

# Distribución superficial de impactos en Iapetus originada por el remanente de una colisión

F.A. Zoppetti<sup>1</sup>, A.M. Leiva<sup>1</sup> & C.B. Briozzo<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Observatorio Astronómico de Córdoba (OAC-UNC)

<sup>2</sup> Facultad de Matemática, Astronomía y Física (FaMAF-UNC)

Contacto/ FAZ: federicozoppetti@gmail.com

**Resumen** / Mediante el Problema Circular de Tres Cuerpos Restringido Saturno–Iapetus se analizan posibles distribuciones de impactos sobre la superficie de Iapetus, originadas a partir de considerar una población de baja energía generada como remanente de un evento colisional, ocurrido en el pasado sobre la superficie de este satélite. Los resultados se analizan con el objetivo de aportar un nuevo enfoque para explicar el origen de la dicotomía de albedo que se observa sobre Iapetus.

**Abstract** / By means of Circular Restricted Three Body Problem Saturn–Iapetus, we analyze potential impact distributions on the surface of Iapetus, originated from considering a low-energy population generated as remnants of a collisional event occurred in the past on the surface of this satellite. The results are analyzed in order to offer a new approach to explain the origin of the albedo dichotomy observed on Iapetus.

**Keywords** / planets and satellites: individual (Iapetus) — planets and satellites: surfaces

## 1. Introducción

Iapetus es un satélite natural de Saturno que se encuentra en rotación sincrónica. La peculiar dicotomía de albedo superficial que éste presenta ha sido un tema muy controversial desde que dicho satélite fuera descubierto en 1671. El hemisferio trasero de Iapetus (opuesto al ápex de movimiento, considerando su traslación orbital), presenta las características superficiales típicas de un satélite helado, con un albedo de  $\sim 0.5$ . En cambio, el hemisferio delantero (en dirección al ápex de movimiento), es prácticamente oscuro con valores de albedo de  $\sim 0.04$ . La región oscura sobre este hemisferio se denomina *Región Cassini* y presenta algunas características muy particulares, entre las que se destacan su particular morfología, su frontera notablemente abrupta y el hecho de estar centrada en dirección del ápex de movimiento.

Una gran diversidad de mecanismos han sido propuestos para explicar la dicotomía de albedo pero ninguno ofrece una explicación completa. El modelo actualmente más aceptado es el de Spencer & Denk (2010), donde se propone que el patrón de albedo observado actualmente es el resultado de la *segregación térmica global*, un mecanismo complejo de migración y re-depósito del hielo superficial que sería particularmente efectivo en Iapetus. Sin embargo, para que este mecanismo actúe, es necesario asumir una dicotomía inicial de albedo, cuyo origen no se discute en dicho trabajo. Más recientemente, con un enfoque puramente dinámico, Leiva & Briozzo (2013) estudiaron las distribuciones de colisiones sobre Iapetus originadas por trayectorias de baja energía en el Problema Circular de Tres Cuerpos Restringido Saturno-Iapetus-partícula

(PC3CR). Estos impactos presentan una distribución espacial con características similares a las condiciones iniciales asumidas por Spencer & Denk (2010) pero, como contraparte, las partículas deberían provenir de una población prácticamente co-orbital con Iapetus, lo cual parece improbable.

Sin embargo, tomando como punto de partida grandes cráteres de algunos satélites de Saturno e implementando modelos de eyección para generar las condiciones iniciales, Alvarellos et al. (2005) realizan un estudio numérico de la evolución dinámica de material eyectado desde la superficie después de ocurrida una fuerte colisión. Ellos encuentran que el material eyectado que logra escapar genera una población de baja energía prácticamente co-orbital al satélite analizado, la cual, en la mayor parte de los casos, re-impacta sobre el satélite fuente en algunos cientos de años.

Estos resultados permiten suponer que la dicotomía inicial que desencadenó los procesos de segregación térmica en Iapetus pudo, en parte, haber sido originada como acreción de este tipo de poblaciones de baja energía. Esta hipótesis es además reforzada por la presencia de varias estructuras de impacto mayores sobre la superficie del satélite (ver Figura 1).

En este trabajo, con el objetivo de evaluar el rol que pudo haber jugado este tipo de acreción en la formación del patrón de albedo sobre Iapetus, se presentan resultados preliminares que se obtienen de realizar un estudio dinámico del material eyectado desde uno de estos cráteres, haciendo énfasis en distribuciones que originan las trayectorias que re-impactan con el satélite luego de ser eyectadas.

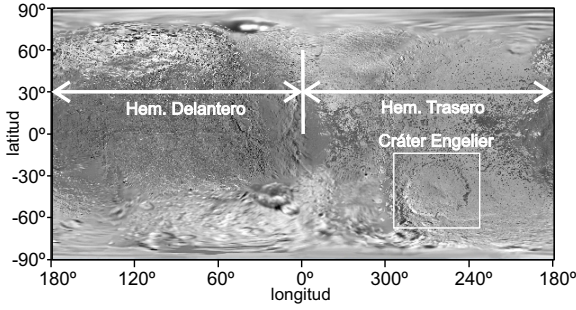


Fig. 1: Superficie de Iapetus (2008). Crédito de la imagen: NASA/JPL/SpaceScienceInstitute(imagen PIA11116).

## 2. Eyecciones a partir de un gran impacto

Un cráter de impacto es una estructura que resulta de la colisión de un proyectil cósmico con la superficie de algún cuerpo celeste. Inmediatamente después de ocurrido el impacto, se genera una onda de choque que interactúa fuertemente con el material, produciendo la excavación y posterior eyección de una cantidad importante de material hacia el exterior de la cavidad. Así, rápidamente se constituirá la cavidad principal conocida como *cráter transitorio* el cual, principalmente por acción de la gravedad, cambiará lentamente (escalas geológicas de tiempo) hasta alcanzar el *estado final*.

Como es de esperar, el tamaño y la velocidad de las partículas eyectadas dependen principalmente de las características particulares del impacto y, además, de la composición y estructura del material en el lugar del evento.

Cuando los detalles del impacto son secundarios (aproximación de campo lejano) y se asume que la superficie es poco compacta, de tal manera que la resistencia propia del material sea despreciable frente a la gravedad (modelo de escombros), la velocidad de eyección puede determinarse según (Housen et al. (1983))

$$V_e(x) = 0.62 (g R_t)^{0.5} \left( \frac{\rho_i}{\rho_t} \right)^{0.2} \left( \frac{x}{R_t} \right)^{-1.77} \quad (1)$$

donde  $g$  y  $\rho_t$  son la gravedad superficial y la densidad del satélite,  $R_t$  es el radio del cráter transitorio,  $\rho_i$  es la densidad del objeto impactor y  $x$  es la distancia sobre la superficie donde ocurre la eyección desde el centro del impacto.

Por otra parte, en la literatura, es posible encontrar ajustes empíricos de algunos parámetros del impacto que resultan de interés, en función de las características del cráter final (cráter observado), obtenidos en base a simulaciones numéricas o experimentos de laboratorio. En este sentido, Zahnle et al. (2003) derivan las siguientes expresiones para el diámetro del cráter transitorio  $D_t$  en función del tamaño del objeto impactor  $d$  y su relación con el diámetro del cráter final  $D_f$  cuando se analizan estructuras mayores a 15 km:

$$D_t = 1.1 \left( \frac{U^2}{g} \right)^{0.217} \left( \frac{\rho_i \cos(\psi)}{\rho_t} \right)^{0.333} d^{0.783}; \quad (2)$$

$$D_f = 0.7 D_t^{1.13} \quad (3)$$

donde  $\psi$  es la dirección del impacto respecto de la vertical local y  $U$  la velocidad heliocéntrica del impactor en el momento de la colisión. A partir de analizar numéricamente la dinámica de gran cantidad de cometas eclípticas, estos autores además derivan una expresión para dicha velocidad:

$$U = \sqrt{3} V_{orb} (1 + 0.9 \cos(\beta))^{0.35} \quad (4)$$

donde  $V_{orb}$  es la velocidad orbital de Iapetus y  $\beta$  es la distancia angular del impacto al ápex de movimiento.

## 3. Integraciones numéricas

Para simular la eyección producida por un gran impacto se escogió el cráter Engelier cuyo centro se encuentra a una latitud  $\delta = -40.5^\circ$  y una longitud  $\lambda = 264.7^\circ$  \* (Fig. 1). Se trata de un cráter complejo con su típica forma de *plato*, además de las fronteras escalonadas y la elevación central, con un diámetro  $D_f \simeq 504$  km. Siguiendo los lineamientos presentados por Alvarellos et al. (2005), se asumió para la densidad superficial de Iapetus el valor de  $\rho_t = 0.9$  g/cm<sup>3</sup> consistente con los valores comunmente utilizados para los satélites helados Mimas, Tethys y Rhea. Para el impactor se adoptó el valor  $\rho_i = 1.638$  g/cm<sup>3</sup> correspondiente al valor estimado para el satélite irregular Phoebe, el cual presenta disrupciones y se encuentra en una órbita retrógrada externa, por lo que constituye una fuente *natural* de impactores. Mediante las ecuaciones (2) a (4) y asumiendo un impacto perpendicular a la superficie ( $\psi = 0^\circ$ ), se determinó el diámetro del impactor  $d$  y se construyeron 1000 anillos concéntricos a partir del centro del cráter, desde un valor de radio mínimo  $r_{min} = d/2$  hasta una distancia máxima dada por  $r_{max} = D_t/2$ . El ancho de cada anillo de eyección se computó de manera tal que todos tengan la misma área y, por lo tanto, se eyecte desde cada uno la misma cantidad de material. Para cada radio intermedio de los anillos de eyección se calculó la expresión para la velocidad a partir del modelo de eyección asumido (ec. (1)) y se agregó la velocidad de rotación intrínseca del satélite. Finalmente, cada anillo de eyección fue dividido en 1440 segmentos angulares, lanzando una partícula de cada segmento a  $45^\circ$  respecto de la dirección de la vertical local (Alvarellos et al. (2005)). Para cada una de las 1 440 000 condiciones iniciales se reconstruyó numéricamente la trayectoria bajo el modelo PC3CR Saturno-Iapetus-partícula con una rutina en lenguaje Fortran90 que implementa un integrador de paso variable Burlisch-Stoer de precisión  $10^{-12}$  y, para evoluciones exteriores al sistema (*órbita suaves*), adapta un integrador Runge-Kutta de orden 8 (Press et al. (1992)). Se tuvo especial cuidado en ajustar los pasos de integración cuando las trayectorias se aproximan al satélite de manera tal de poder computar los impactos. En todos los casos las integraciones se realizaron hasta registrar:

- una colisión con Iapetus, asumiendo para el radio del satélite el valor de 735 km.

\*<http://astrogeology.findthebest.com/1/16126/Engelier>

- un extremo acercamiento a Saturno, fijando como cota una distancia de 0.05 unidades sinódicas ( $\sim 178\,000$  km).
- un escape del sistema, considerando las partículas que se alejan a más de 3 unidades sinódicas ( $\sim 10\,682\,500$  km) del centro de masa del sistema.
- una evolución simple durante un tiempo equivalente a 3000 años.

Para determinar los puntos de re-impacto con Iapetus se implementó el método de la bisección con alta precisión.

#### 4. Resultados preliminares y discusión

Un análisis preliminar de la evolución del material eyectado muestra que la mayor parte de las partículas re-impactan con Iapetus rápidamente o quedan orbitando el sistema por más de 3000 años. Siguiendo el enfoque del trabajo de Leiva & Briozzo (2013), para determinar las distribuciones de re-impactos se realizó el recuento de colisiones sobre la superficie utilizando la proyección cartográfica cilíndrica de *Gall-Peters* normalizada, con un ángulo estándar  $\alpha = \pi/4$ , y dividiendo la totalidad del mapa del satélite en 200 celdas de igual área. Mediante esta proyección, la superficie queda representada por el plano cartesiano  $(X_{GP}, Y_{GP})$  que se relaciona con las coordenadas angulares latitud  $\delta$  y longitud  $\lambda$  mediante la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} X_{GP} &= \lambda \cos(\alpha) \\ Y_{GP} &= \sin(\delta) / \cos(\alpha). \end{aligned} \quad (5)$$

Según la evolución de las trayectorias de impacto, se clasificaron las colisiones en tres tipos:

- A: Trayectorias que evolucionaron en una vecindad próxima de Iapetus, sin escapar de su influencia a través de los puntos lagrangeanos  $L1$  y  $L2$ .
- B: Trayectorias que después de cierto tiempo logran alcanzar la zona exterior del sistema a través de  $L2$  para luego re-impactar.
- C: Trayectorias de transferencia entre las masas primarias que no alcanzan la región exterior. Estas trayectorias escapan a través de  $L1$  pero después de un tiempo retornan a una vecindad próxima a Iapetus.

La Figura 2 muestra las distribuciones de impactos obtenidas en cada caso. Se observa una distribución peculiar para las trayectorias tipo A, con un aumento de colisiones en el antípoda del cráter de impacto. Respecto de la trayectorias que en algún momento logran escapar de la influencia de Iapetus (tipos B y C) las distribuciones de colisiones muestran un máximo sobre el hemisferio delantero, característica que se presenta más acentuada para las trayectorias de tipo C. Por otro lado, la mayoría de las trayectorias de colisión se corresponden con valores de energías bajas que coinciden, en parte, con los valores de energías analizados por Leiva & Briozzo (2013). Así, nuestros primeros resultados presentan cierto acuerdo con los publicados por estos autores. Un análisis más riguroso y detallado será realizado en trabajos futuros.

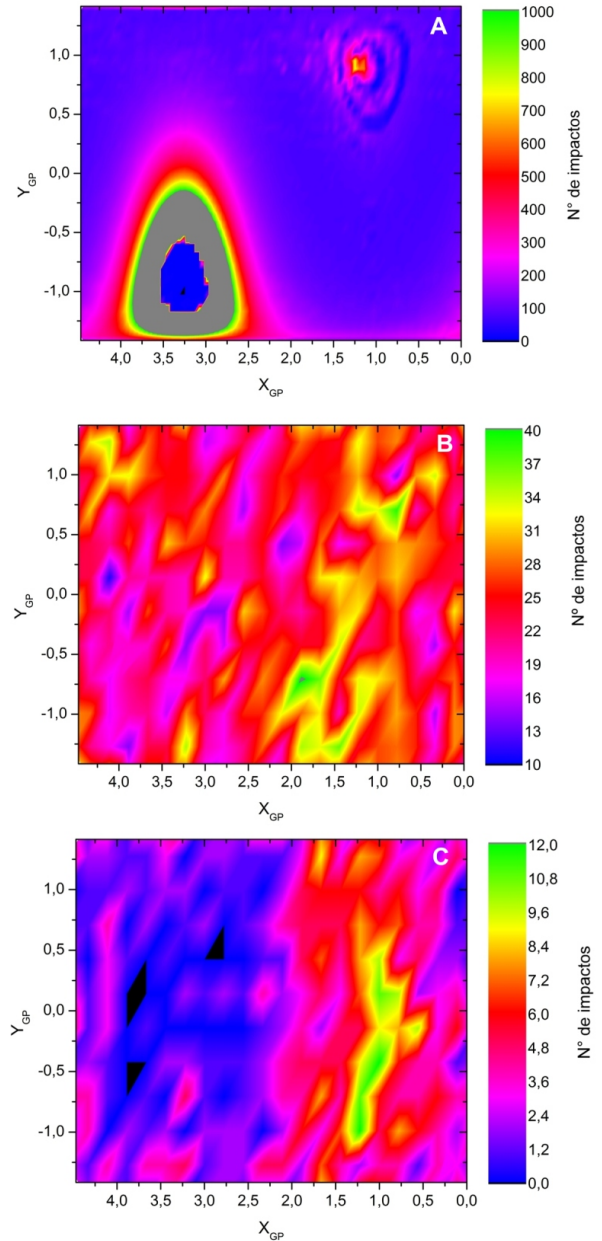


Fig. 2: Distribuciones de re-impactos obtenidas para cada tipo de trayectorias (A, B, C).

*Agradecimientos:* Este trabajo ha sido parcialmente financiado por la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional de Córdoba (Proyecto 05/B351).

#### Referencias

- Alvarellos J. L., et al., 2005, ICARUS, 178, 104  
 Housen K. R., Schmidt R. M., Holsapple K. A., 1983, JGR, 88, 2485  
 Leiva A. M., Briozzo C. B., 2013, MNRAS, 430, 858  
 Press W. H., et al., 1992, Numerical recipes in FORTRAN. The art of scientific computing  
 Spencer J. R., Denk T., 2010, Science, 327, 432  
 Zahnle K., et al., 2003, ICARUS, 163, 263