



# Las poblaciones distantes de cuerpos pequeños del Sistema Solar

R.P. Di Sisto<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, UNLP, Argentina*

<sup>2</sup> *Instituto de Astrofísica de La Plata, CONICET-UNLP, Argentina.*

*Contacto* / romina@fcaglp.unlp.edu.ar

**Resumen** / En los últimos años, el gran avance en la observación astronómica y la exploración espacial ha cambiado lo que conocemos sobre los sistemas planetarios y particularmente sobre nuestro Sistema Solar. El hallazgo de objetos de dimensiones similares o más grandes que Plutón más allá de la órbita de Neptuno, asteroides y objetos binarios, planetas y discos en torno a otras estrellas, son ejemplos de estos cambios. El desarrollo teórico también ha avanzado y se cuenta con nuevas teorías sobre la formación y distribución de los objetos en nuestro Sistema Solar. Se ha logrado observar que la región transneptuniana tiene una estructura que contiene en sí misma rastros dinámicos y físicos del proceso de gestación, formación y evolución del Sistema Solar. Las complejas interacciones de estos objetos con los objetos Centauros, típicos de la zona de los planetas gigantes, y con los cometas son cruciales. En este artículo, presentaremos lo que conocemos sobre las poblaciones de cuerpos pequeños más distantes de nuestro Sistema Solar, los modelos propuestos para explicar la distribución actual observada y su vínculo con los cometas y Centauros.

**Abstract** / In recent years, the great advance in astronomical observation and space exploration has changed our knowledge about planetary systems and particularly about our Solar System. The finding of objects of similar or larger sizes than Pluto, beyond Neptune's orbit, asteroids and binary objects, planets and disks around other stars, are examples of these changes. The theoretical development has also advanced and there are new theories about the formation and distribution of objects in our Solar System. It has been observed that the transneptunian region has a structure that contains dynamic and physical traces of the gestation, formation and evolution processes of the Solar System. The complex interactions of these objects with the Centaur objects, typical of the giant planet zone, and with comets are crucial. In this article, we will present what we know about the populations of distant small bodies of our Solar System, the proposed models to explain the current observed distribution and their link with the comets and Centaurs.

*Keywords* / minor planets, asteroids: general — comets: general — Kuiper belt: general

## 1. Introducción

Hasta hace poco tiempo, sabíamos que nuestro Sistema Solar estaba formado por los cuerpos pequeños como asteroides y cometas y 9 planetas. Sin embargo en los últimos años, el gran avance en la observación astronómica y también el desarrollo de las teorías de formación planetaria, revolucionaron lo que conocíamos.

El descubrimiento de un reservorio de pequeños cuerpos más allá de Neptuno, los objetos transneptunianos por sus siglas en inglés, Transneptunian objects (TNOs), con objetos de tamaño incluso más grandes que Plutón y en particular del grupo de los plutinos con características dinámicas iguales a Plutón, llevaron al replanteo de la definición de Planeta en la Reunión de la *International Astronomical Union* en 2006. Las observaciones en detalles por parte de las misiones espaciales de los planetas, satélites, asteroides y cometas dieron lugar a grandes descubrimientos. Asimismo, la detección de planetas alrededor de otras estrellas (Mayor & Queloz, 1995) y discos de gas y polvo mediante las observaciones de ALMA (e.g. Huang et al., 2018) con estructuras definidas mostraron que existe una gran diversidad de sistemas planetarios en el universo. Todo esto generó replanteos

y nuevos paradigmas y desafíos en las Ciencias Planetarias. En este artículo nos concentraremos en las poblaciones de pequeños cuerpos más distantes de nuestro Sistema Solar. No hay un consenso para la nomenclatura de estos objetos, pero pueden considerarse como aquellos cuyas órbitas están en la zona de los planetas gigantes y/o más allá de Neptuno. Haremos una revisión de cómo emergieron, primero teóricamente y luego cómo su descubrimiento tuvo consecuencias en el replanteo no sólo de la definición de planeta sino de la revisión de las teorías de formación y evolución de todo nuestro Sistema Solar. Luego, analizaremos cómo se vinculan estas poblaciones distantes entre sí y cómo llegan a la zona de los cometas de la familia de Júpiter por sus siglas en inglés, Jupiter Family Comets (JFC) en el Sistema Solar actual.

## 2. Las poblaciones distantes, historia, descubrimiento y definiciones

La idea de la existencia de un planeta masivo más allá de Neptuno data de más de un siglo atrás cuando se argumentaba que Neptuno solo no podía explicar las irre-

gularidades del movimiento de Urano. Percival Lowell (aficionado a la astronomía con una muy buena posición económica) buscó de manera exhaustiva lo que él llamó el planeta X entre 1905 y 1916 sin éxito. En 1929 el observatorio Lowell de Arizona, retomó la búsqueda del Planeta X y como producto, Clyde Tombaugh, descubre Plutón el 18 de febrero de 1930. Tombaugh continuó la búsqueda de otros objetos transneptunianos 13 años más sin éxito. Inmediatamente luego del descubrimiento de Plutón, Leonard (1930) especuló que Plutón era el primero de un grupo de objetos aún no descubiertos que llamó planetas “ultra-Neptunianos” y “ultra-Plutonianos”. Unos años después el astrónomo irlandés Kenneth Essex Edgeworth (1880 - 1972), presentó el primer marco cuantitativo para un cinturón transneptuniano basado en principios cosmogónicos (Edgeworth, 1938). Edgeworth desarrolló la idea de que la formación de los planetas podía entenderse como la consecuencia de la acumulación de numerosos cuerpos pequeños o condensaciones en un disco protoplanetario que se extendía más allá de las órbitas planetarias conocidas. Siguiendo la idea cosmogónica de Kant, Edgeworth notó que debido a la densidad decreciente de la nebulosa y a las menores velocidades de las condensaciones en la región más allá de Neptuno, la tasa de crecimiento de objetos individuales decrece rápidamente a medida que crece la distancia heliocéntrica. Entonces, mientras que en la región planetaria las inestabilidades gravitatorias permitieron la formación de los planetas gigantes, en la zona transneptuniana las densidades eran tan bajas que no permitían la formación planetaria sino de cometas. Estos cometas estarían distribuidos en una región entre 70 y 200 a 300 UA. Luego Edgeworth conjeturó que este reservorio más allá de Neptuno era la fuente de los cometas observados (Edgeworth, 1949).

Independientemente el astrónomo Germano-Americano Gerard P. Kuiper (1905-1973), argumentó que planetesimales de hielo que se formaron más allá de Neptuno no podrían crecer hasta ser cuerpos masivos debido a las grandes escalas de tiempo colisional a esas distancias. Consecuentemente, los planetesimales transneptunianos habrían permanecido sin acretarse en un anillo entre 38 y 50 UA (Kuiper, 1951). Luego, Plutón, que recorre la zona entre 30 y 50 UA, comienza el scattering de los cometas por el Sistema Solar y entonces las perturbaciones más fuertes por Neptuno y los otros planetas gigantes los dispersarían aún más. Sin embargo considera (erróneamente) que estos cometas van a la Nube de Oort y vuelven a la zona planetaria desde ahí.

La idea de Edgeworth y Kuiper permaneció sin explorar y se consideraba que los JFC eran capturados por Júpiter a partir de un flujo casi parabólico de la Nube de Oort (e.g. Everhart, 1972). Hasta que en 1980, Fernández da la primera explicación sobre la región transneptuniana como fuente de los JFC (Fernández, 1980). Fernández analiza el hecho de que el origen de los JFC como un proceso de captura por Júpiter y los otros planetas gigantes de una población de cometas casi parabólicos en la Nube de Oort, implicaría la pérdida de 300 cometas casi parabólicos por cada uno capturado en órbita de JFC. Entonces el número total de co-

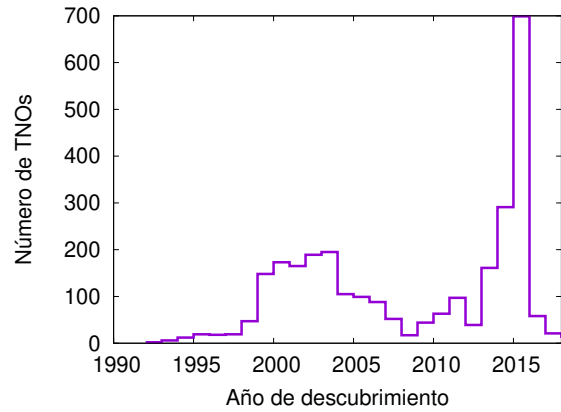


Figura 1: Número de TNOs descubiertos por año.

metas eyectados durante la edad del sistema Solar sería  $1.35 \times 10^{12}$ , alrededor de un orden de magnitud más grande que los cometas que debería haber en la Nube de Oort (Oort, 1950). Este cálculo llevó a Fernández a proponer al cinturón transneptuniano entre  $\sim 35$  y 50 UA (sugerido por Edgeworth y Kuiper) como una fuente alternativa más eficiente de JFC. Posteriormente, Duncan et al. (1988) estudiaron el origen de los cometas de corto período por su siglas en inglés, Short Period Comets (SPC) mediante simulaciones numéricas y concluyeron que los SPC no se pueden producir por dispersión de cometas de la Nube de Oort por los planetas. La fuente de SPC más probable es un cinturón que llaman Cinturón de Kuiper, conteniendo una fracción de la masa terrestre localizado en las partes externas del Sistema Solar.

La población transneptuniana permaneció como especulaciones teóricas por varias décadas. Hubieron varios surveys de búsqueda de TNOs con resultados negativos. Charles Kowall realizó una búsqueda sistemática de pequeños cuerpos distantes entre 1976 y 1985 y descubrió el primer Centauro, Chirón. Finalmente, luego de varios surveys dedicados, en 1992, David Jewitt y Jane Luu descubren el primer TNO, (además de Plutón y Caronte), 1992QB1, con el telescopio de 2.2 m de Mauna Kea, Hawaii (Jewitt et al., 1992). Este objeto tenía en el momento de descubrimiento elementos orbitales:  $a = 43.82$  UA,  $e = 0.08$ , e  $i = 2.21^\circ$ , en acuerdo con lo que se esperaba para objetos del cinturón transneptuniano. Su diámetro se estimó en  $\sim 250$  km. Unos meses después se descubrió el segundo objeto: 1993 FW, por el mismo equipo. Estos dos objetos fueron seguidos rápidamente por otros llegando a los 500 en 10 años. En la actualidad hay más de 3000. En la Fig. 1 se muestra la tasa de descubrimiento vs el tiempo. A medida que los descubrimientos fueron más numerosos emergió la estructura de la región transneptuniana y se pudieron identificar 4 subpoblaciones según sus características dinámicas. Los límites de cada subpoblación son levemente variables de acuerdo a cada autor. En este trabajo tomaremos las siguientes definiciones:

- Objetos clásicos (CTNOs): con  $40\text{UA} \lesssim a \lesssim 50$  UA,  $e \leq 0.2$ . Esta población se la suele dividir en clásica *cold* ( $i \lesssim 5^\circ$ ) y *hot* ( $i \gtrsim 5^\circ$ ) según la inclinación.

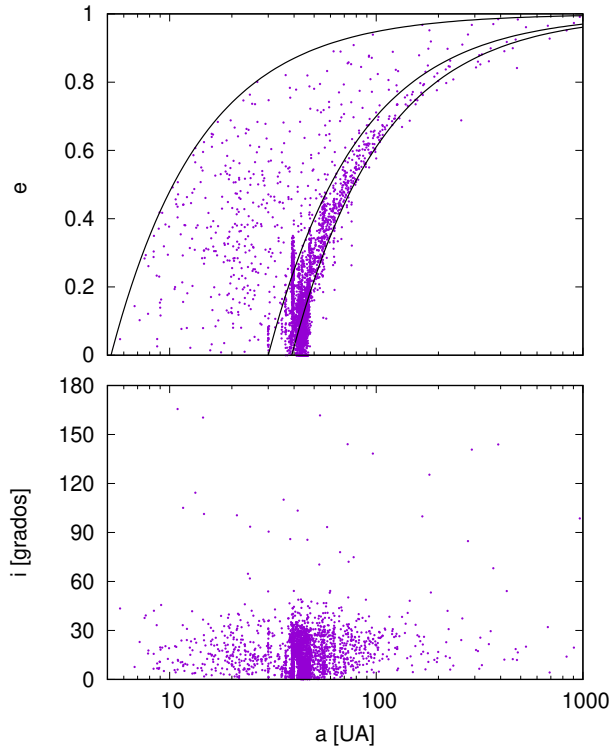


Figura 2: Distribución de los objetos distantes en el espacio de elementos orbitales semieje mayor ( $a$ ), excentricidad ( $e$ ) e inclinación ( $i$ ). Las curvas negras corresponden a valores constantes del perihelio igual a 5.2 UA, 30 UA y 39 UA.

- Objetos resonantes (RTNOs): en resonancia de movimientos medios por sus siglas en inglés, Mean Motion Resonances (MMR) con Neptuno. La más poblada es la 3:2 donde está Plutón y los plutinos.
- Objetos del Disco Disperso por sus siglas en inglés, Scattered Disk Objects (SDOs): con  $e > 0.2$ , y distancia perihélica  $q > 30$  UA.
- Objetos del Disco Extendido: objetos desacoplados de Neptuno, con perihelios  $q \gtrsim 39$  UA.

Para los objetos en la zona de los planetas gigantes:

- *Giant Planet Crossers (GPC)*: aquellos con perihelio  $q < 30$  UA, es decir que cruzan las órbitas de los planetas gigantes y entran en la zona planetaria al menos durante una parte de su órbita.
- Centauros: aquellos que tienen  $a < 30$  UA

Todas estas poblaciones distantes se representan en la Fig. 2. A medida que se fueron descubriendo más objetos más allá de Neptuno, se hizo evidente que la estructura y las características dinámicas de la región transneptuniana no se correspondían con el presente estabilizado del Sistema Solar, sino que mostraban signos de un pasado agitado. Fueron necesarios nuevos modelos y teorías de formación planetaria basados en la migración planetaria (e.g. Fernandez & Ip, 1984; Malhotra, 1993, 1995; Tsiganis et al., 2005; Walsh et al., 2011; Nesvorný & Morbidelli, 2012; Nesvorný, 2015) para explicar las observaciones. En el trabajo pionero de Fernandez & Ip (1984), los autores encontraron un desplazamiento radial para Urano y Neptuno durante su acreción y dispersión de

planetesimales, y el mecanismo de migración radial durante la formación planetaria salió a la luz. Malhotra (1993, 1995) logró explicar la captura de Plutón en la MMR 3:2 con Neptuno migrando, adquiriendo así su excentricidad e inclinación altas. Luego, el modelo de Niza (Tsiganis et al., 2005) abrió las puertas a una serie de trabajos centrados en explicar la arquitectura orbital actual del Sistema Solar. En general, se piensa que la migración planetaria condujo, de todos modos, a una gran excitación en la evolución temprana del Sistema Solar, en la que se eyectó gran cantidad de la masa inicial. Cuando los planetas dejaron de migrar por agotamiento de los planetesimales del disco, el Sistema Solar comenzó a estabilizarse para alcanzar la forma, dinámica y configuración actuales.

Las poblaciones de cuerpos pequeños comenzaron a interactuar desde este momento y se establecieron vínculos entre sí. Más allá de las poblaciones residuales del proceso de formación, la zona de los planetas gigantes es alimentada actualmente por los TNOs. Otras poblaciones de pequeños cuerpos también contribuyen a esta zona. A su vez, el paso por la región de los gigantes, provoca que algunos de estos objetos entren en la región interior a Júpiter, es decir de los cometas.

### 3. Los objetos distantes observados

La distribución de magnitud absoluta ( $H$ ) de TNOs y Centauros tiene la forma exponencial  $N(H) \propto 10^{\alpha H}$ , donde  $\alpha$  es la pendiente logarítmica que caracteriza a la población. Esta ley exponencial podría tener un quiebre para objetos más débiles. De la relación entre magnitud y diámetro:  $D = 1327.510^{-H/5} / \sqrt{p_v}$ , donde  $p_v$  es el albedo, la distribución del tamaño resulta en una ley diferencial de potencia de la forma:  $N(D) \propto D^{-q}$ , donde  $q = 5\alpha + 1$ .

Desde su descubrimiento el número de TNOs ha crecido enormemente gracias a diversos *surveys* dedicados. Sin embargo, los Centauros han sido descubrimientos fortuitos de los *surveys* de TNOs. El primer *survey* diseñado para descubrir y determinar las órbitas de cientos de TNOs fue el *Deep Ecliptic Survey* (DES), que funcionó de 1998 a 2005 (Elliot et al., 2005). El mismo descubrió y realizó el seguimiento de observaciones de 304 objetos que permitieron obtener órbitas bien determinadas y realizar una clasificación dinámica en las subpoblaciones de la región transneptuniana (TN). Adams et al. (2014) estimaron la distribución de magnitudes de TNO y Centauros teniendo en cuenta los sesgos del *survey* y determinaron que debería haber un quiebre para los objetos más débiles.

Un *survey* que ha aumentado considerablemente el número de TNO observados y también de Centauros es el *Outer Solar System Origin Survey* (OSSOS), que funcionó entre 2013 y 2017 y descubrió 1142 objetos (Bannister et al., 2018). Este *survey* fue diseñado para descubrir TNOs con una cuidadosa cuantificación de los sesgos. Esto permitió al equipo de OSSOS desarrollar un simulador de *survey* que tuviera en cuenta los sesgos de OSSOS (Lawler et al., 2018b). Lawler et al. (2018a) usaron una muestra de 68 TNOs con  $a > 30$  UA, los cuales llaman TNO dispersados (TD) y Centauros con  $a < 30$

UA, descubiertos principalmente por OSSOS, para explorar su distribución de  $H$ . Asumieron que estas dos poblaciones son parte de una sola población con un origen dinámico común, ya que sus órbitas están excitadas dinámicamente por Neptuno. Lawler et al. (2018a) obtuvieron que tanto una distribución de *divot* como de quiebre (ver, por ejemplo, la Fig. 2 en Shankman et al., 2016) ajustan a los datos. En el caso de quiebre, este se da en  $H = H_b = 7.7$  con  $\alpha_1 = 0.9$  para  $H < H_b$  y  $\alpha_2 = 0.4$  para  $H > H_b$ . Además estiman una población de TNOs dispersados de  $N_{TD}(H < 12) = 2.7 \pm 0.7 \times 10^6$  (que corresponde a  $D \gtrsim 20$  km para un albedo de 0.06), y  $N_{TD}(H < 8.66) = 9 \pm 2 \times 10^4$  ( $D \gtrsim 100$  km). Suponiendo que la distribución de tamaños se mantiene para tamaños más pequeños, los autores encontraron que  $N_{TD}(H < 18) = 3 \times 10^9$  ( $D \gtrsim 1$  km). Para Centauros obtienen que  $N_C(H < 12) = 3500_{-1400}^{+1800}$ , y  $N_C(H < 8.66) = 110_{-40}^{+60}$ .

Nesvorny et al. (2019) utilizaron modelos previos de la evolución del Sistema Solar que incluían a Neptuno en migración lenta, para predecir las distribuciones de elementos orbitales de los Centauros actuales utilizando el simulador de survey de OSSOS para sus modelos. Obtuvieron una buena coincidencia con la distribución orbital observada de Centauros de OSSOS y predijeron una población de  $21000 \pm 8000$  para  $D > 10$  km.

La distribución de tamaños y número de Centauros está vinculada a la distribución de tamaños y número de SDO; por esto, estudiar el vínculo dinámico entre estas poblaciones es importante para restringir tanto el número como su distribución de tamaños y orbital.

#### 4. Dinámica y vínculo de poblaciones actuales

Los objetos transneptunianos se hipotetizaron primero y descubrieron después, por un lado como una población natural que debería existir más allá de Neptuno, pero también para explicar la existencia de los cometas de corto período. Por lo tanto este vínculo entre los objetos distantes como fuente de los cometas se ha estudiado desde sus orígenes por varios autores y desde diferentes ángulos. Los Centauros, al ocupar un espacio de transición, se han investigado principalmente como progenie de los TNOs y como progenitores de los cometas de la familia de Júpiter (JFC). Debido a esta característica de objetos de transición, su comportamiento dinámico está condicionado por las características dinámicas intrínsecas de los TNO. Neptuno puede considerarse el nexo entre TNOs y Centauros, ya que las eventuales interacciones gravitacionales de algunos TNO con este planeta pueden transferirlos a la zona planetaria, convirtiéndolos en objetos Centauros. Aunque el camino evolutivo de los TNO desde la región TN hacia la región Centauro y luego hacia la población JFC está estudiado y aceptado, la distribución real de números y tamaños de Centauros sigue sin estar clara.

Por un lado, el límite entre las regiones TN y Centauros y luego, la definición dinámica de Centauros son algo variables en la literatura, y esto dificulta la comparación entre diferentes estudios. Por otro lado, hay

pocas observaciones de la población de Centauros. Por el contrario, los TNO y los JFC son mucho más observados y su número y distribución de tamaños está mucho más restringida.

En los últimos años hemos realizado diversos estudios para establecer el vínculo entre las poblaciones de cuerpos pequeños del Sistema Solar, en particular para determinar cómo se distribuyen en la zona de los planetas gigantes los objetos que llegan de la región TN, pero también de otras poblaciones. De los trabajos realizados (Di Sisto & Brunini, 2007; Di Sisto et al., 2010, 2014, 2019), y de trabajos previos (Levison et al., 1997; Levison & Duncan, 1997) se obtiene que la fuente principal de Centauros y JFCs es el Disco Dispersado en la región TN. Estos objetos son los que tienen cierta probabilidad de cruzar la órbita de Neptuno y ser inyectados hacia la zona planetaria por tener perihelios cercanos al del planeta. En cambio, los CTNOs y los RTNOs se encuentran en nichos estables con muy baja probabilidad de intersectar Neptuno en algún momento. En las siguientes subsecciones repasaremos los trabajos al respecto y los modelos obtenidos de la población de pequeños cuerpos en la región de los planetas gigantes y algunos casos particulares.

##### 4.1. Del SD a la zona de los planetas gigantes

Di Sisto & Brunini (2007) (DB07 en lo que sigue) desarrollaron un modelo del SD actual intrínseco. Para ello, utilizaron los objetos observados hasta esa fecha y agregaron clones de forma tal de obtener distribuciones de elementos orbitales de los SDOs sin sesgo observacional. Luego integraron estas partículas numéricamente por 4500 Ma para seguir su dinámica y evolución y calcular la contribución de los SDO a la zona de los planetas gigantes, es decir aquella con  $q < 30$  UA. Dado que desde 2007, el número de SDOs observado se ha incrementado sustancialmente, construimos nuevamente el modelo con los SDOs observados actualmente y realizamos el mismo experimento numérico. Tomamos de la base de datos del Minor Planet Center (MPC) los 603 SDOs hasta abril de 2019 y definidos como aquellos con distancias perihélicas  $q$ ,  $30\text{UA} < q < 39\text{UA}$ , semieje mayor  $a > 40$  UA y excentricidades  $e > 0.2$  para distinguirlos de los CTNO (Elliot et al., 2005). Siguiendo los lineamientos de DB07, consideramos la distribución intrínseca en semiejes mayores basada en Fernández et al. (2004) proporcional a  $a^{-2}$  y una distribución de inclinación intrínseca de Brown (Brown, 2001) (ver DB07 para detalles del modelo) dada por:  $F(i)di \propto \sin i \exp^{-i^2/2\sigma_i^2}$ .

Con los SDOs reales (603) generamos 5167 clones de tal forma que el total de las partículas iniciales (5770), es decir clones más reales ajusten a la distribución de semieje mayor e inclinación del modelo. Con las condiciones iniciales realizamos entonces la integración numérica de las 5770 partículas sin masa en el campo gravitatorio del Sol (que incluye la masa de los planetas terrestres), los cuatro planetas gigantes y Plutón, con el integrador híbrido EVORB (Fernández et al., 2002). El paso de integración fue de 0.2 años y el lapso de tiempo total, 4500 Ma. Las condiciones de corte del código fueron: colisión

con un planeta, eyección (si alcanza un semieje mayor  $a > 5000$  UA, o una distancia  $r < 5.2$  UA, es decir, la zona de los JFC donde deben tenerse en cuenta las perturbaciones de los planetas terrestres para dar cuenta de una evolución dinámica real.

Los resultados del experimento fueron los siguientes. De las 5770 partículas iniciales, 18 (0.3%) colisionan con un planeta, 3801 partículas (50.6%) alcanzaron  $a > 5000$  UA, 884 (15.3%) alcanzaron la zona de  $r < 5.2$  UA, y el resto, 1951 (33.8%) sobrevivieron como SDO. Por otro lado, al igual que lo que encontramos en DB07, la región del SD con semieje mayor y perihelio más cercanas es la que más contribuye a la región de JFC. En la simulación, se calcula un encuentro entre una partícula y un planeta si la partícula alcanza una distancia al planeta dentro de 2.1 radios de Hill. Así, tenemos que el 5% de las partículas tienen encuentros con Plutón, el 74.2% con Neptuno, el 17.1% con Urano, el 3.6% con Saturno y el 0.1% con Júpiter. De los SDO iniciales en la integración, el 70% entran a la zona de GPC ( $q < 30$  UA) y la vida media ahí es  $l_{GPC} = 68$  Ma, siendo el valor más probable entre 10 y 100 Ma. Hay una fuerte dependencia de la vida media como GPC con las inclinaciones iniciales en el SD, siendo que a mayor inclinación inicial, mayor es el tiempo de vida en la región de GPC. También notamos que existe una gran correlación entre la vida media como GPC y la distancia al perihelio, siendo la vida media mayor para valores mayores de  $q$ .

A partir de nuestra integración numérica es posible obtener la distribución intrínseca de GPC en el espacio de los elementos orbitales. Así calculamos la distribución normalizada y pesada temporalmente considerando todo el tiempo de evolución de los GPC en el espacio ( $a$ ,  $e$ ,  $i$ ) que se muestra en las Figs. 3 y 4. Estos mapas representan nuestro modelo de distribución; el código de color es indicativo de la fracción de tiempo que pasan los GPC en cada zona (azul para las regiones más visitadas, rojo para las menos visitadas). De la Fig 4 se puede observar que la región con mayor probabilidad de ocupación es la que tiene  $20\text{UA} < a < 80$  UA e  $i \lesssim 30^\circ$  y que hay varias resonancias de movimientos medios pobladas, siendo la 1 : 2 con Neptuno con  $a \sim 48$  UA, correspondiente a los Twotinos, la más poblada. También se distingue que los GPC observados están en la zona comprendida por nuestro modelo. De la Fig. 3 se puede observar que la evolución en la zona de los planetas gigantes depende del perihelio, siendo la zona de perihelio entre 20 y 30 UA la más densamente poblada. Sin embargo, la inestabilidad de la región cercana a la órbita de Júpiter es un subproducto de las condiciones de contorno de nuestro modelo, que no es válido dentro de la región delimitada por este planeta. A partir de los registros de nuestra simulación, calculamos el tiempo de la primera eyección a la zona de GPC y analizamos la dependencia con el tiempo del cociente entre el número acumulado de SDO que ingresan a la zona GPC ( $N_{GPC}$ ) y el número de SDO que permanecen en el SD ( $N_{SDO}$ ). Esta relación se puede ajustar por una relación lineal cuya pendiente está dada por:

$$d[N_{GPC}/N_{SDO}]/dt = Y \quad (1)$$

siendo  $Y = 4.02533 \times 10^{-10} \pm 8.232 \times 10^{-13} N_{SDO}/\text{año}$

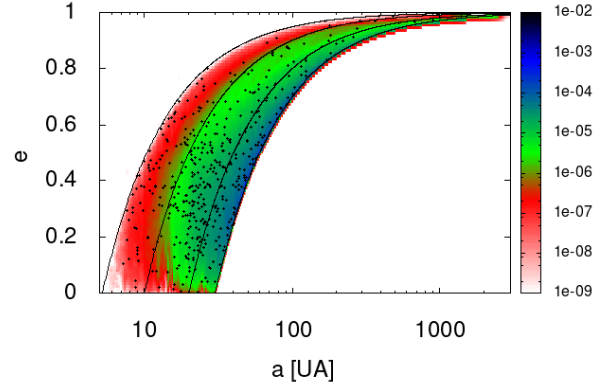


Figura 3: Distribución normalizada de GPC de nuestro modelo en el espacio semieje mayor ( $a$ ) vs excentricidad ( $e$ ). Los puntos negros representan la población observada.

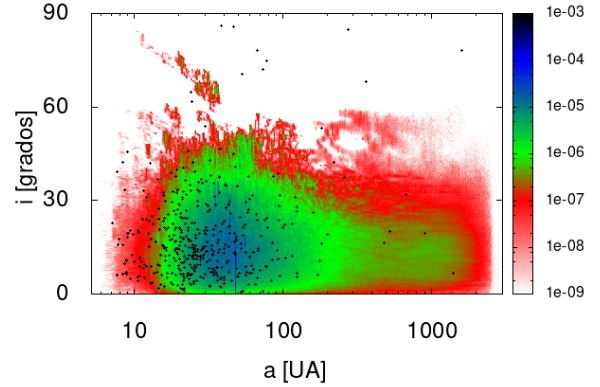


Figura 4: Distribución normalizada de GPC de nuestro modelo en el espacio semieje mayor ( $a$ ) vs inclinación ( $i$ ). Los puntos negros representan la población observada.

la tasa de eyección de GPC desde el SD. Este ajuste lineal implica que si conocemos el número de SDO, el número acumulado actual de GPC ( $N_{GPC}(> D)$ ) que proviene del SD estaría dado por:

$$N_{GPC}(> D) = Y N_{SDO}(> D) l_{GPC}, \quad (2)$$

donde  $N_{SDO}(> D)$  es el número acumulado actual de objetos en el SD y por tanto, la tasa de eyección hacia GPC será:  $Y N_{SDO}(> D)/\text{año}$ . Existen diversos trabajos sobre las estimaciones del número de objetos en el SD. En este trabajo adoptaremos una distribución de tamaños de forma de ley de potencias con un quiebre para tamaños más pequeños, utilizada por Di Sisto & Brunini (2011) ya que resulta de un análisis detallado de varios trabajos observacionales y teóricos. Tomaremos el quiebre de la distribución en  $D = 100$  km basándonos en el reciente trabajo de Lawler et al. (2018a). Además, dada la incerteza que existe para el índice de la distribución de tamaños para objetos pequeños, vamos a considerar 3 valores de este índice ( $s_2$ ). Así, el número acumulado

de SDO está dado por:

$$N(> D) = C_0 \left( \frac{1}{D} \right)^{s_2-1}, \quad D \leq 100 \text{ km},$$

$$N(> D) = 3.5 \times 10^5 \left( \frac{100}{D} \right)^{s_1-1}, \quad D > 100 \text{ km}, \quad (3)$$

donde  $C_0 = 3.5 \times 10^5 \times 100^{s_2-1}$  por continuidad en  $D = 100$  km,  $s_1 = 4.7$  y  $s_2 = 2.5, 3$  y  $3.5$  y  $[D] = \text{km}$ . El número acumulado de GPC ( $N_{GPC} > D$ ) puede calcularse de las Ec. 2 y 3. Por ejemplo, tenemos 9560 GPC con  $D > 100$  km y usando el índice intermedio,  $s_2 = 3$ ,  $N_{GPC}(> 10\text{km}) \sim 2.3 \times 10^6$  y  $N_{GPC}(> 1\text{km}) \sim 2.23 \times 10^8$ . La tasa de inyección calculada, da por ejemplo, 3 SDOs con  $D > 1$  km cada 2 años o 14 SDOs con  $D > 10$  km cada 100 años.

Para comparar lo que se obtiene de nuestro modelo con las observaciones disponibles es necesario restringirnos a la zona de Centauros. Calculamos de la misma manera la tasa de inyección de SDOs hacia esta zona y luego, el número acumulado de Centauros ( $N_C$ ) provenientes del SD en relación con el número de SDO que sobreviven ( $N_{SDO}$ ) en función del tiempo. En este caso, algunos SDO alcanzan  $a > 5000$  UA y se eliminan de la integración nunca habiendo entrado a la zona de Centauros y por tanto tenemos que extraerlos de la población restante en cada instante de tiempo. Al igual que antes, se puede realizar un ajuste lineal de  $d(N_C/N_{SDO})$  en función del tiempo donde la pendiente de esta función lineal será la tasa de inyección de SDOs a Centauros cuyo valor resulta igual a:  $Y_C = 1.79561 \times 10^{-10} \pm 4.669 \times 10^{-13} N_{SDO} \text{ años}^{-1}$ . Por otro lado, la vida media en la zona de Centauros es  $l_C = 7.2$  Ma y por tanto, al igual que para la zona de GPC, se puede obtener el número acumulado de Centauros ( $N_C(> D)$ ) de las Ecs. (2) y (3) pero considerando  $Y_C$  y  $l_C$  (en lugar de  $Y_{GPC}$  y  $l_{GPC}$ ). A partir de esos cálculos, graficamos en la Figura 5, el número acumulado de SDO ( $N_{SDO}(> D)$ ), el número acumulado de Centauros ( $N_C(> D)$ ) y dos estimaciones de Lawler et al. (2018a) y Nesvorny et al. (2019). Nuestro modelo predice un número algo mayor de Centauros grandes que Lawler et al. (2018a) y Nesvorny et al. (2019), pero los números para  $D < 100$  km son similares y se encuentran entre las barras de error.

#### 4.2. Fuentes secundarias de objetos en la zona de los planetas gigantes

La zona de GPC también es alimentada por otras poblaciones de cuerpos menores del Sistema Solar. La resonancia de movimientos medios (MMR) 2 : 3 con Neptuno, es decir, los Plutinos es la resonancia observada más poblada en la región TN. Morbidelli (1997) analizó su estructura dinámica y descubrió que existe una zona de difusión caótica lenta que debería ser una fuente activa de cuerpos que se encuentran con Neptuno en la época actual del Sistema Solar y por tanto una fuente de Centauros y JFC. Sin embargo, descubrieron que solo el 10 % de los Plutinos en esta zona débilmente caótica adquieren órbitas que se encuentran con Neptuno en

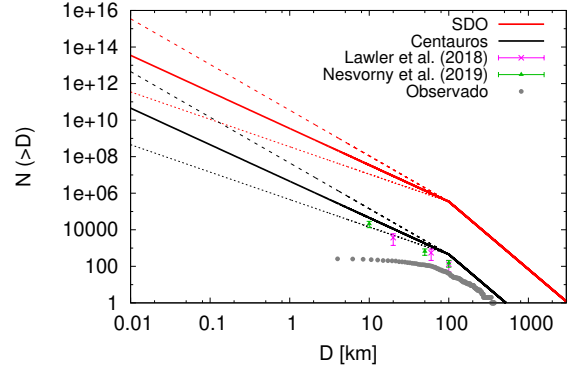


Figura 5: Número acumulado de SDO ( $N_{SDO}(> D)$ ) y de Centauros ( $N_C(> D)$ ) de nuestro modelo. Para diámetros menores a 100 km se grafican las tres curvas para los tres valores propuestos del índice de la distribución de tamaños. Los puntos grises corresponden a los Centauros observados, los puntos verdes son las estimaciones de Nesvorny et al. (2019) y los puntos magenta corresponden a Lawler et al. (2018a).

los últimos 1000 Ma. Tiscareno & Malhotra (2009) realizaron integraciones numéricas de objetos en las MMR 2 : 3 y 1 : 2 con Neptuno y descubrieron que aunque la tasa de escape habría sido alta inicialmente, ahora sería baja de acuerdo con Morbidelli (1997).

La evolución colisional de los objetos resonantes podría ser otra forma que ellos puedan escapar de la resonancia; sin embargo, de Elía et al. (2008) encontraron una tasa de escape colisional mucho menor que la tasa de escape dinámica. En este sentido, Di Sisto et al. (2010) analizaron la contribución de Plutinos a la zona de GPC y descubrieron que casi todos los Plutinos que escapan de la resonancia ingresan a la zona GPC con una tasa de inyección actual de  $1.62 \times 10^{-10} \text{ años}^{-1}$ , es decir,  $\sim 3$  veces menos que la inyección desde el SD. Considerando el número y distribución de tamaños de Plutinos propuesta por de Elía et al. (2008) calculamos entonces el número de objetos en la zona de GPC dependiente del diámetro, al igual que para los SDOs. En particular, se obtiene que podría haber entre  $1.8 \times 10^6$  y  $1.8 \times 10^7$  Plutinos con  $D > 1$  km en la población actual de GPC. Este valor es un orden de magnitud menor que el del SD. Otros trabajos sobre el escape de otras MMR de la región transneptuniana también obtienen tasas de escape inferiores al aporte del SD a la región de los planetas gigantes (Volk, 2013).

Levison & Duncan (1997) realizaron la primera evolución dinámica de los CTNO. Seleccionaron de una simulación previa, 20 partículas que dejaron el Cinturón de Kuiper (KB) después de ser estables durante más de 1000 Ma y por tanto, son representativas de las órbitas de los objetos que actualmente salen de la región TN clásica. Agregaron clones a esas partículas y siguieron su evolución dinámica durante 1000 Ma bajo la acción gravitacional del Sol y los cuatro planetas gigantes hasta la colisión o la eyección. Investigaron la distribución y el destino de los objetos que habían dejado el KB en la configuración actual del Sistema Solar. Descubrieron que los objetos que evolucionan hacia la zona de los pla-

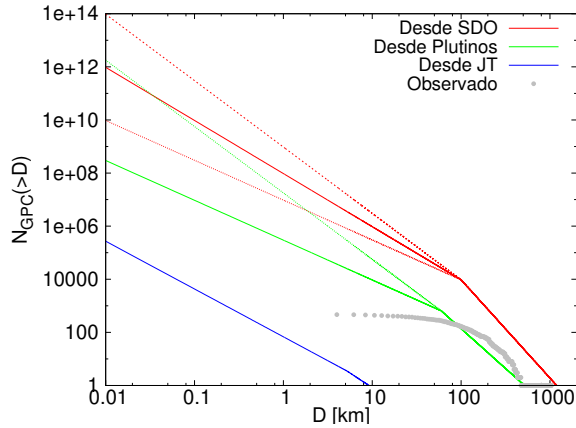


Figura 6: Número acumulado de GPC ( $N_{GPC}(> D)$ ) vs diámetro  $D$  desde SDO (curvas rojas), Plutinos (curvas verdes) y Troyanos de Júpiter (curvas azules). Los puntos grises corresponden a la población observada. Para los GPC desde SDO y Plutinos, se grafican las curvas correspondientes a los quiebres de la distribución de tamaños en las poblaciones originales.

netas gigantes, lo hacen bajo el control dinámico de un planeta a la vez manteniendo el parámetro Tisserand ( $T$ ) con respecto a cada planeta con valores en un rango muy estrecho justo debajo de  $T = 3$ . Por lo tanto, alcanzan el control de Júpiter con  $T$  justo debajo de 3 en un rango estrecho como se observa en los JFC. También estimaron un número de cometas eclípticos (un grupo similar a Centauros) de  $D \sim 1$  km de  $\sim 1.2 \times 10^7$ , valor inferior a lo encontrado desde el SD.

Otra población que puede aportar a la zona de los planetas gigantes hoy en día son los Troyanos de Júpiter. Los Troyanos de Júpiter son asteroides en MMR 1 : 1 con Júpiter y se encuentran alrededor de los puntos lagrangeanos  $L_4$  y  $L_5$  en órbitas relativamente estables. Sin embargo, existen zonas en la resonancia, pobladas por los Troyanos con diferentes escalas de estabilidad. Esto permite que algunos Troyanos escapen de la resonancia en una escala de tiempo menor que la edad del Sistema Solar. Di Sisto et al. (2019) estudiaron la contribución de los Troyanos de Júpiter a otras poblaciones del Sistema Solar. Consideraron la población observada y realizaron simulaciones numéricas a largo plazo para estudiar las trayectorias de aquellos Troyanos que dejan la resonancia. Obtuvieron una tasa de escape constante de ambos puntos lagrangeanos a lo largo del tiempo de  $Y_{L_4} = 7.0398 \times 10^{-11} \pm 8 \times 10^{-14}$  y  $Y_{L_5} = 7.5590 \times 10^{-11} \pm 13 \times 10^{-14}$ . Considerando el número y la distribución del tamaño de los Troyanos y la asimetría real entre  $L_4$  y  $L_5$ , obtuvieron el número de Troyanos escapados en la zona de GPC y Centauros. La contribución desde Troyanos de Júpiter a GPC se grafica junto con la de Plutinos y SDOs en la Fig. 6 donde se puede apreciar que la fuente principal son los SDOs. Sin embargo, las fuentes secundarias podrían explicar algunas peculiaridades como diferentes composiciones de los Centauros, cometas tipo Encke e impactos en Júpiter como el caso Shoemaker Levy 9 según Di Sisto et al. (2010) y Di Sisto et al. (2019).

## 5. Conclusiones

Los estudios sobre cuerpos menores de nuestro Sistema Solar han sido claves para descubrir la historia, evolución y las características generales de todo nuestro Sistema. Desde sus descubrimientos han aportado al estudio de la Mecánica Celeste en sí y la dinámica, a conocer las composiciones químicas de nuestro Sistema Solar y su distribución y características dinámicas han aportado a estudiar la formación planetaria y arquitectura actual.

En particular, las observaciones de los objetos distantes han permitido conocer cada vez más a fondo los reservorios cometarios externos como la nube de Oort y la región TN, permitiendo investigaciones sobre el vínculo de estas poblaciones con los Centauros y cometas. En este sentido, los trabajos dinámicos presentados en las secciones anteriores dan cuenta de la relación entre estas poblaciones en el Sistema Solar actual. A partir de la evolución dinámica de los SDO, hemos calculado el número de objetos en la zona de los planetas gigantes y de Centauros predicho por nuestro modelo. La comparación con estimaciones recientes del equipo de OSSOS sugiere que nuestro modelo sobrestima en cierta medida el número de Centauros grandes aunque para objetos menores de 100 km de diámetro, los resultados son comparables. Comprobamos que el SD es la fuente principal de GPC y Centauros como fue sugerido por primera vez por Duncan & Levison (1997) y encontrado por otros estudios posteriores como DB07 y Volk (2013). Por ejemplo, hay 9600 GPC con  $D > 100$  km y  $10^8$  con  $D > 1$  km (con un índice de distribución diferencial (SFD) de tamaños de 3).

El número acumulado de Plutinos escapados en la zona GPC se encuentra entre uno y dos órdenes de magnitud menos que el del SD. Sin embargo, esos resultados son muy sensibles a la distribución de tamaño de las poblaciones de origen especialmente para diámetros pequeños, donde la SFD de los objetos puede tener un quiebre. La incertidumbre en los tamaños pequeños podría llevar a una contribución importante de Plutinos si el índice de la SFD de Plutinos fuera mayor que el de los SDO. La contribución de JT es insignificante, aunque puede explicar algunas peculiaridades.

*Agradecimientos:* Agradezco a la Asociación Argentina de Astronomía (AAA) y a los Comité Científico y Local de la 61<sup>a</sup> Reunión Anual de la AAA por invitarme a exponer el trabajo y por financiar mi participación.

## Referencias

- Adams E.R., et al., 2014, AJ, 148, 55
- Bannister M.T., et al., 2018, ApJL, 236, 18
- Brown M.E., 2001, AJ, 121, 2804
- de Elía G.C., Brunini A., di Sisto R.P., 2008, A&A, 490, 835
- Di Sisto R.P., Brunini A., 2007, Icarus, 190, 224
- Di Sisto R.P., Brunini A., 2011, A&A, 534, A68
- Di Sisto R.P., Brunini A., de Elía G.C., 2010, A&A, 519, A112
- Di Sisto R.P., Ramos X.S., Beaugé C., 2014, Icarus, 243, 287
- Di Sisto R.P., Ramos X.S., Gallardo T., 2019, Icarus, 319, 828
- Duncan M., Quinn T., Tremaine S., 1988, ApJL, 328, L69

## Las poblaciones distantes de cuerpos pequeños del Sistema Solar

- Duncan M.J., Levison H.F., 1997, *Science*, 276, 1670  
Edgeworth K.E., 1938, Unpublished manuscript, Trustees of the National Library of Ireland, Dublin. Manuscript Nos. 16869/47 and /48.  
Edgeworth K.E., 1949, *MNRAS*, 109, 600  
Elliot J.L., et al., 2005, *AJ*, 129, 1117  
Everhart E., 1972, *Astrophys. Lett.*, 10, 131  
Fernández J.A., 1980, *MNRAS*, 192, 481  
Fernández J.A., Gallardo T., Brunini A., 2002, *Icarus*, 159, 358  
Fernández J.A., Gallardo T., Brunini A., 2004, *Icarus*, 172, 372  
Fernandez J.A., Ip W.H., 1984, *Icarus*, 58, 109  
Huang J., et al., 2018, *ApJL*, 869, L42  
Jewitt D., Luu J., Marsden B.G., 1992, *IAU Circ.No.* 5622, 5611, 1  
Kuiper G.P., 1951, *Proceedings of the National Academy of Science*, 37, 1  
Lawler S.M., et al., 2018a, *AJ*, 155, 197  
Lawler S.M., et al., 2018b, *Front. Astron. Space Sci.*, 5, 14  
Levison H.F., Duncan M.J., 1997, *Icarus*, 127, 13  
Levison H.F., Shoemaker E.M., Shoemaker C.S., 1997, *Nature*, 385, 42  
Malhotra R., 1993, *Nature*, 365, 819  
Malhotra R., 1995, *AJ*, 110, 420  
Mayor M., Queloz D., 1995, *Nature*, 378, 355  
Morbidelli A., 1997, *Icarus*, 127, 1  
Nesvorný D., 2015, *AJ*, 150, 68  
Nesvorný D., Morbidelli A., 2012, *AJ*, 144, 117  
Nesvorný D., et al., 2019, arXiv e-prints, arXiv:1907.10723  
Oort J.H., 1950, *BAN*, 11, 91  
Shankman C., et al., 2016, *AJ*, 151, 31  
Tiscareno M.S., Malhotra R., 2009, *AJ*, 138, 827  
Tsiganis K., et al., 2005, *Nature*, 435, 459  
Volk K.M., 2013, *Dynamical studies of the Kuiper belt and the Centaurs*, Ph.D. thesis, The University of Arizona  
Walsh K.J., et al., 2011, *Nature*, 475, 206