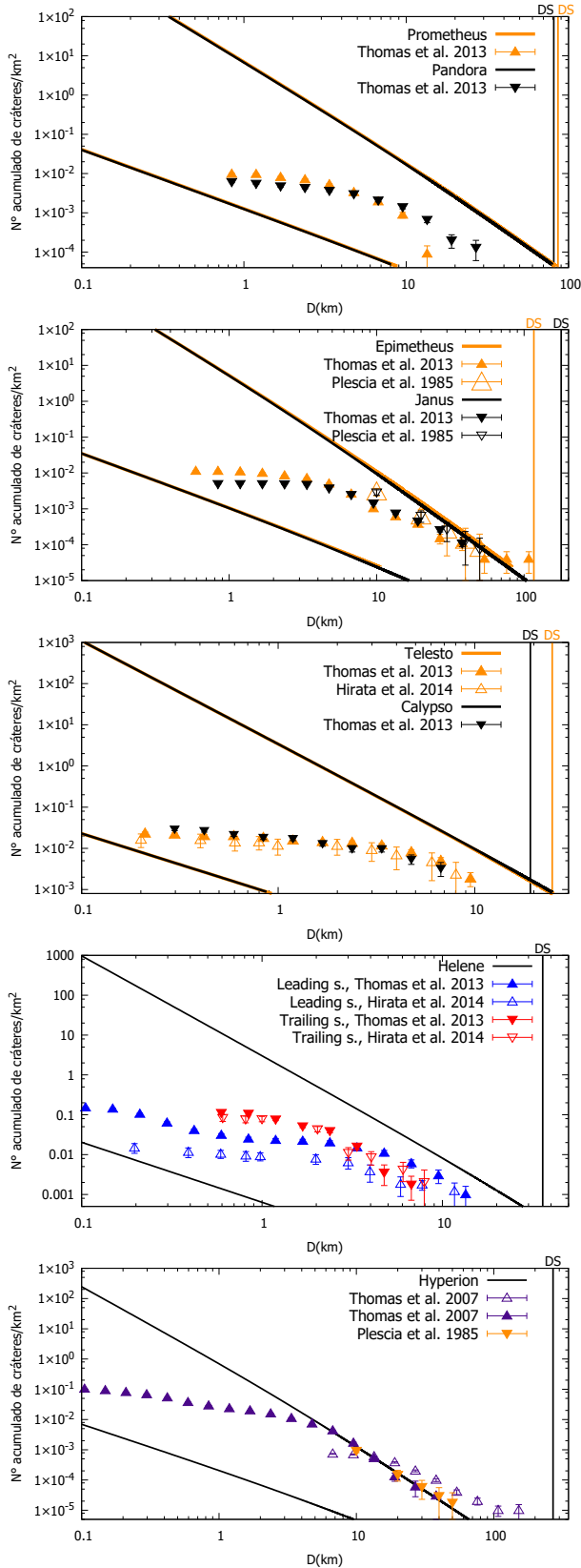


Figura 1: Número acumulado de cráteres por km^2 vs D . Las líneas continuas corresponden a nuestro modelo para $s_2=3.5$ (superior) y $s_2=2.5$ (inferior). Los puntos representan las observaciones citadas en cada figura. Los diámetros de cada satélite “DS” se indican con líneas verticales.

En consecuencia, calculamos el diámetro del impactor que fragmentó el satélite y luego la edad del mismo (ver Tabla 1). Posiblemente, estos satélites se formaron después de la formación planetaria y de sus satélites regulares. Esto implicaría la existencia de material disponible a partir del cual estos satélites se puedan haber formado recientemente. De hecho, Charnoz et al. (2010) estudian la formación de las lunas pequeñas más allá del límite de Roche a partir del material de los anillos. Se puede observar que las edades dependen tanto del tamaño del satélite (cuanto más pequeño, más joven) como del grupo al que pertenecen, siendo los más jóvenes los asociados a arcos.

Cada grupo de satélites es particular, tanto sus características como su entorno y por tanto cada caso es diferente. Sin embargo, en general podemos observar de la Fig. 1 que la distribución observada de cráteres se hace más plana y se desvía de la curva teórica para diámetros de cráteres pequeños. Esta desviación podría deberse a una combinación de procesos de erosión de cráteres por partículas de los anillos y/o saturación, dependiendo de la posición del satélite y las características de su entorno.

Tabla 1: Radio medio del satélite R_s [km], densidad media del satélite ρ [Kg/m^3], diámetro del cráter de transición D_l [km], diámetro del impactor más grande d_m [km] y del cráter más grande D_m [km] considerando $s_2=3.5$. En los casos de ruptura catastrófica, figuran el diámetro del impactor d_{rup} [km] y la edad del satélite τ [10^9 años].

Satélite	R_s	ρ	a	D_l	d_m	D_m	d_{rup}	τ
Pan	14.0	430	133584	25.7	0.55	45.9	0.4	4.04
Daphnis	3.8	340	136504	153.8	0.06	5.9	0.06	0.9
Atlas	15.1	460	137670	20.9	0.58	46.5	0.47	4.27
Prometheus	43.1	470	139380	6.9	1.33	83.7	-	-
Pandora	40.6	490	141720	6.8	1.26	79.2	-	-
Epimetheus	58.2	640	151410	2.8	1.66	82.6	-	-
Janus	89.2	630	151460	1.9	2.34	103.7	-	-
Aegaeon	0.33	540	167425	938	0.03	2.3	0.003	0.12
Methone	1.45	310	194440	210	0.08	7.8	0.01	0.32
Anthe	0.5	500	197700	93	0.03	3.0	0.005	0.19
Pallene	2.23	250	212280	168	0.11	11.1	0.02	0.43
Telesto	12.4	500	294710	12.6	0.42	29.2	-	-
Calypso	9.6	500	294710	16.3	0.35	24.8	0.33	4.45
Polydeuces	1.3	500	377200	209	0.07	5.1	0.02	1.03
Helene	18.0	400	377420	10.9	0.55	36.0	-	-
Hyperion	135.5	544	1500933	1.7	2.14	68.9	-	-

Agradecimientos: A Naoyuki Hirata y Peter C. Thomas por proveer datos observacionales y aportar comentarios que ayudaron a mejorar el trabajo, y al COL y COC de la Reunión Binacional Sochias-AAA por su invitación a presentar este informe.

Referencias

- Benz W., Asphaug E., 1999, *Icarus*, 142, 5
 Charnoz S., Salmon J., Crida A., 2010, *Nature*, 465, 752
 Di Sisto R.P., Brunini A., 2011, *A&A*, 534, A68
 Di Sisto R.P., Zanardi M., 2013, *A&A*, 553, A79
 Di Sisto R.P., Zanardi M., 2016, *Icarus*, 264, 90
 Hirata N., Miyamoto H., Showman A.P., 2014, *Geophys. Res. Lett.*, 41, 4135
 Holsapple K.A., Housen K.R., 2007, *Icarus*, 187, 345
 Plescia J.B., Boyce J.M., 1985, *J. Geophys. Res.*, 90, 2029
 Thomas P.C., et al., 2013, *Icarus*, 226, 999