

Trabajo Final Curso Mecánica Celeste Maestría 2020

La existencia de objetos con órbitas muy excéntricas e inclinadas y con alineación física en su longitud de perihelio, y la hipótesis de la existencia del planeta nueve.

Introducción

El presente trabajo está basado en el trabajo desarrollado por los astrónomos Konstantin Batygin y Michael E. Brown. En sus trabajos concluyen que la presencia de objetos con alta excentricidad e inclinación, con una alineación física en su longitud de perihelio y que carecen de encuentros con Neptuno o cualquier otro objeto del Sistema Solar (objetos como Sedna y Vairen), solo puede ser explicado por la presencia de un noveno planeta, cuya masa lo convierte en el quinto objeto masivo del sistema solar. Los mencionados astrónomos han determinado las características orbitales que debe tener el mencionado objeto a buscar: $a=230\text{UA}$, $e=0,5$, $i=30^\circ$, $\omega=180^\circ$.

Análisis

En el presente trabajo nos proponemos replicar y analizar numéricamente los supuestos básicos de la teoría de Batygin y Brown. Para ello, se integran 400 partículas por un período de 4000 millones de años en cuatro integraciones diferenciadas por los semiejes de las mismas. Se les asignaron semiejes de 100, 200, 300 y 400 UA, siempre con la condición de que su distancia de perihelio fuera igual o mayor a 40 UA. Esto estableció límites en la excentricidad (con $\Delta e=0.05$), y en la inclinación (con $\Delta i=15^\circ$).

Para el cálculo numérico solo se utilizaron dos planetas: Neptuno y el Planeta Nueve, la masa de los demás planetas se incorporaron al Sol. Esta técnica permite reproducir la misma situación si se consideraran los N planetas con un importante ahorro en cálculo numérico.

Se realizaron gráficos (a,Ω) , (a,ω) , (a,ϖ) , (ϖ,e) y (ϖ,i) para el análisis de los resultados.

Resultados

Evolución de los elementos orbitales del planeta nueve

Al analizar simultáneamente la evolución del planeta nueve (PN), y de Neptuno surgen consideraciones interesantes. Por un lado se observa el resultado esperado en toda evolución secular al mantenerse su semieje constante. En la figura 1, se observa la evolución de los semiejes de ambos planetas.

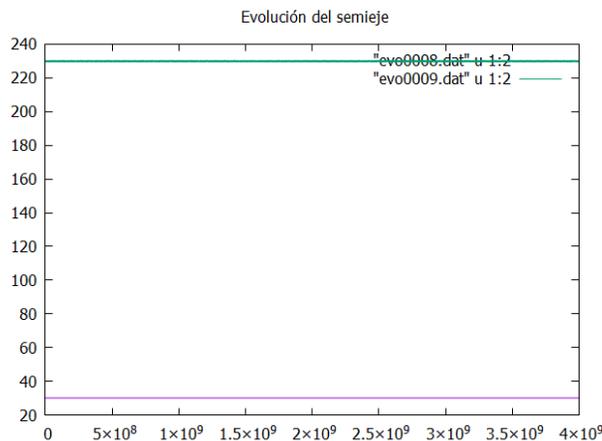


Figura 1. Evolución secular de los semiejes de los dos planetas.

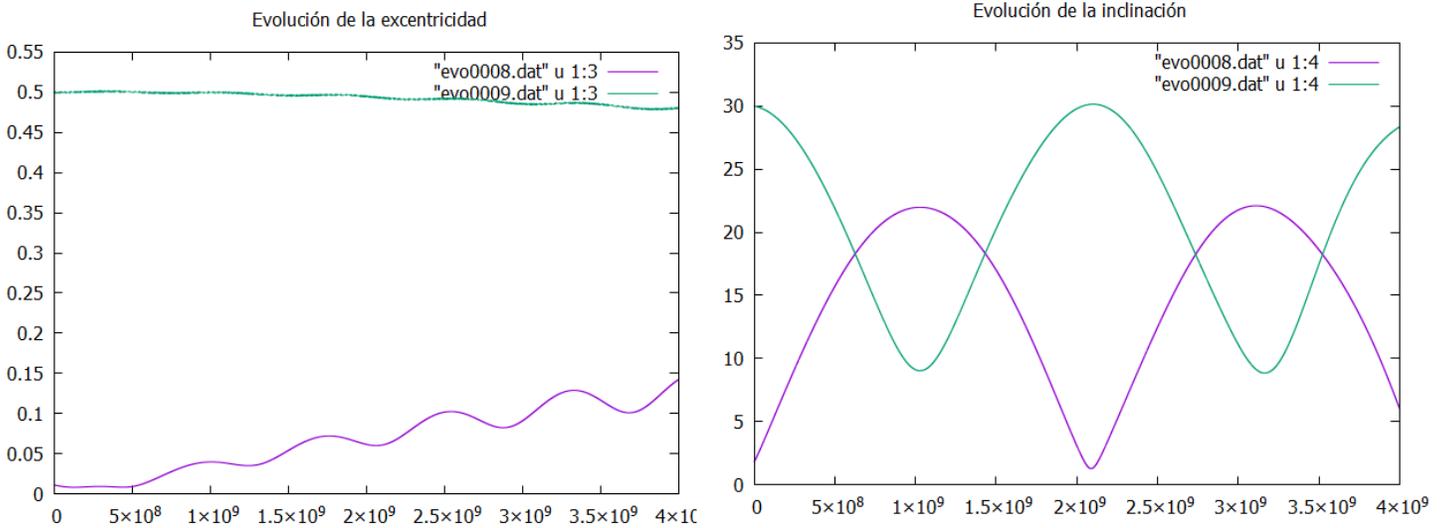


Figura 2. Evolución de la excentricidad e inclinación de Neptuno y el Planeta Nueve.

En la figura 2 se observa y se compara la evolución de la excentricidad e inclinación de ambos planetas. Es interesante notar como luego de 500 millones de años la excentricidad de Neptuno empieza a crecer. Las inclinaciones de ambos planetas se muestran sincronizadas con un período de $2,15 \times 10^9$ años. Dicho comportamiento puede explicarse al analizar la conservación del momento angular del Sistema. Utilizando las ecuaciones 74 a 76 del manual del curso (Fig. 3), se estudió la conservación del momento angular del sistema.

$$L_x = \sum_{j=1}^N \frac{m_j M_\star}{m_j + M_\star} \sqrt{G(M_\star + m_j) \bar{a}_j (1 - \bar{e}_j^2)} \sin \bar{i}_j \cos \bar{\Omega}_j$$

$$L_y = \sum_{j=1}^N \frac{m_j M_\star}{m_j + M_\star} \sqrt{G(M_\star + m_j) \bar{a}_j (1 - \bar{e}_j^2)} \sin \bar{i}_j \sin \bar{\Omega}_j$$

$$L_z = \sum_{j=1}^N \frac{m_j M_\star}{m_j + M_\star} \sqrt{G(M_\star + m_j) \bar{a}_j (1 - \bar{e}_j^2)} \cos \bar{i}_j$$

Fig. 3. Ecuaciones de conservación del momento angular medio en un sistema Heliocéntrico.

El análisis se realizó en tres momentos diferentes de la evolución del sistema con separación de 1000 millones de años, verificando la conservación del momento angular del sistema: $L_{tot} = -4.69 \times 10^{-6} \text{ Ms}^{1/2} \cdot \text{UA}^{3/2} \cdot \text{D}^{-1}$, donde:

Ms=Masas solares

UA=Unidad Astronómica

D= Día Solar Medio

En la siguiente tabla

L_{tot} Neptuno($M_s^{1/2} \cdot UA^{3/2} \cdot D^{-1}$)	L_{tot} Planeta Nueve($M_s^{1/2} \cdot UA^{3/2} \cdot D^{-1}$)	Inclinación Nep/PN
-3.51×10^{-6}	-1.18×10^{-6}	22.09/9.28
2.68×10^{-6}	-7.38×10^{-6}	2.10/30.7
-3.87×10^{-6}	-8.20×10^{-8}	21.85/9.58

Tabla 1. Momento angular total de Neptuno y el Planeta Nueve cada 1000 millones de años.

En la tabla 1 se analiza el momento angular orbital de Neptuno y del Planeta Nueve. En la tercera columna se detalla la inclinación de cada objeto para el tiempo en que se calculó el momento angular de cada uno. Se observa que a medida que evolucionan en sus orbitas, existe una transferencia de momento angular entre los objetos, creciendo el momento angular de los planetas a medida que su órbita se acerca al plano orbital de referencia.

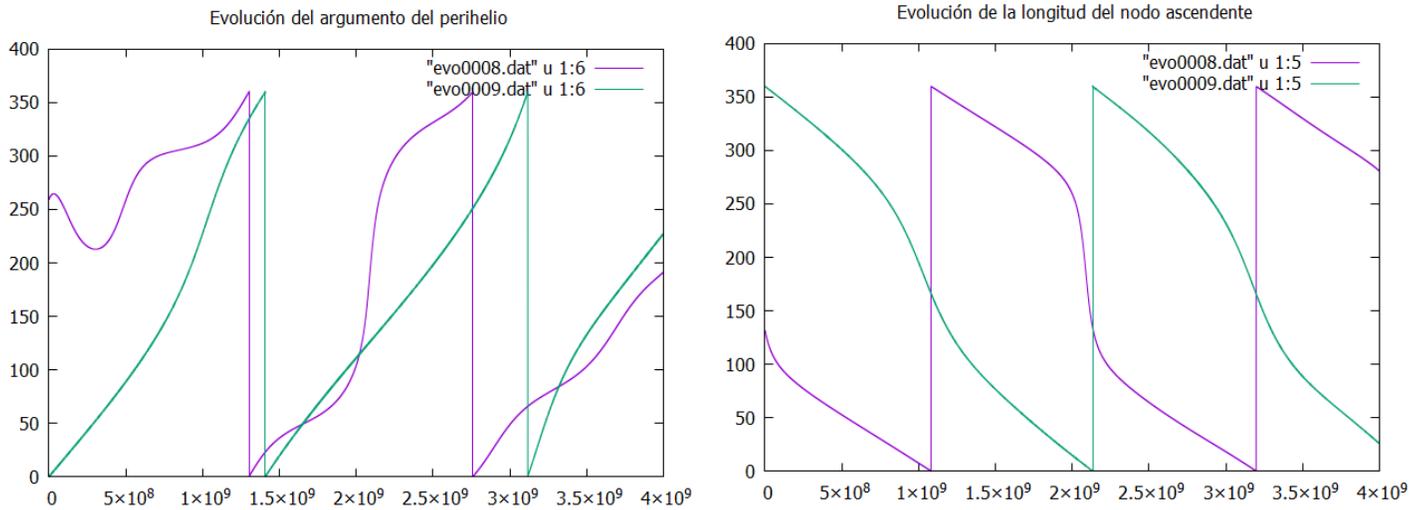


Figura 3.

En la figura 3, podemos observar la evolución de los argumentos de perihelio y de nodo ascendente.

Lo primero que se observa al analizar la evolución de las partículas, es que de las 100 partículas iniciales no todas sobreviven, siendo eyectadas del sistema un número considerable. El número de partículas que sobreviven en cada integración es de 50, 74, 70 y 69 respectivamente.

En las figuras 4, 5, 6 y 7, se observa la evolución de la longitud del perihelio en función del semieje para semiejes de 100 UA, 200 UA, 300 UA y 400 UA.

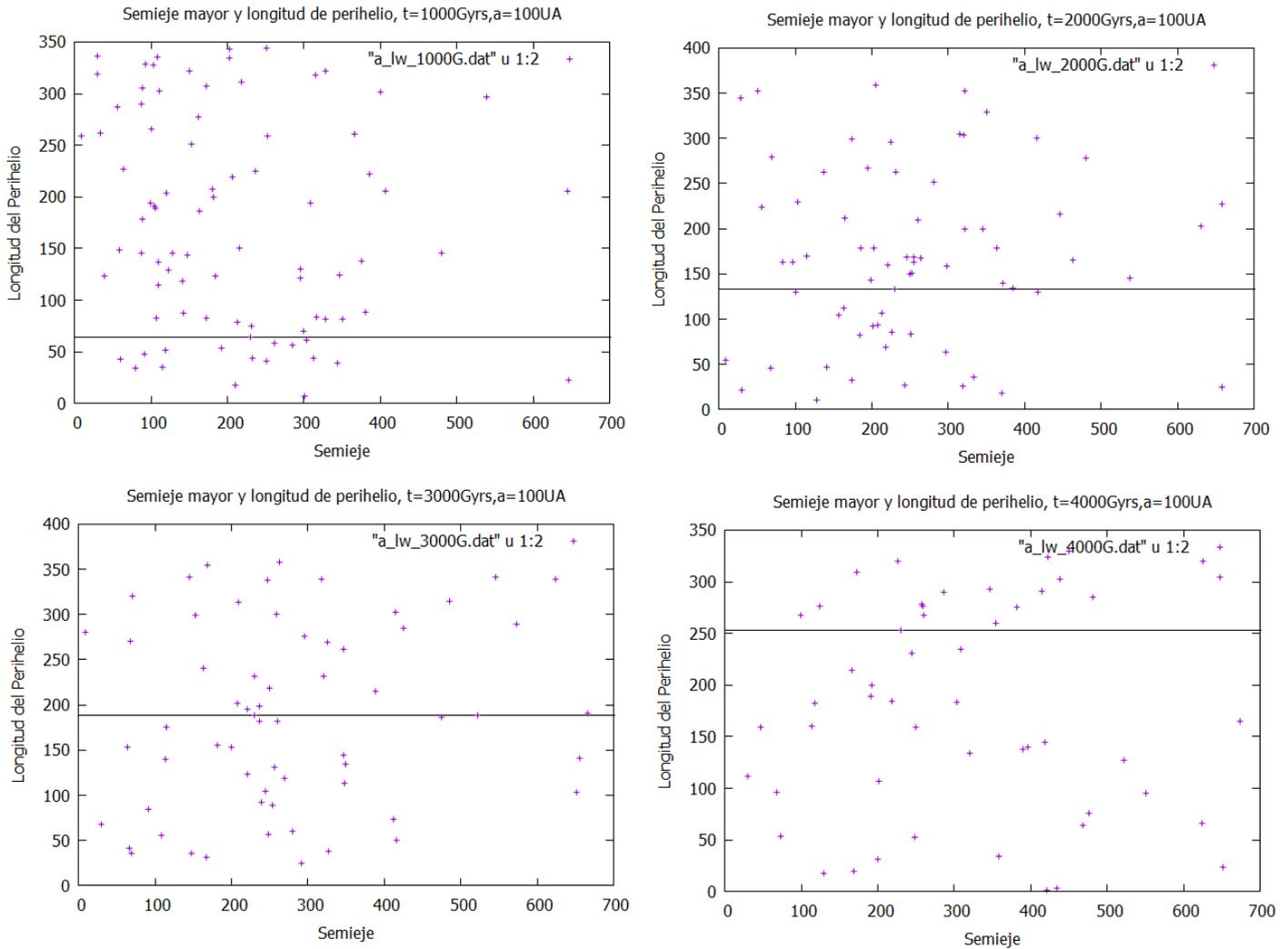


Figura 4. Análisis de la evolución de la longitud del perihelio en función del semieje cada 1000 millones de años para partículas con $a= 100\text{UA}$. La línea continua marca el valor de la longitud del perihelio para el planeta nueve.

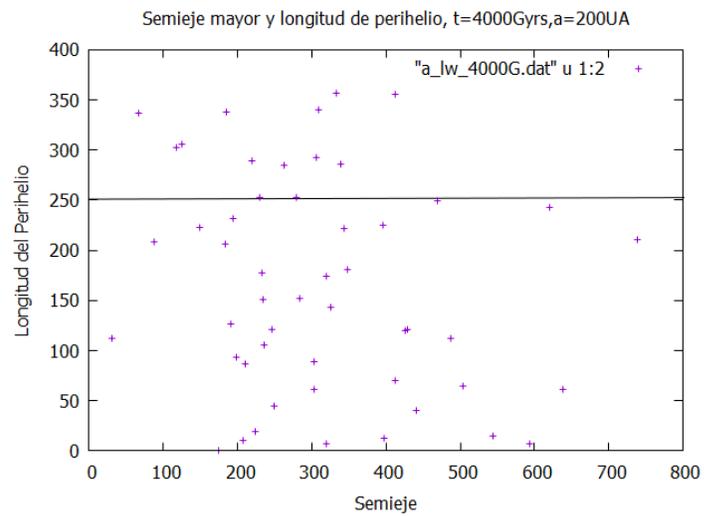
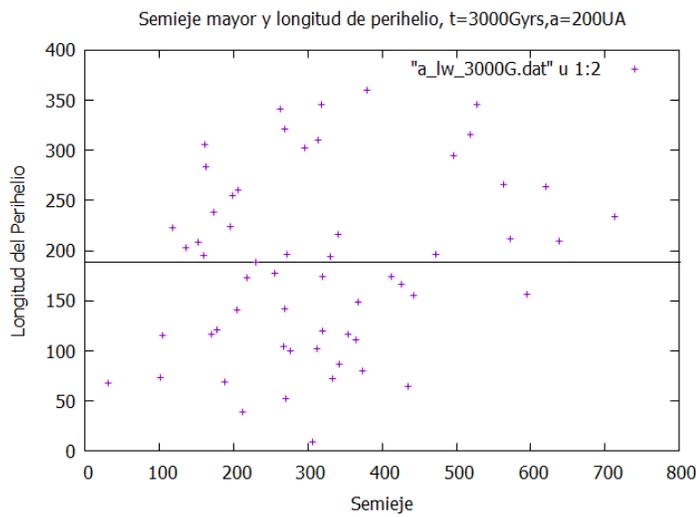
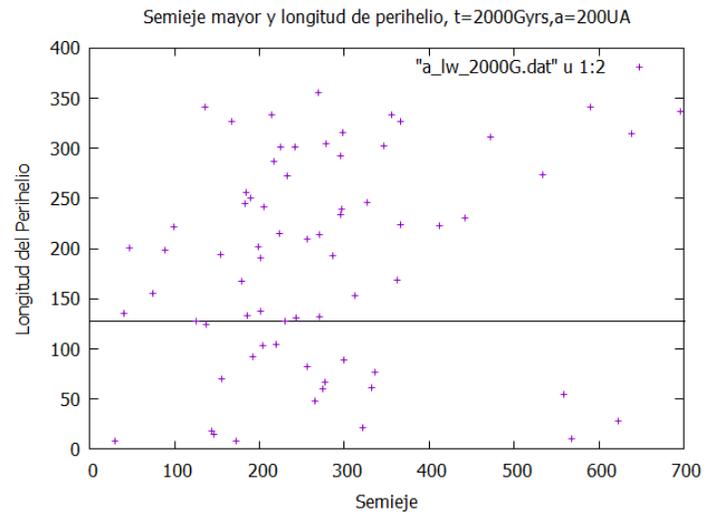
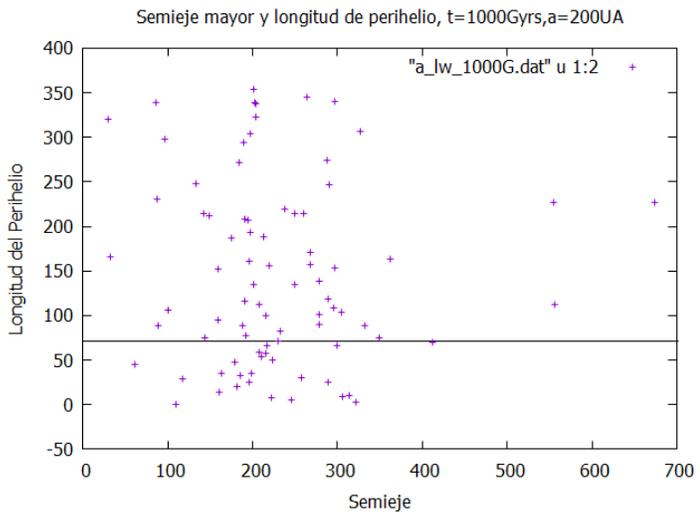


Figura 5. Análisis de la evolución de la longitud del perihelio en función del semieje cada 1000 millones de años para partículas con $a=200\text{UA}$. La línea continua marca el valor de la longitud del perihelio para el planeta nueve.

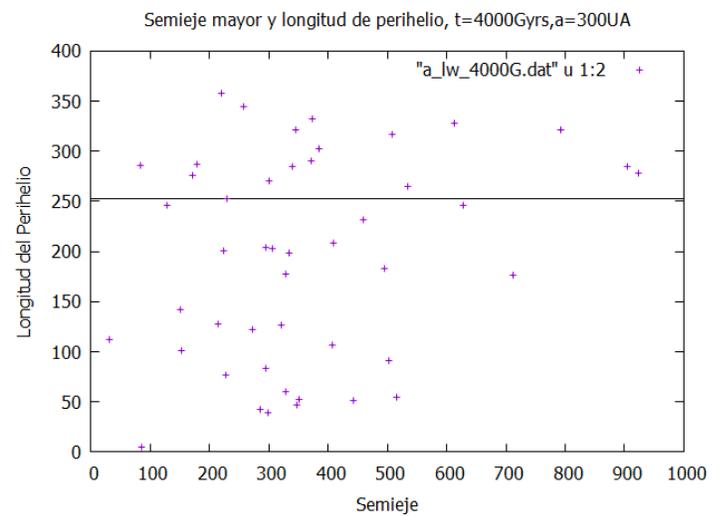
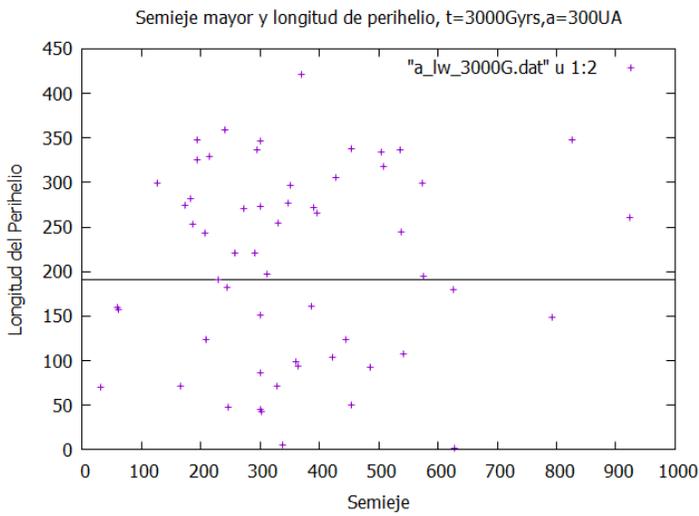
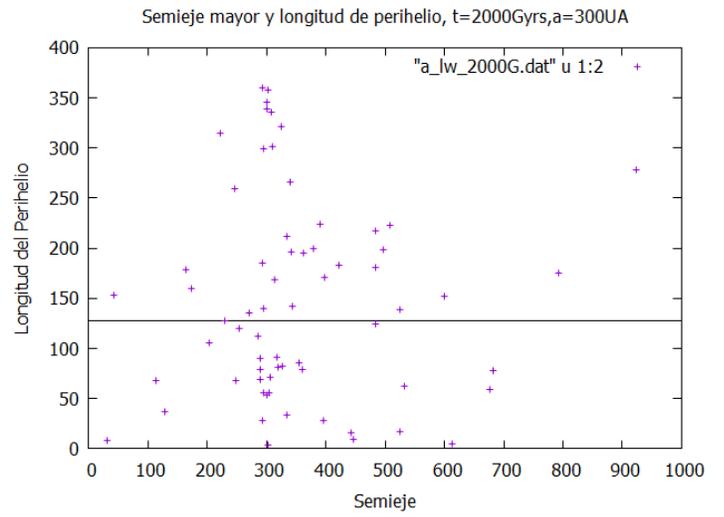
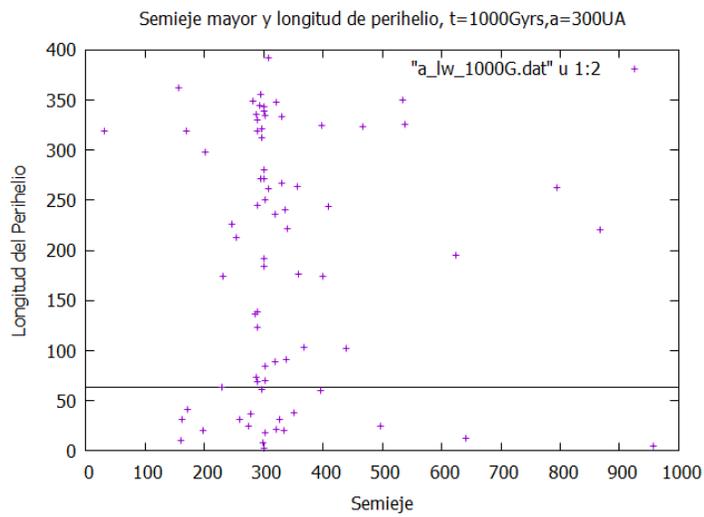


Figura 6. Análisis de la evolución de la longitud del perihelio en función del semieje cada 1000 millones de años para partículas con $a=300\text{UA}$. La línea continua marca el valor de la longitud del perihelio para el planeta nueve.

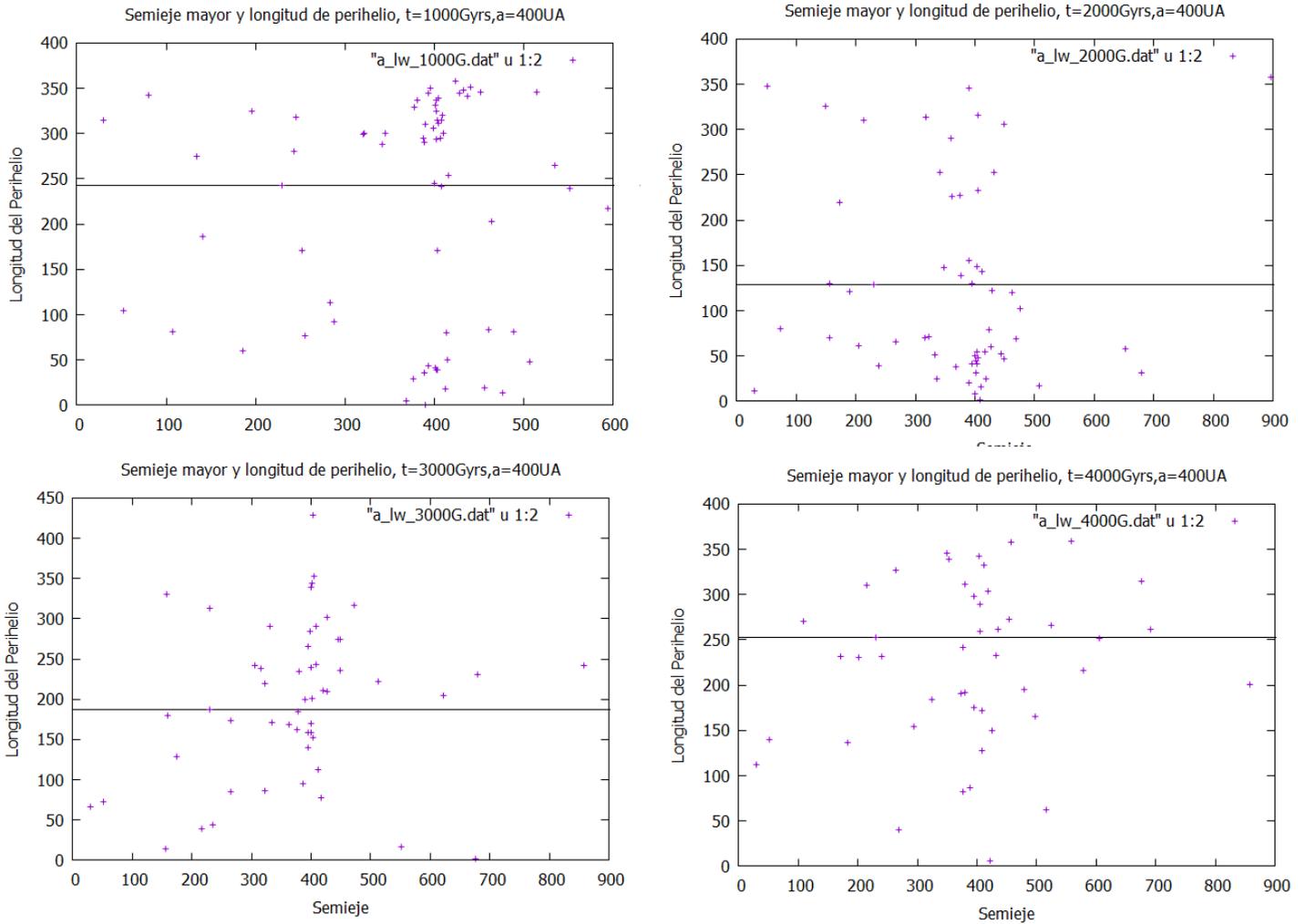


Figura 7. Análisis de la evolución de la longitud del perihelio en función del semieje cada 1000 millones de años para partículas con $a = 400 \text{ UA}$. La línea continua marca el valor de la longitud del perihelio para el planeta nueve.

En las cuatro figuras anteriores se observa un comportamiento similar para las partículas. A medida que el planeta nueve evoluciona en su longitud de perihelio se observa que existe un grupo de partículas que mantienen valores próximos en su longitud de perihelio. Es notoria la evolución por difusión del semieje mayor de las partículas en las cuatro integraciones.

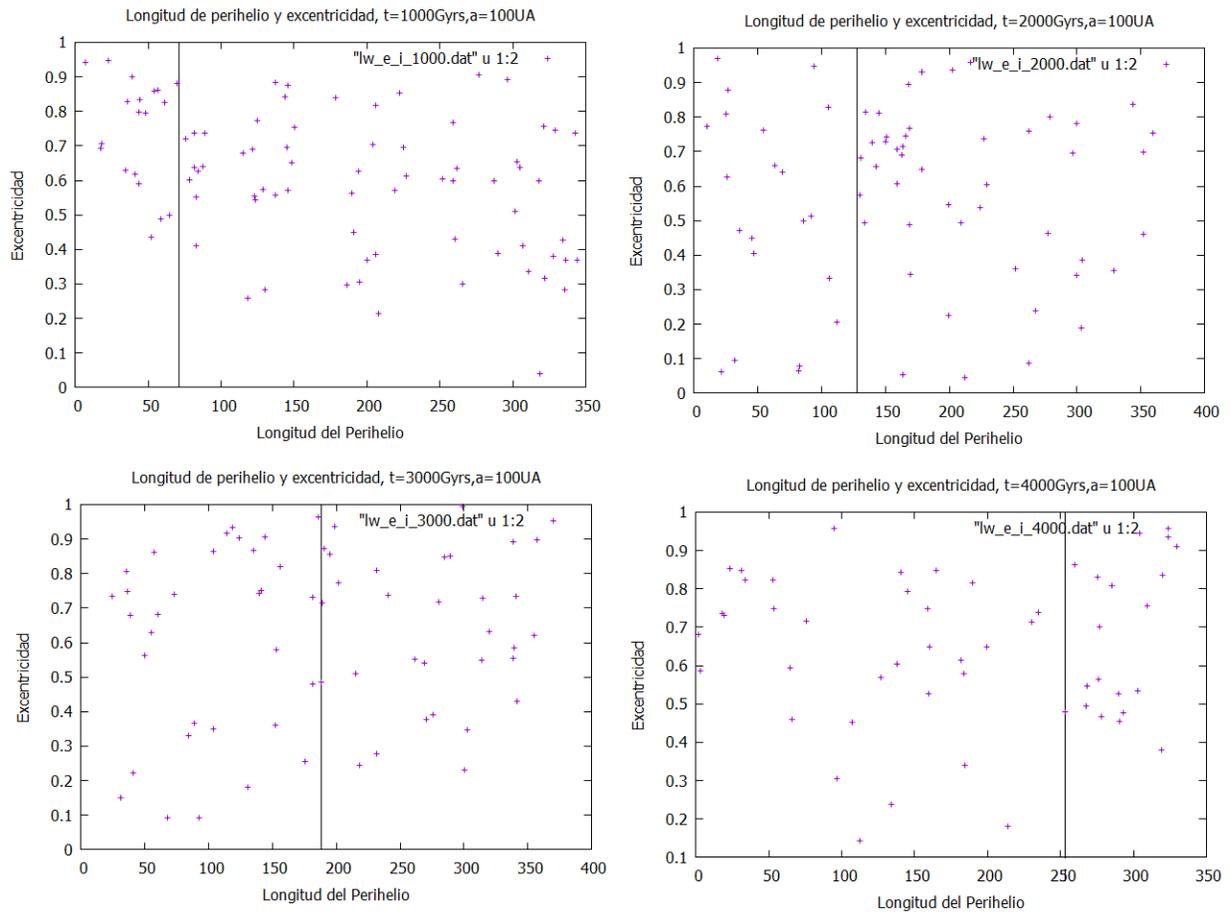


Fig 8 b. Evolución de la excentricidad en función de la longitud del perihelio cada 1000 millones de año para las partículas con $a=100\text{UA}$.

Un resultado interesante observamos en la figura 8 a, ya que se observa una concentración de partículas con valores cercanos a la longitud del perihelio del planeta nueve y altas excentricidades. Un comportamiento similar se observa en las figuras 9,10 y 11 , que se corresponden a las partículas con semiejes mayores de 200, 300 y 400 UA.

Para analizar si este agrupamiento tiene relación con el planeta 9, se construirán gráficas de (a,Ω) , (a,ω) y (a,ϖ) , para el retrato final de 4000 millones de años y se comparan con las mismos retratos para un sistema sin el planeta nueve.

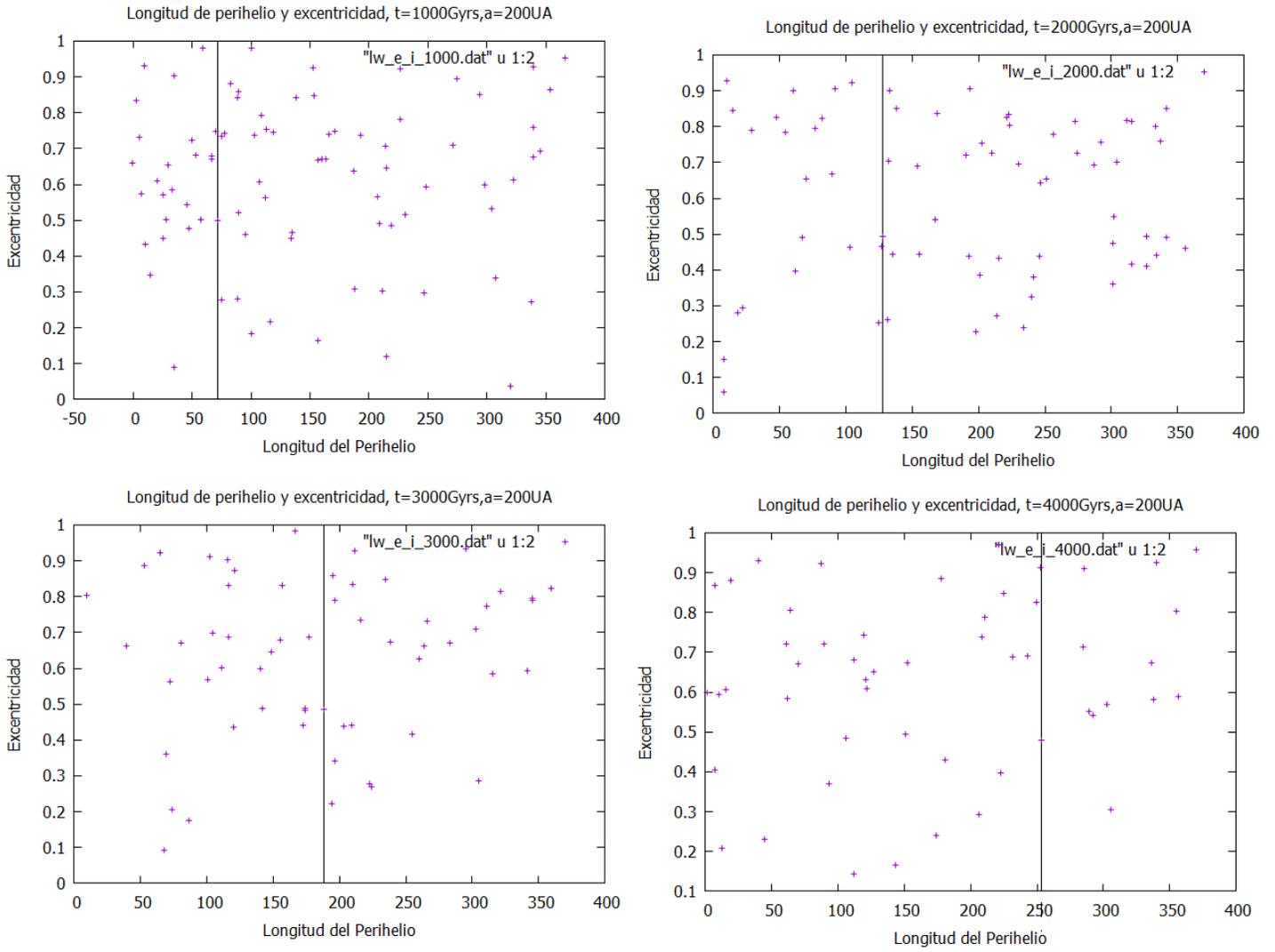


Fig. 9 Evolución de la excentricidad en función de la longitud del perihelio cada 1000 millones de año para las partículas con $a=200\text{UA}$.

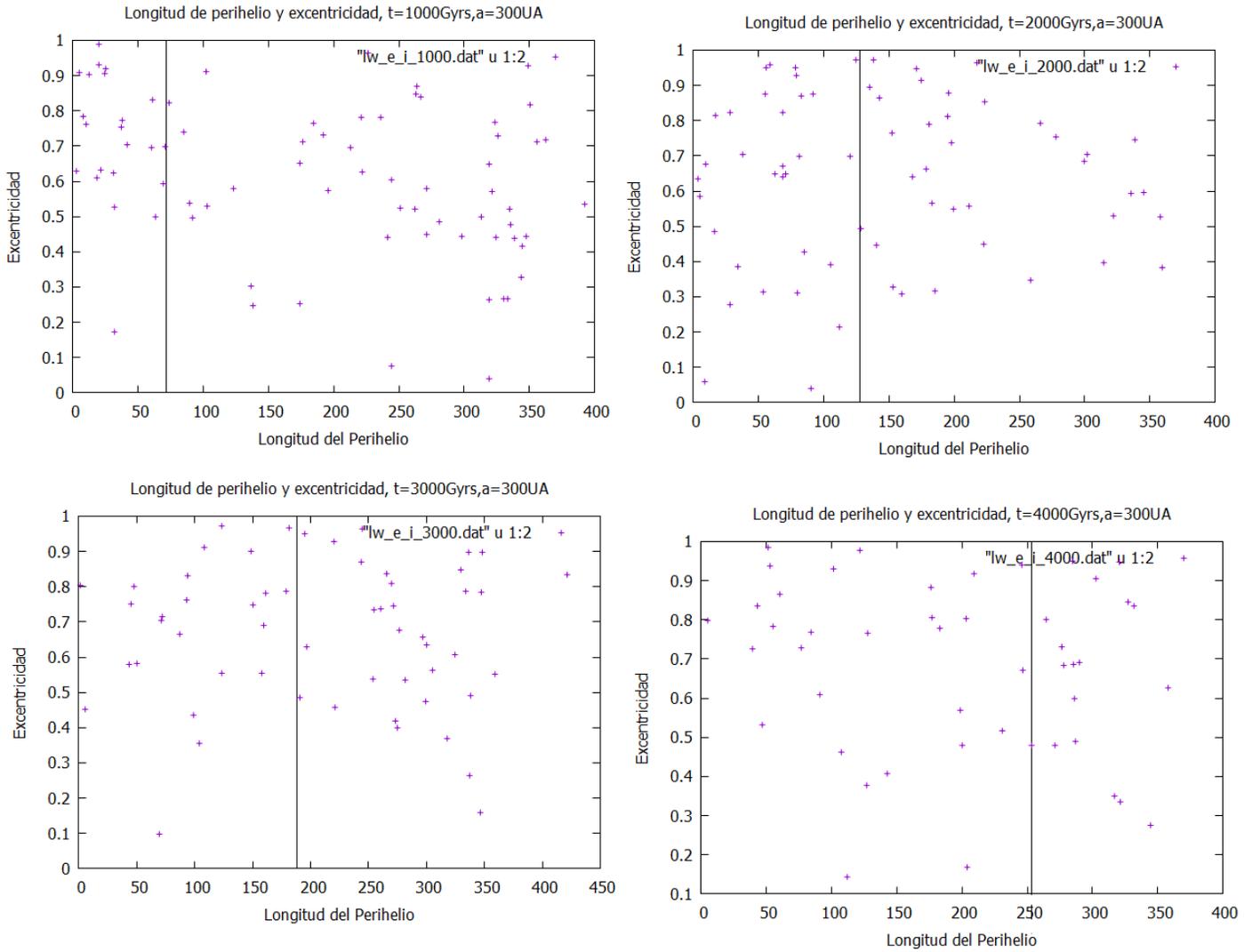


Fig. 10 Evolución de la excentricidad en función de la longitud del perihelio cada 1000 millones de año para las partículas con $a=300\text{UA}$.

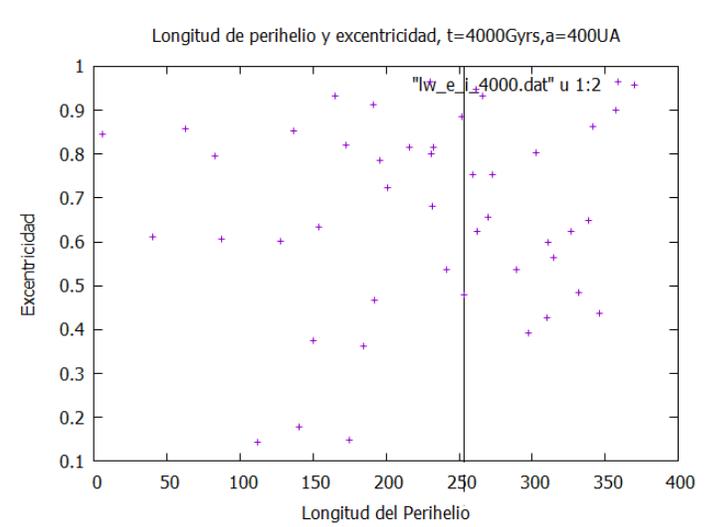
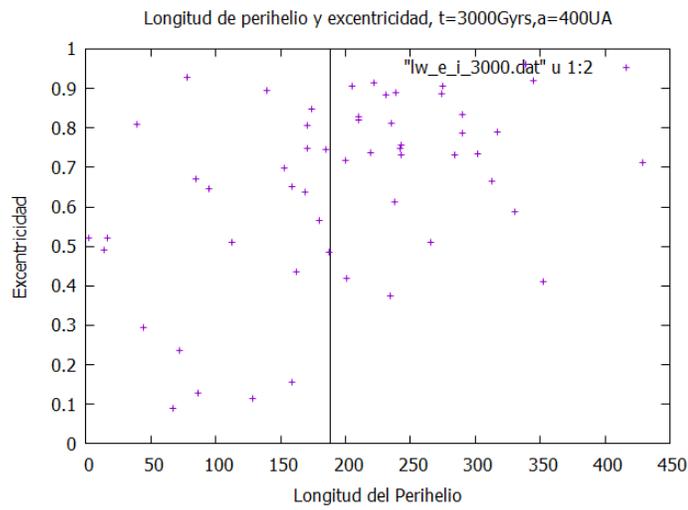
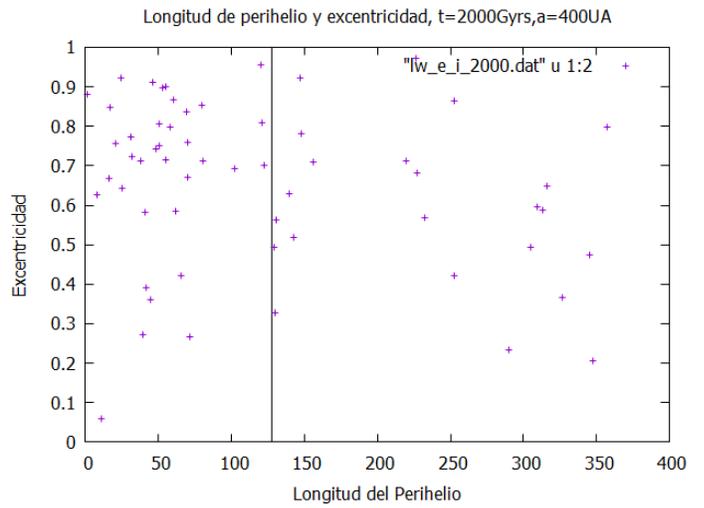
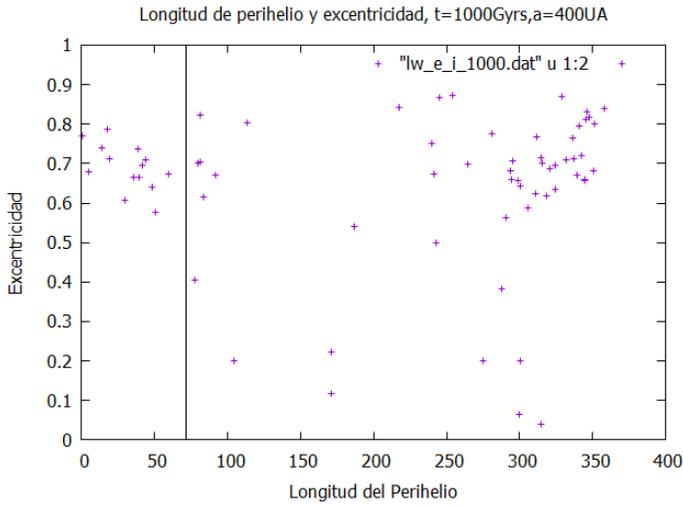


Fig. 11. Evolución de la excentricidad en función de la longitud del perihelio cada 1000 millones de año para las partículas con $a=400UA$.

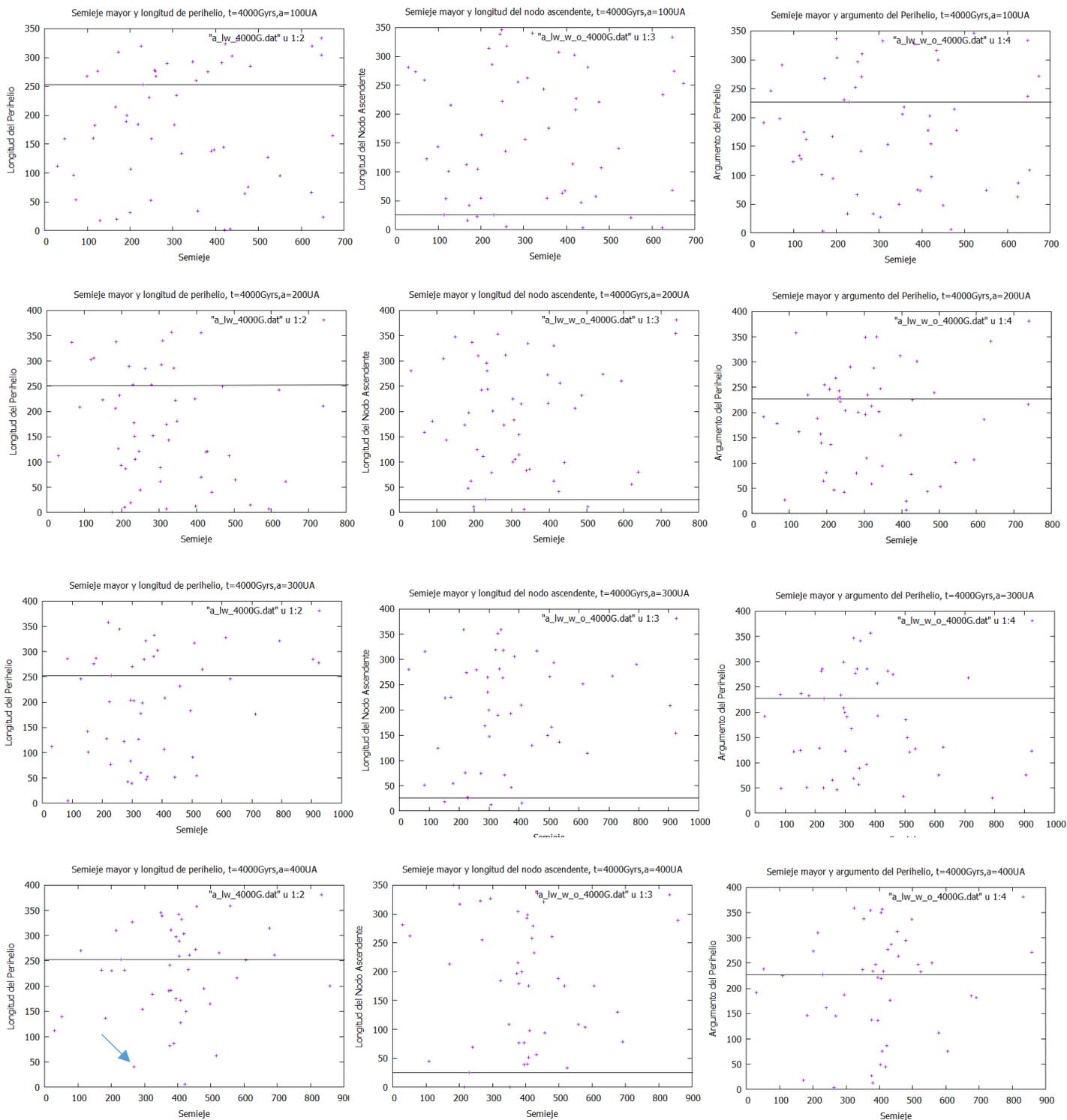


Fig. 12 a. Comparación de longitud del perihelio, longitud del nodo ascendente y del argumento del perihelio para el retrato en t=4000 millones de años.

En la figura 12 se puede ver la evolución conjunta de la longitud del perihelio y del nodo ascendente en conjunto con la evolución del argumento del perihelio. La línea continua marcada es el valor correspondiente de ϖ , Ω y ω respectivamente del planeta nueve. Se observan agrupaciones en torno al mismo para sus longitudes y argumento del perihelio y poca concentración alrededor de su valor de longitud del nodo ascendente. En la figura 12 b. se muestra la gráfica presentada por Trujillo y Sheppard(2014), con las mismas elementos orbitales graficados de todos los objetos conocidos con $q>30$ UA y $a>150$ UA. En la misma, se observan agrupaciones de

objetos alrededor de $\varpi \sim 215^\circ$, $\Omega > 90^\circ$ y $\omega \sim 315^\circ$. Es interesante que el objeto marcado en la figura 12 a, presenta características al objeto VP 2012(Varien): $a=269.3$ UA, $e=0.61$ y $\varpi=39,7^\circ$.

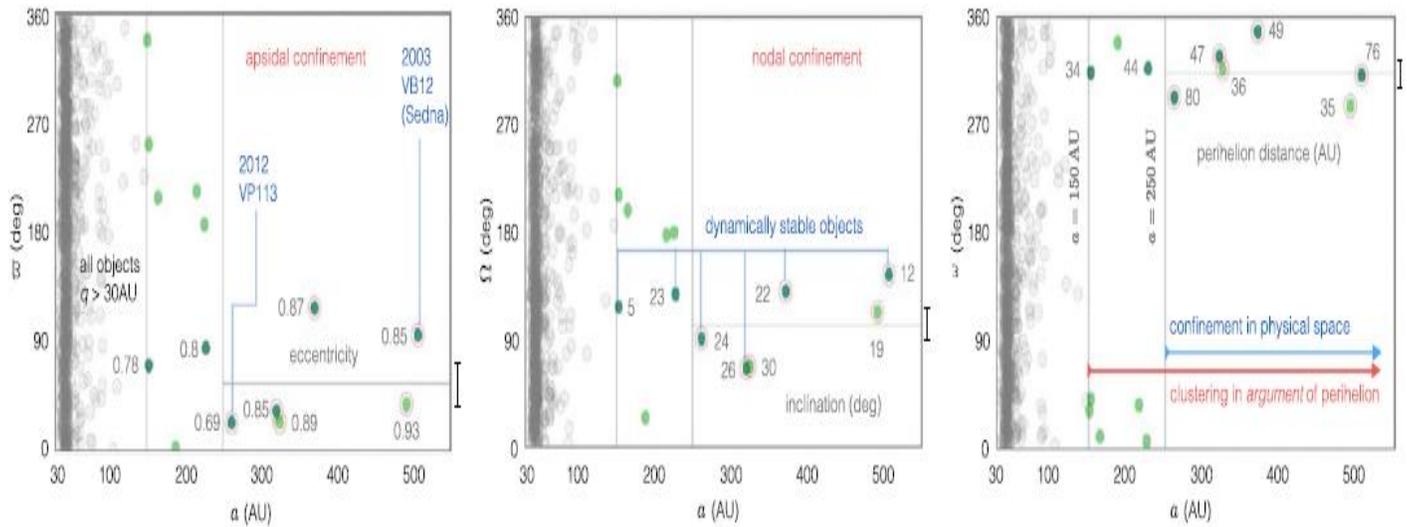


Figura 12 b. Análisis de Trujillo y Sheppard(2014), de los KBO con $q > 30$ UA y $a > 150$ UA influenciados por Neptuno.

La existencia de partículas que presenten agrupamiento en valores cercanos de sus longitudes de perihelio y del nodo ascendente no solo hará que crucen el plano de referencia en fase, sino que presentan una alineación física. Analizando los resultados se encontraron partículas con valores similares en sus longitudes de perihelio y nodo ascendentes que además están agrupadas. En la figura 13 se grafican las partículas con valores similares en ϖ y Ω . Se observa que existen agrupamientos cerca de $\varpi = \Omega = 250^\circ$ en las dos primeras imágenes y $\varpi = \Omega = 180^\circ$ en la última. Los cuatro retratos corresponden a $t=4000$ millones de años, donde $\varpi = 253.01^\circ$ y $\Omega = 25.66^\circ$ del planeta nueve.

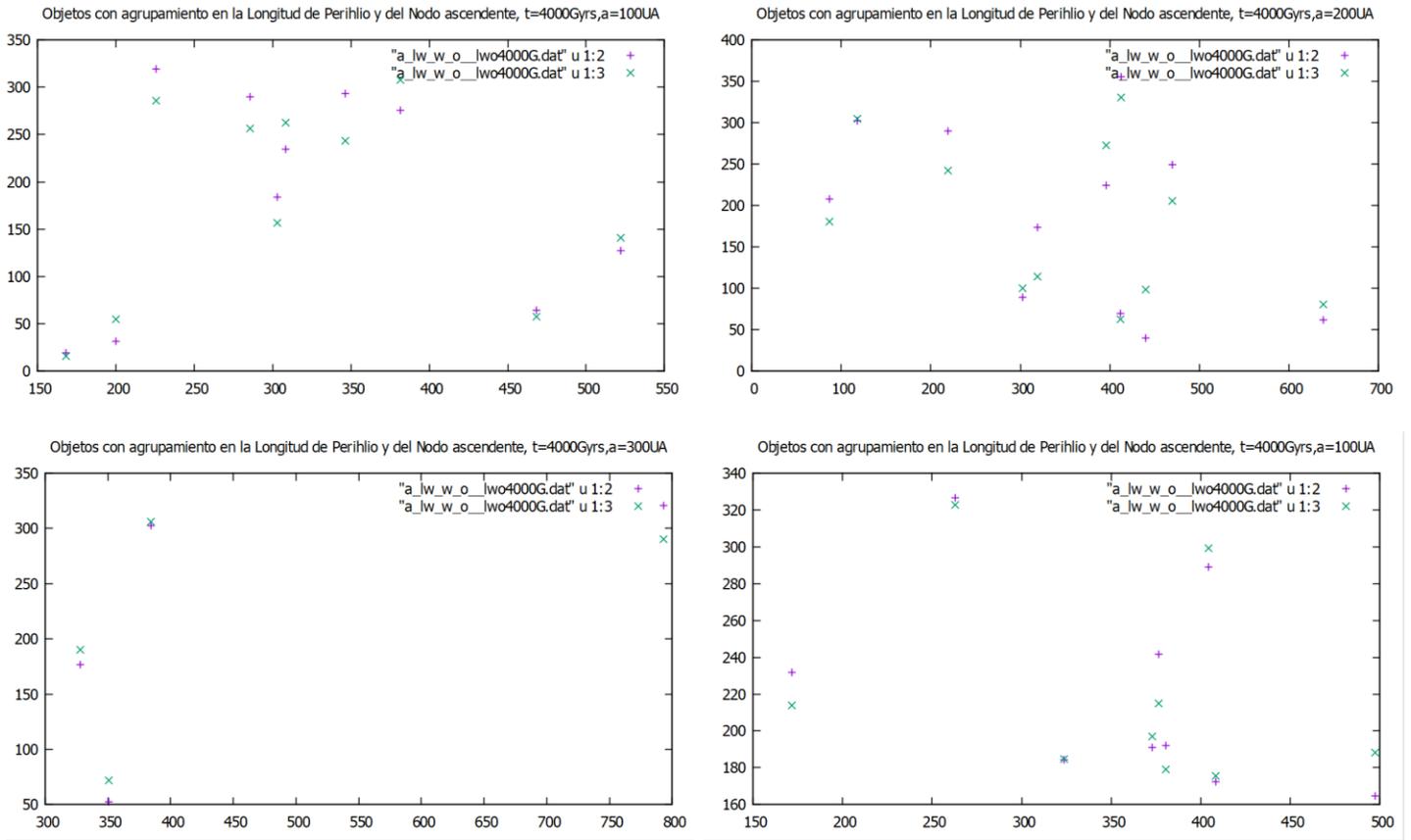


Figura 12. Agrupamientos en ϖ y Ω . En las dos primeras imágenes se observa un agrupamiento en torno del ϖ del planeta nueve.

Otras de las hipótesis interesantes manejadas por los autores del trabajo de referencia, es la existencia de un grupo de objetos cuyo perihelio se mantiene alineado a 180° del perihelio del planeta 9. Esto se puede observar en la figura 13, donde se buscaron los objetos son $\Delta\omega \sim 180^\circ$ del ω del planeta nueve.

En las figura 14 a 17 se observa la evolución de la inclinación de partículas con $a=100\text{UA}$, 200UA , 300UA y 400UA . Es verdaderamente interesante la inclinación alcanzada por las partículas, alcanzando incluso algunas órbitas casi retrogradadas.

Conclusiones

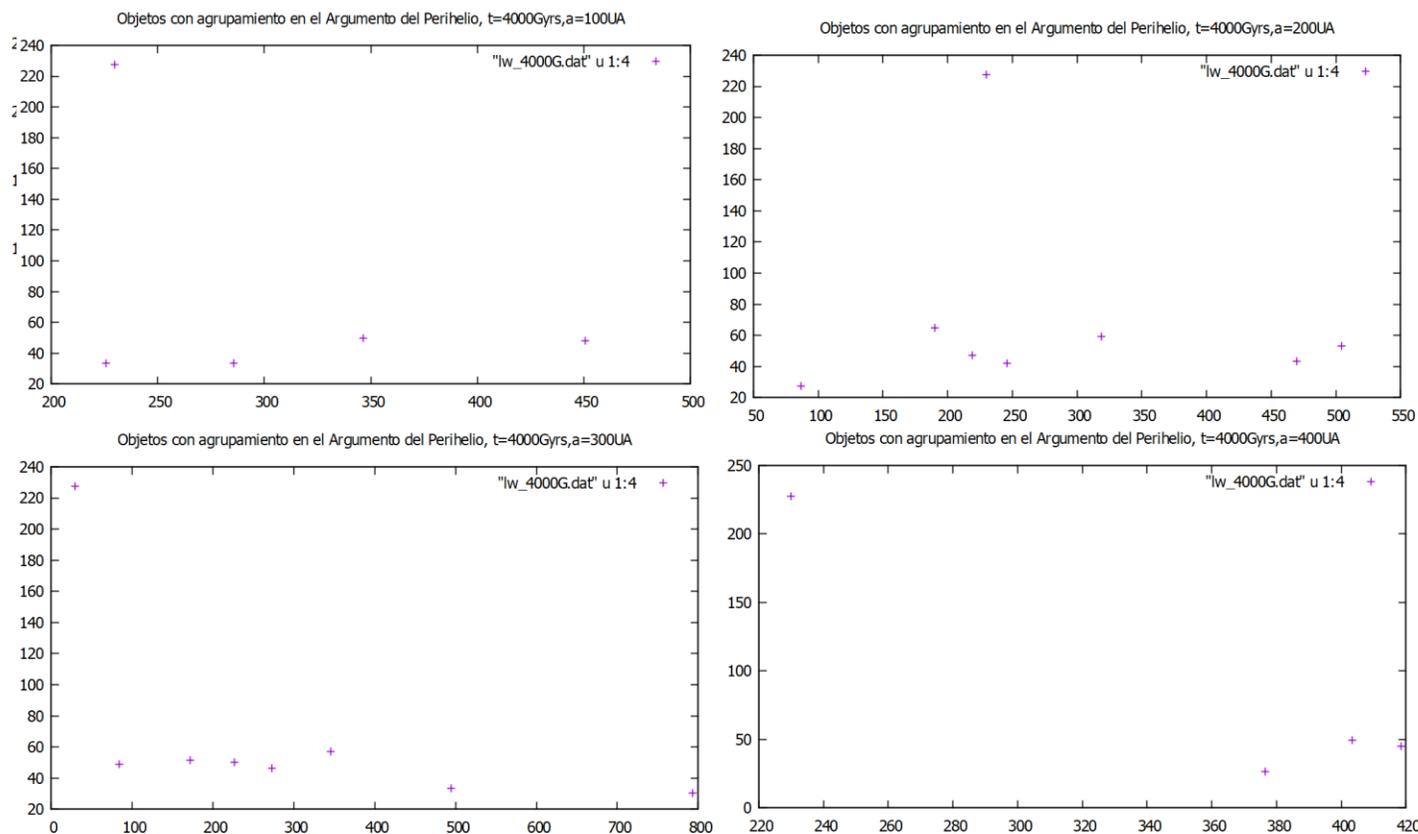


Fig. 13. Partículas que muestran una agrupación en su argumento de perihelio con $\Delta\omega \sim 180^\circ$.

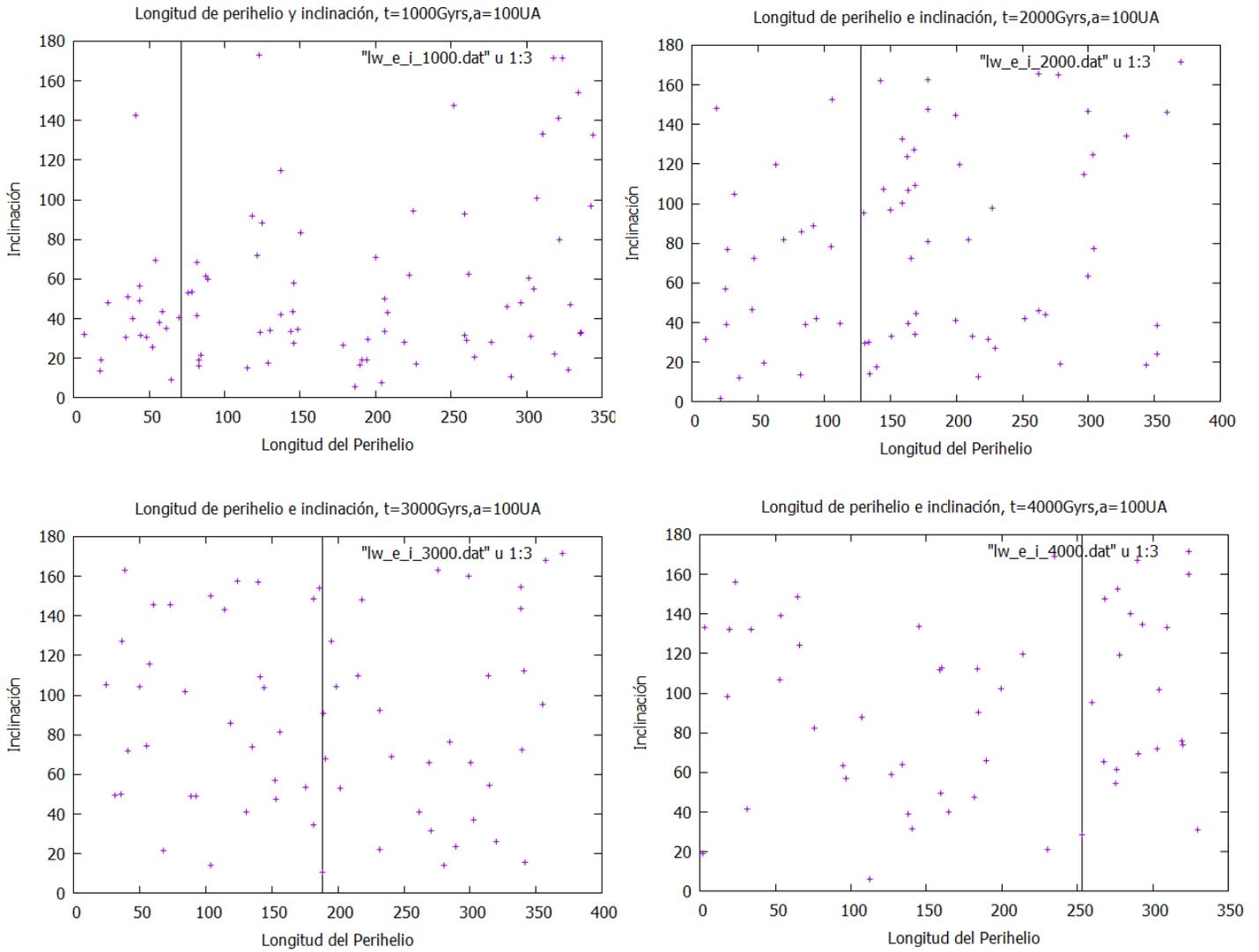


Fig. 14 Evolución de la inclinación para partículas con semieje mayor, $a = 100 \text{ UA}$.

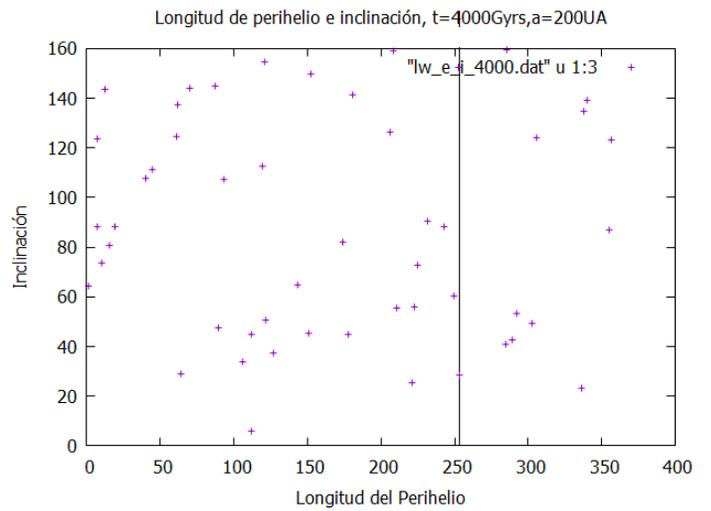
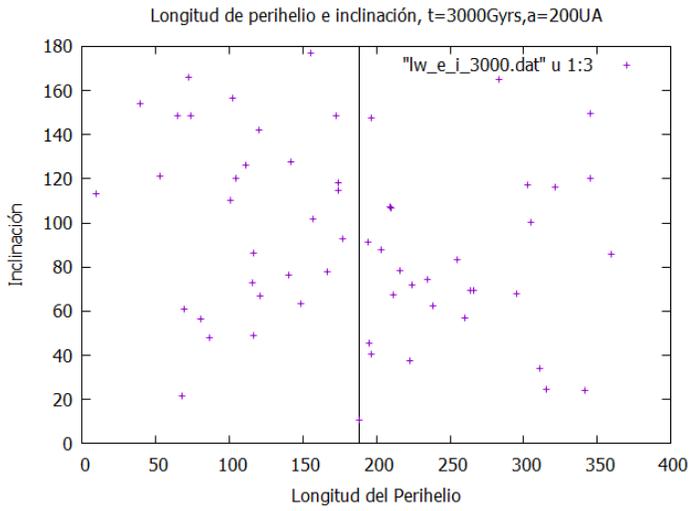
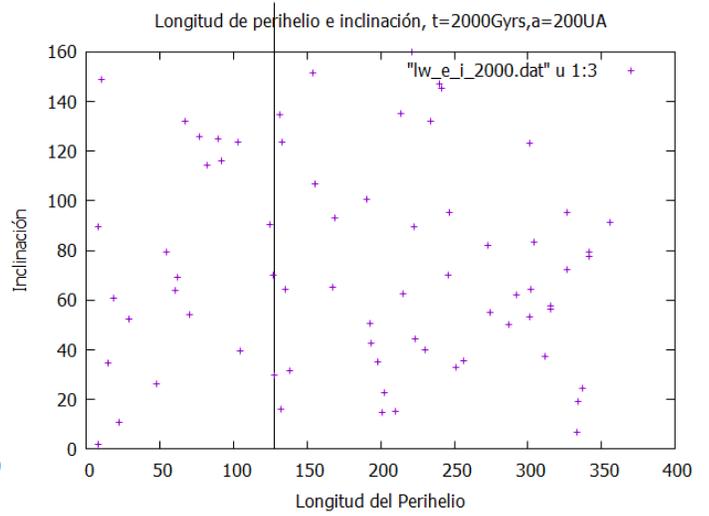
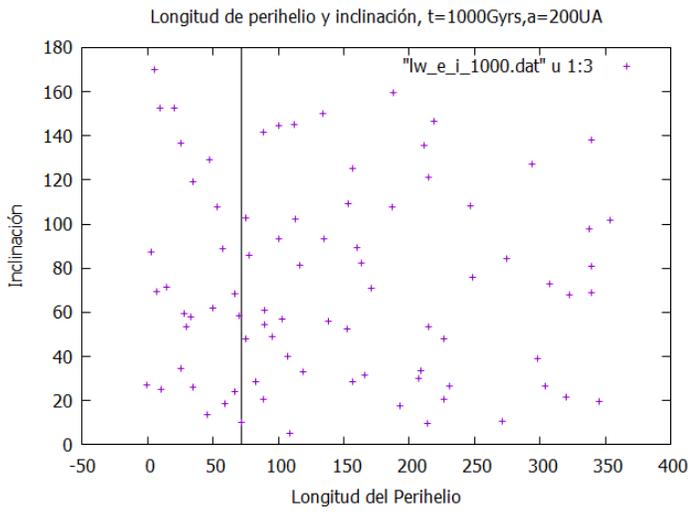


Fig. 15. Evolución de la inclinación para partículas con semieje mayor, $a= 200$ UA.

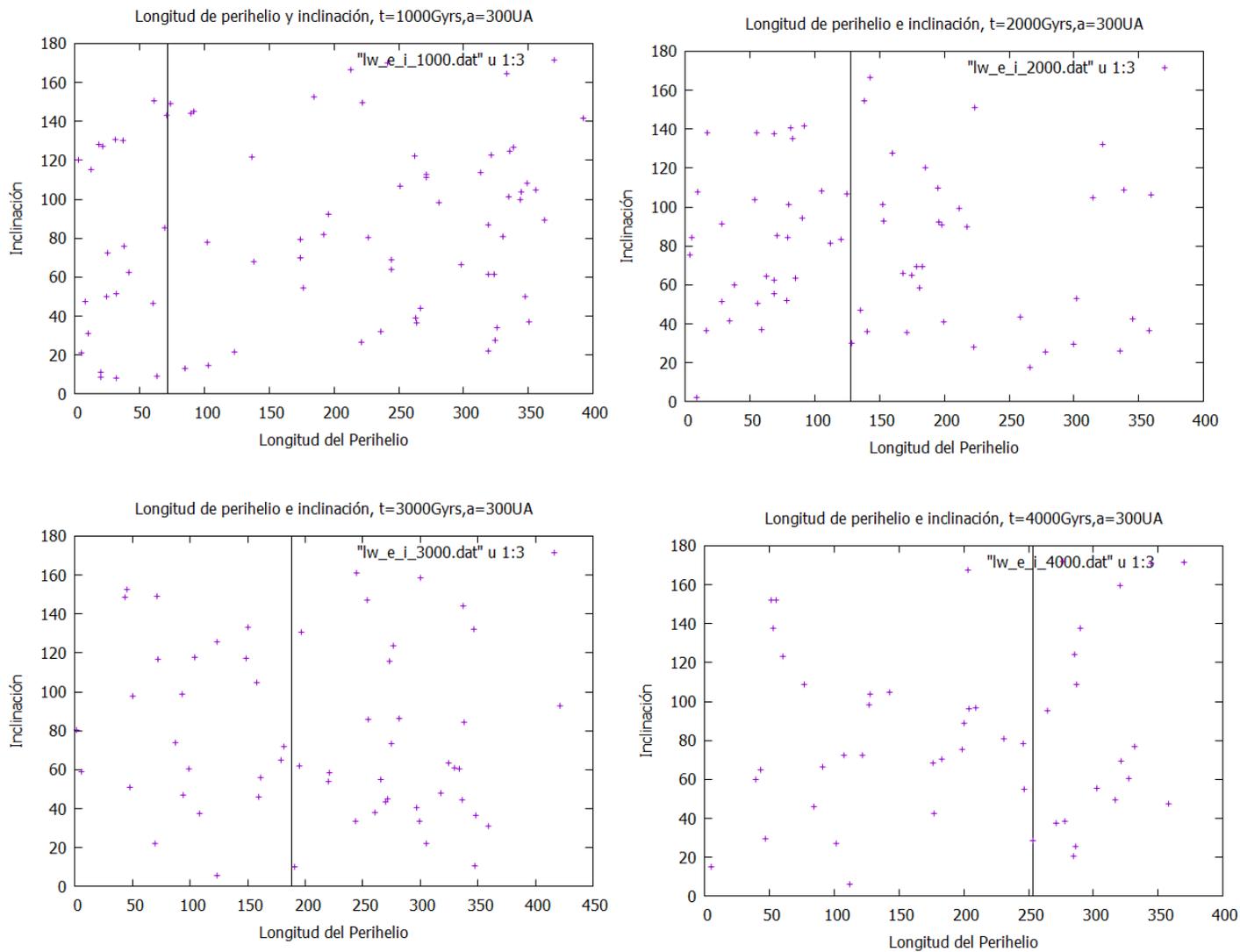


Fig. 16 Evolución de la inclinación para las partículas con semieje mayor, $a = 300 \text{ UA}$.

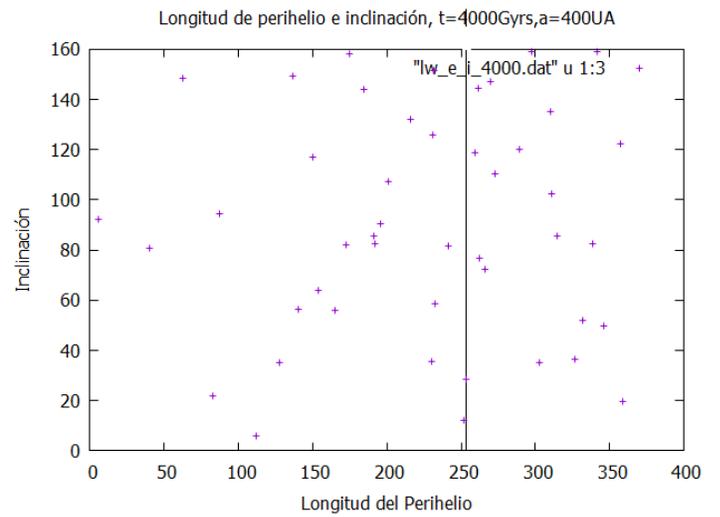
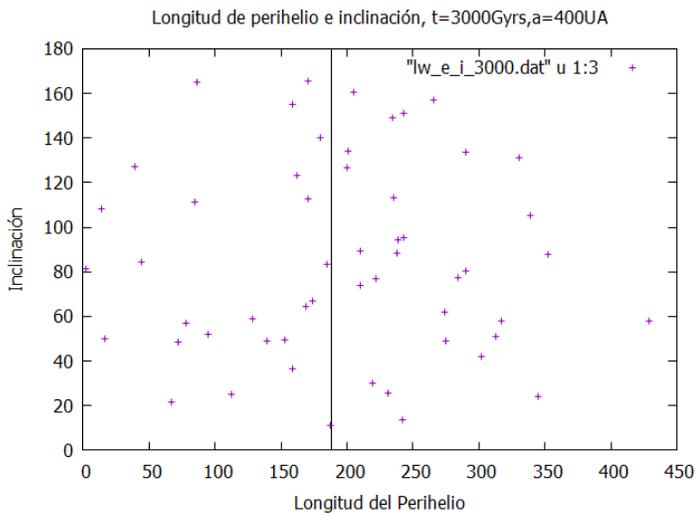
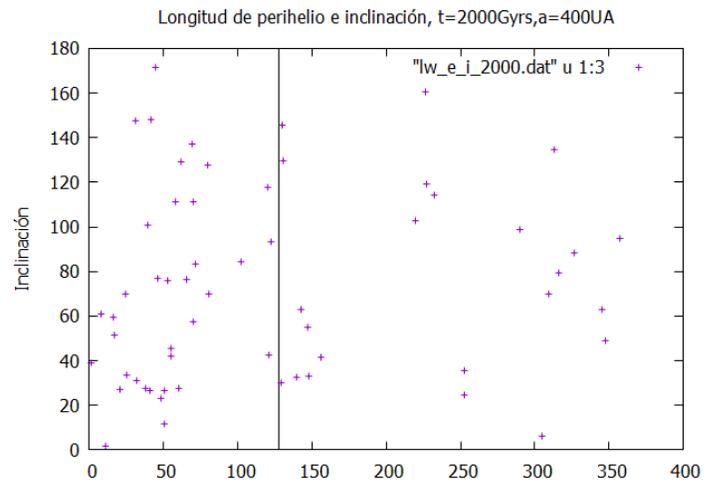
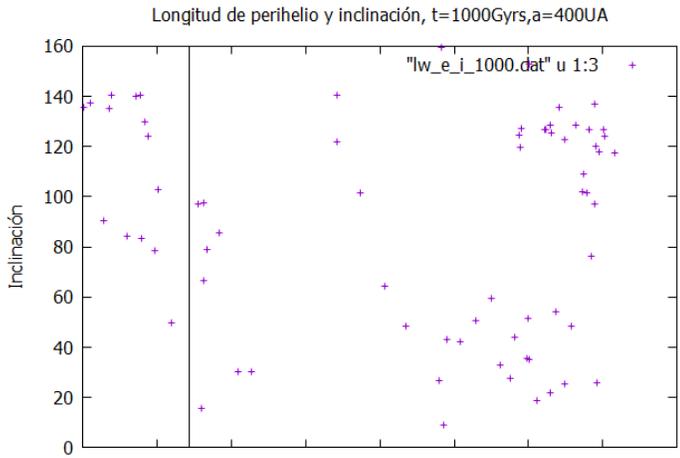


Fig 17. Evolución de la inclinación para partículas con semieje mayor, a=400 UA.