



Evolución de Objetos Interiores del Sistema Solar



Introducción

- Se realizó el estudio de objetos con órbitas interiores a la Terrestre (IEOs) por medio de integraciones numéricas.
- Para esta tarea se utilizó el integrador Evorb10 (versión mayo2002) de Brunini y Gallardo.
- Este estudio se realizó sobre tres poblaciones teóricas en tres etapas.



Primera Etapa

- Numero de partículas: 50
- Tiempo de integración: 17.0355 Myrs
- Paso de integración: 0.005 años
- Intervalo de escritura: 500 años
- Estudio de dos poblaciones según valores de semieje (a)
 $0.40035 < a < 0.6$ (UA)
 $0.73100 < a < 0.87$ (UA)



Elementos Orbitales iniciales

- $0.40035 < a < 0.6$ (UA)
- $0.73100 < a < 0.87$ (UA)
- $0.0023 < e < 0.025$
- $0.0002 < i < 3.23$
- Para elementos con $a \leq 0.4$ se deberian tomar en cuenta efectos relativísticos



Segunda Etapa

- Numero de partículas :54
- Tiempo de integración: 8 Myrs
- Paso de integración: 0.005 años
- Intervalo de escritura: 500 años
- Estudio del comportamiento de dos poblaciones particulares según valores de (a) procedentes de la primera etapa

$0.5695 < a < 0.64$ UA

$0.7312 < a < 0.825$ UA



Elementos Orbitales iniciales

- $0.5695 < a < 0.64$ (UA)
- $0.73120 < a < 0.8250$ (UA)
- $0.002 < e < 0.03$
- $0.0002 < i < 4.0$



Tercera Etapa

- Numero de partículas: 200
- Tiempo de Integración: ~ 10 Myrs
- Paso de Integración: 0.005 años
- Intervalo de Escritura: 500 años
- Estudio fino de dos poblaciones segun valores de semieje (a):
 - $0.5750 < a < 0.6760$ (UA)
 - $0.7600 < a < 0.8570$ (UA)



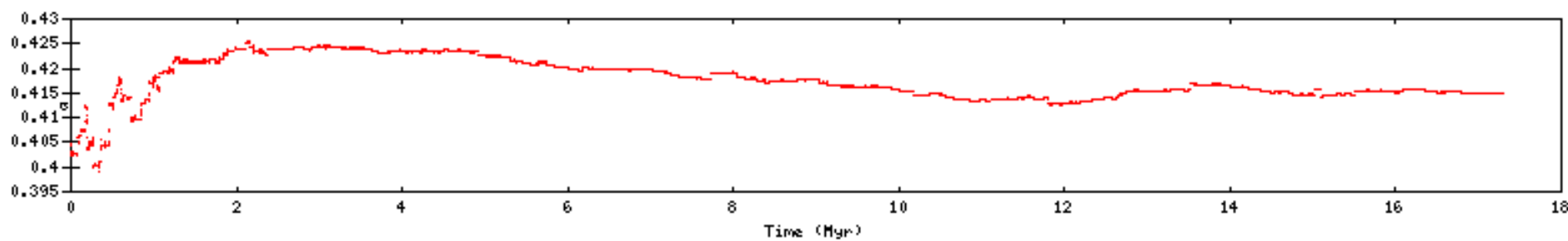
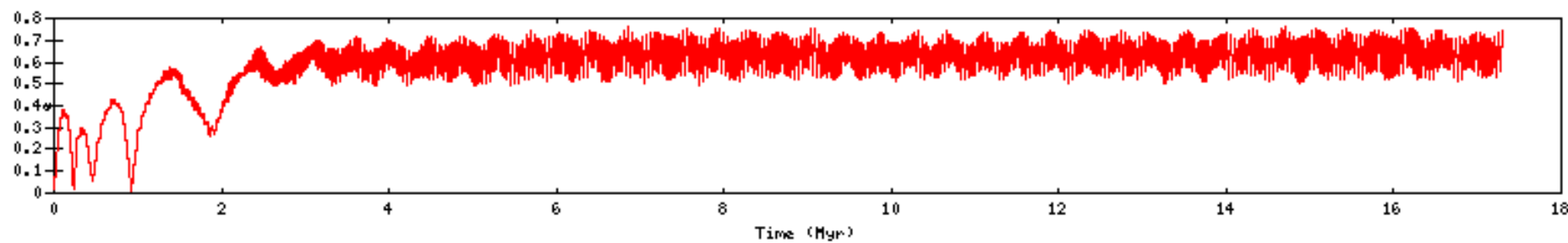
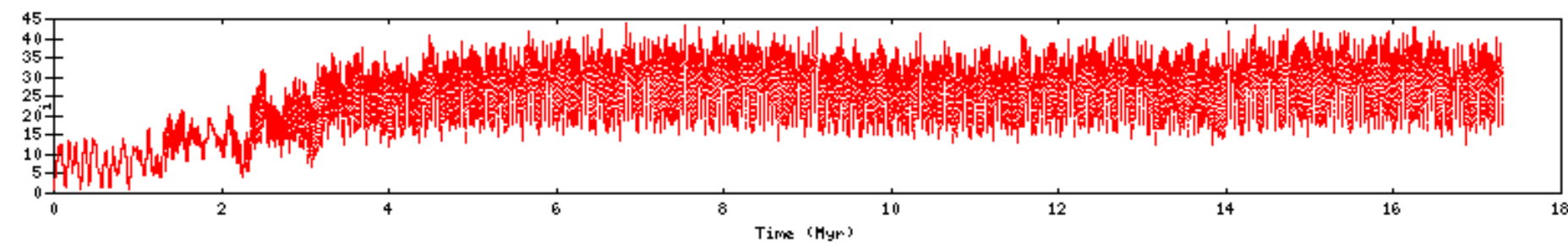
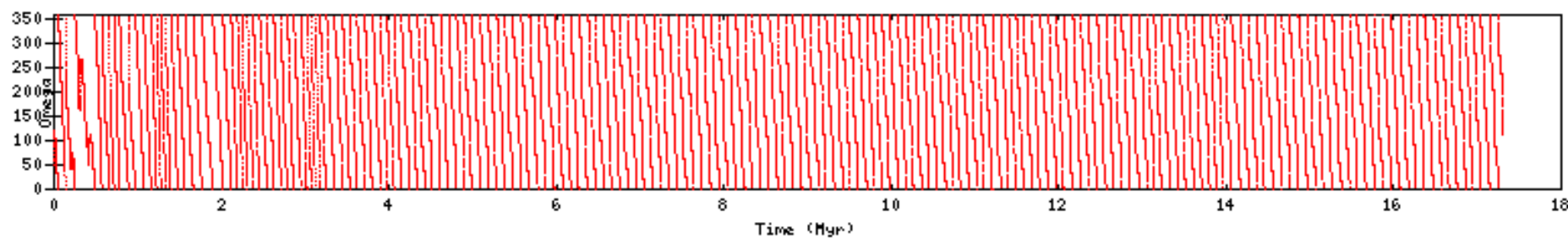
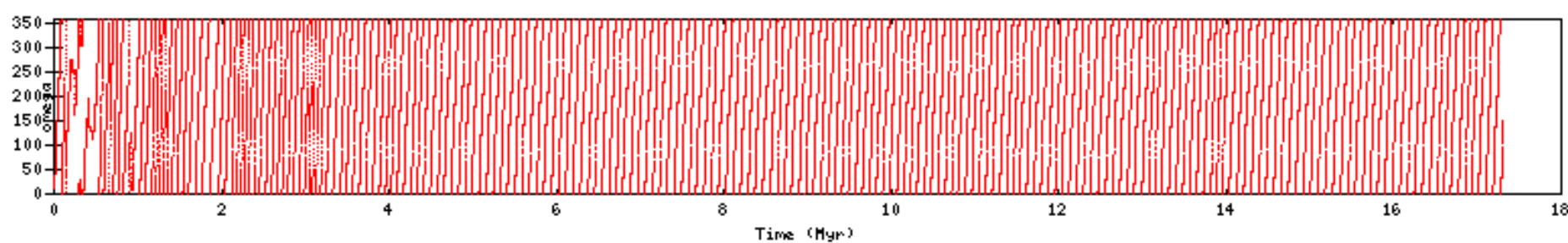
Elementos Orbitales Iniciales

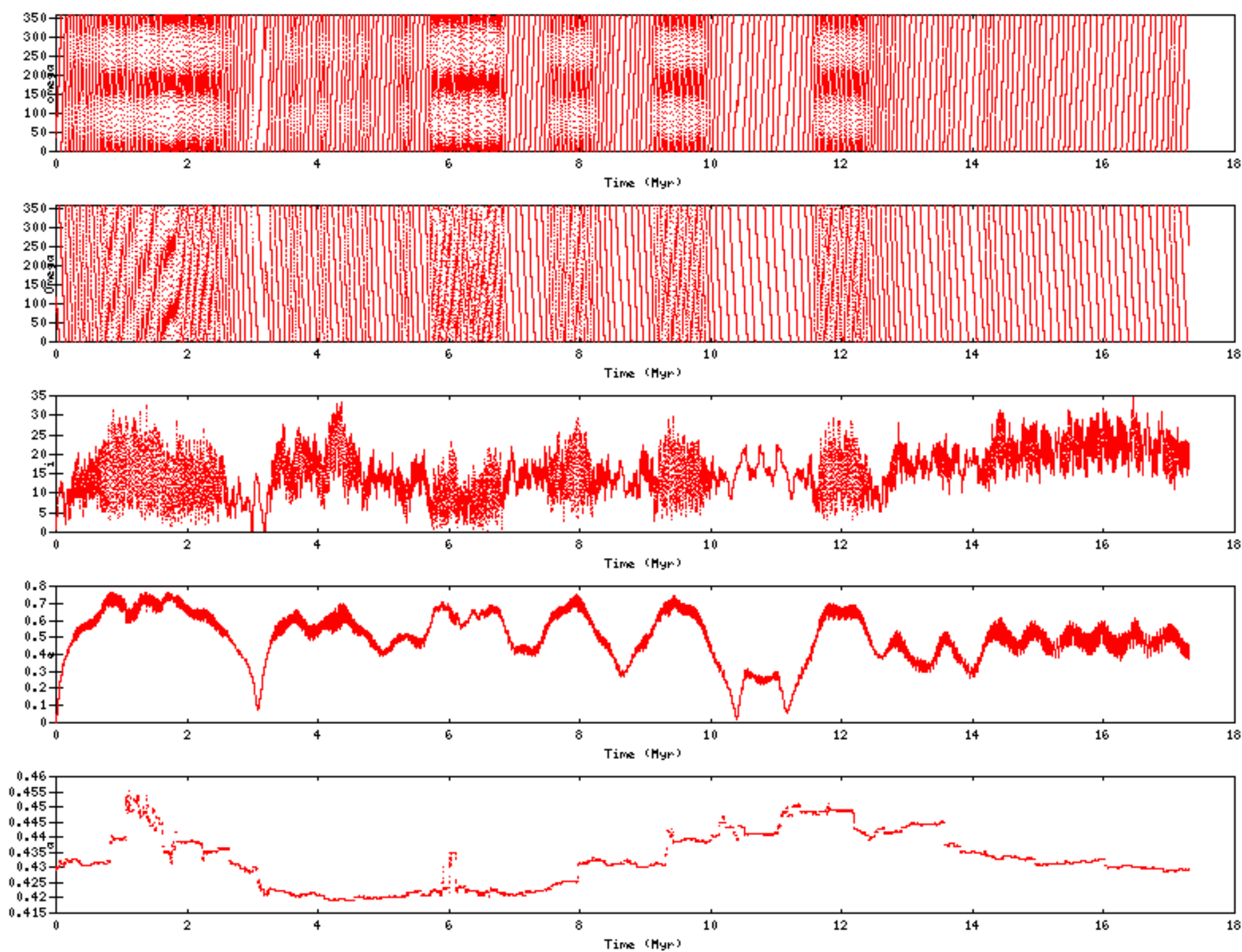
- $0.5750 < a < 0.6760$ (UA)
- $0.7600 < a < 0.8570$ (UA)
- Excentricidad: (e) 0.02
- Inclination: (i) 0.01

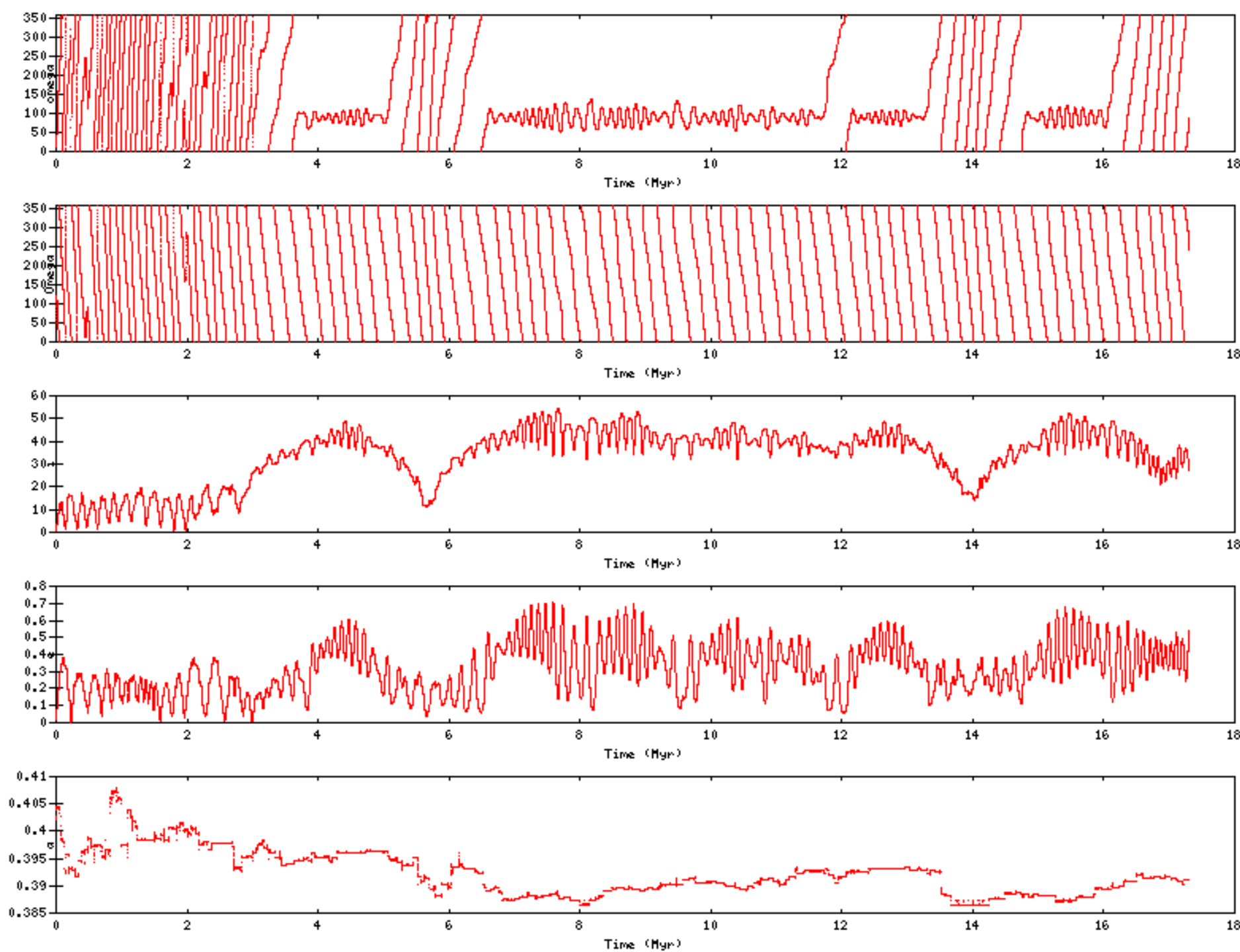


Primera Integración (elementos orbitales)

- $0.40035 < a < 0.6$ (UA)
- $0.73100 < a < 0.87$ (UA)
- $0.0023 < e < 0.025$
- $0.0002 < i < 3.23$









Primeros resultados

- Rápido crecimiento de valores de excentricidad e inclinación en menos de 0.5 Myr.

Para valores aproximados $0.42 < a < 0.44$
 $e \approx 0.8$

Variación de valores de excentricidad $0.6 < e < 0.9$
Para valores aproximados $0.45 < a < 0.50$

Incremento en inclinación $i_{\max} \sim 40^\circ$

- Largos periodos de caos



Se asocia el incremento de excentricidad e inclinación por proximidad a alguna resonancia secular.

- Se estudian las diferencias:

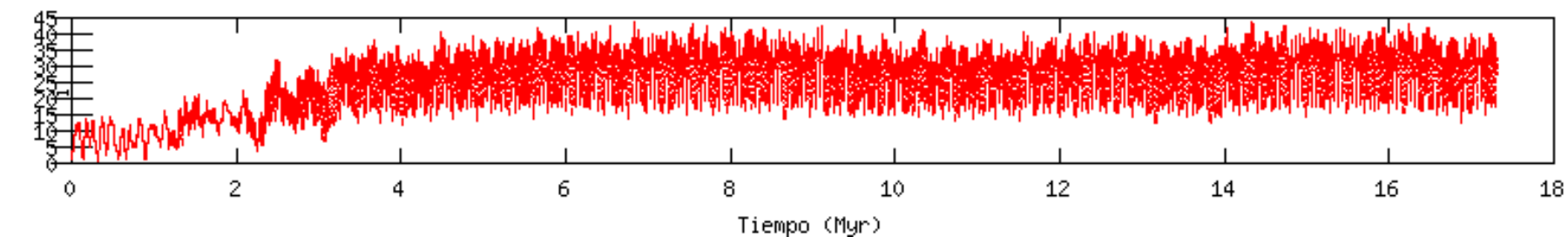
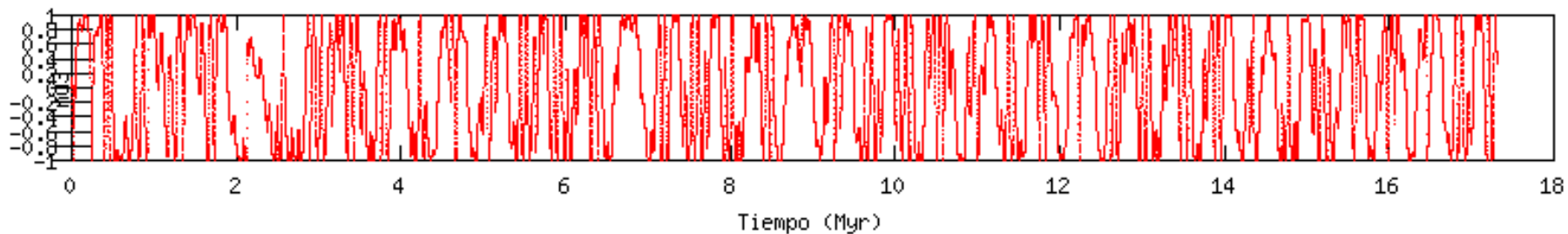
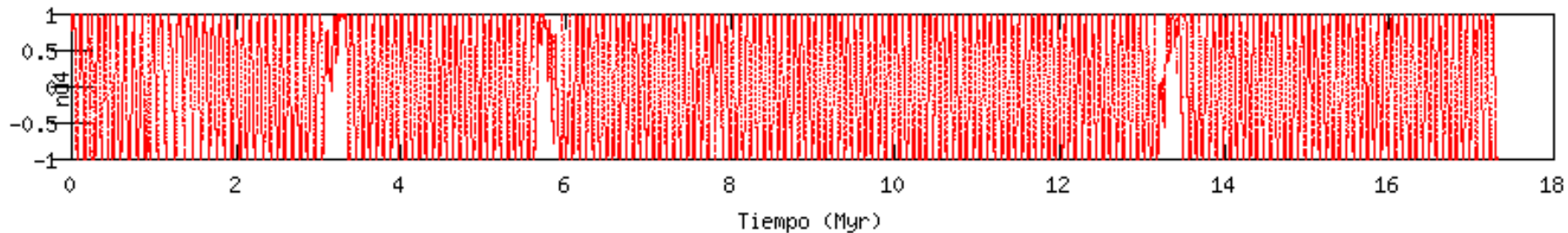
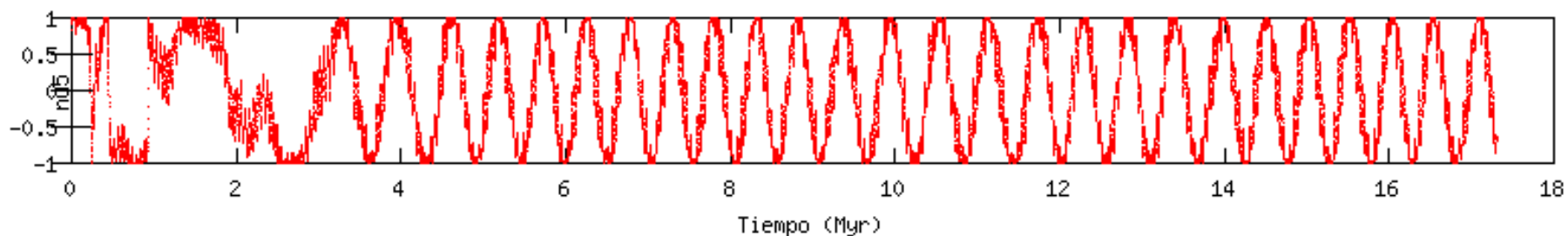
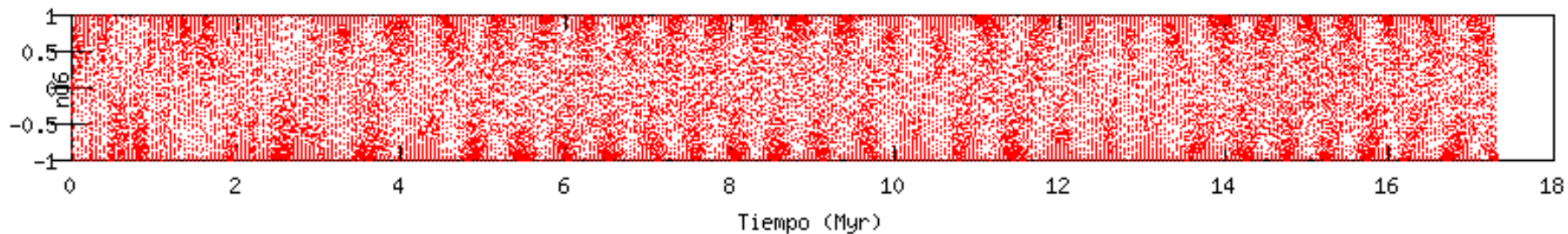
$$\Xi = \dot{\omega}_{\text{part}} - \dot{\omega}_{\text{planeta}} \quad \dot{\omega} \text{ long perihelio} \quad \dot{\omega} = \omega + \Omega$$

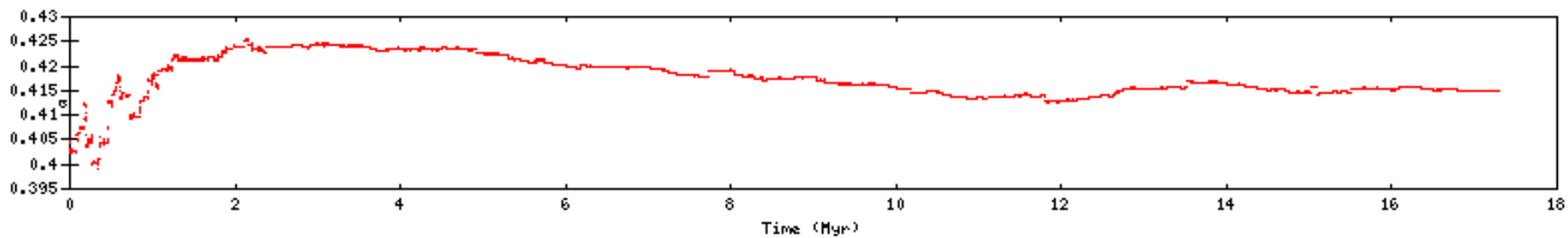
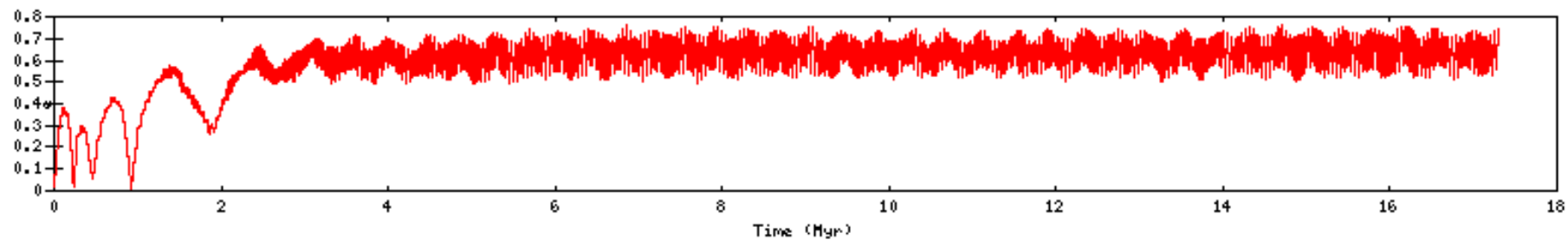
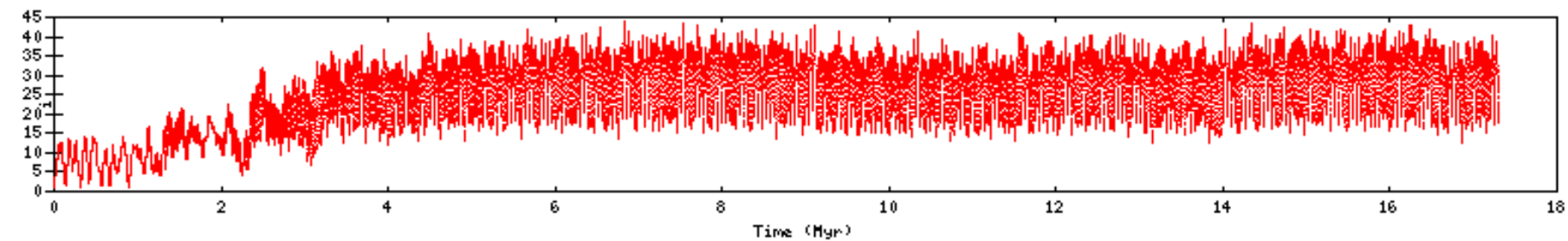
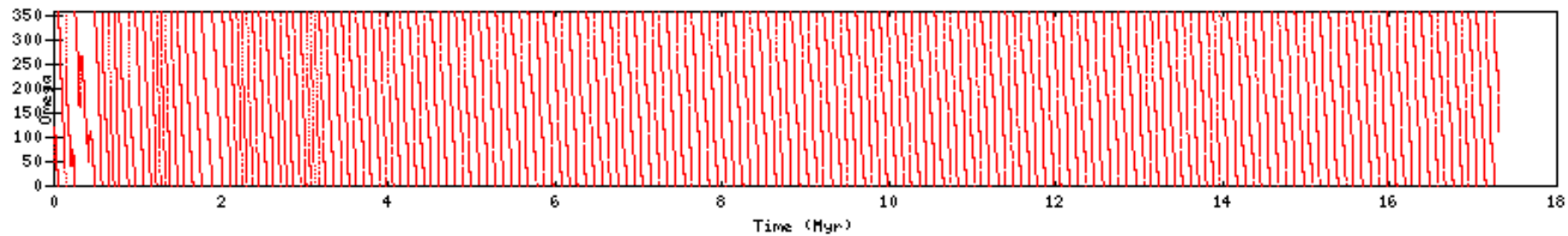
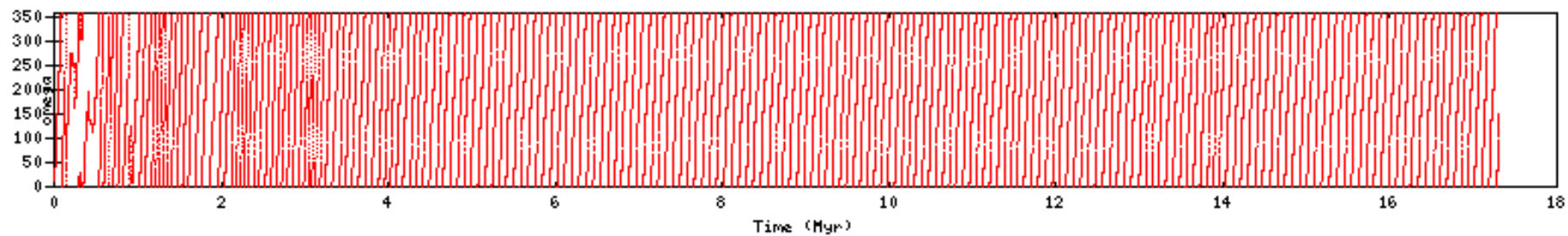
$$\Sigma = \Omega_{\text{part}} - \Omega_{\text{planeta}} \quad \Omega \text{ long nodos}$$

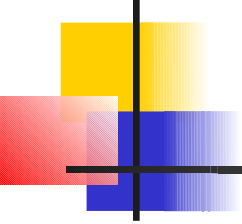
ω argumento de perihelio

Se grafica $\text{sen}(\Xi)$ y $\text{sen}(\Sigma)$

Ξ , Σ argumentos críticos para las frecuencias de presesión g_i y s_i respectivamente.



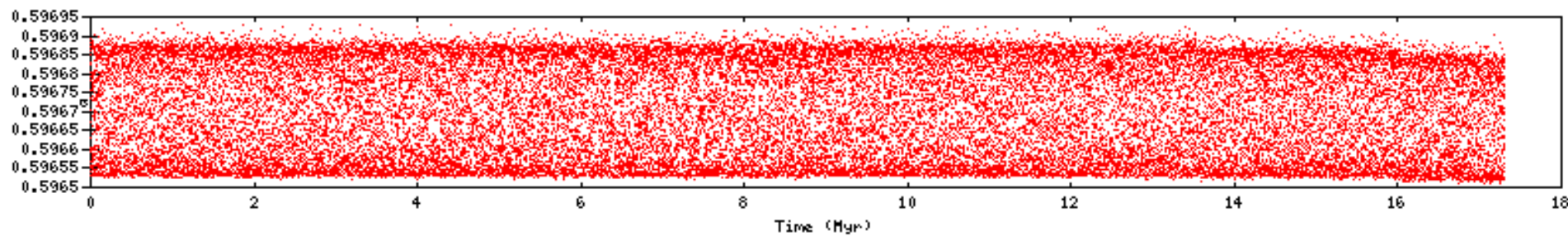
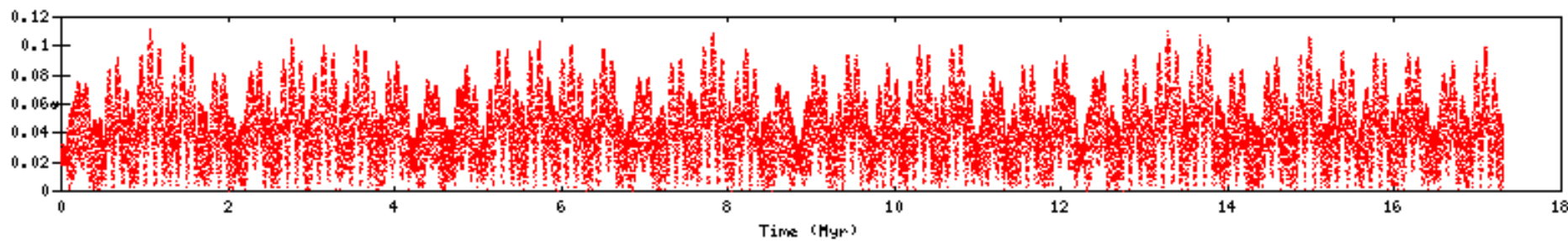
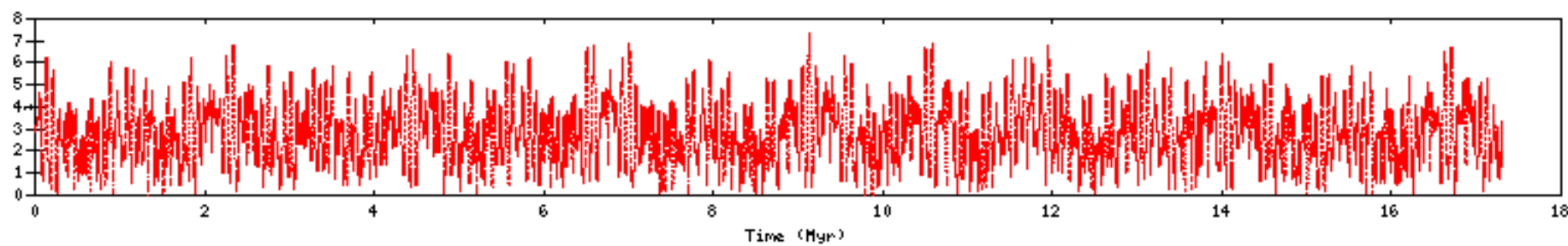
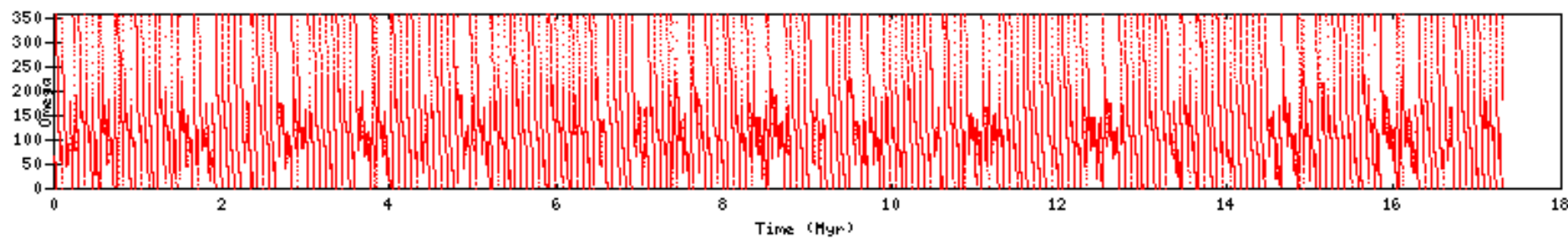
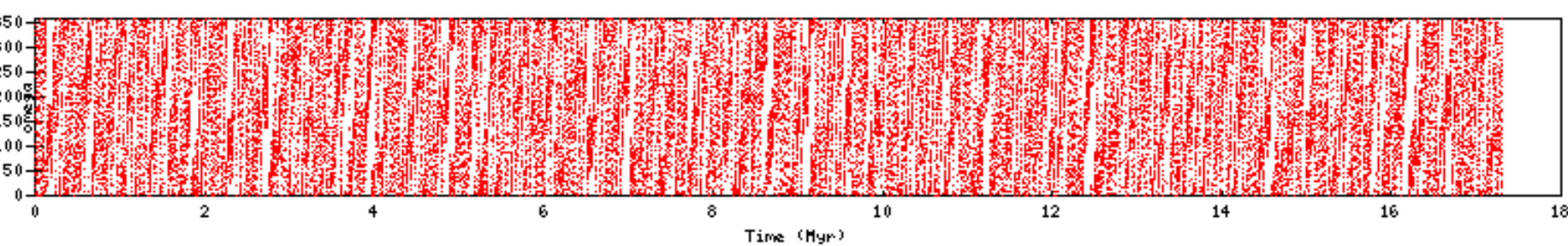


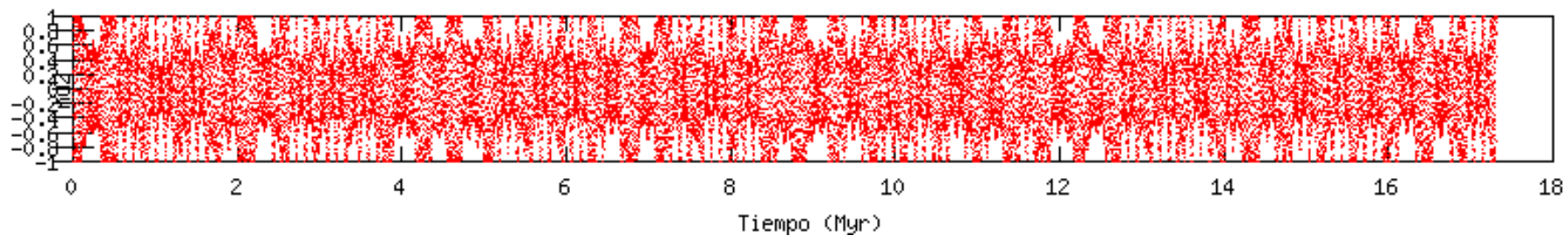
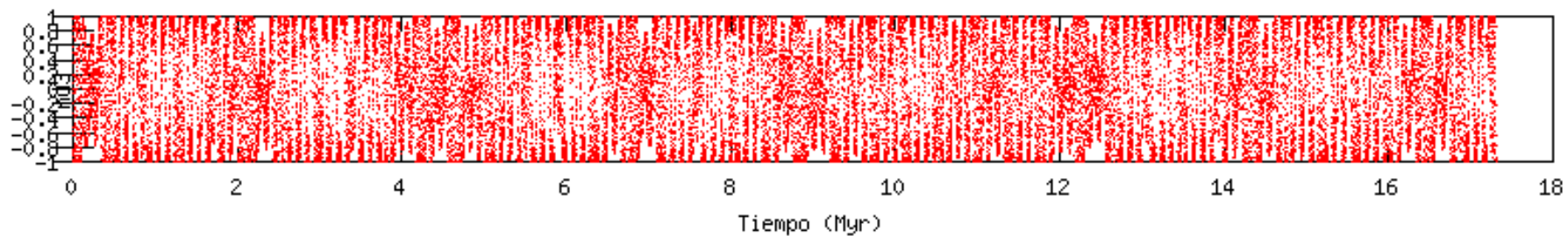
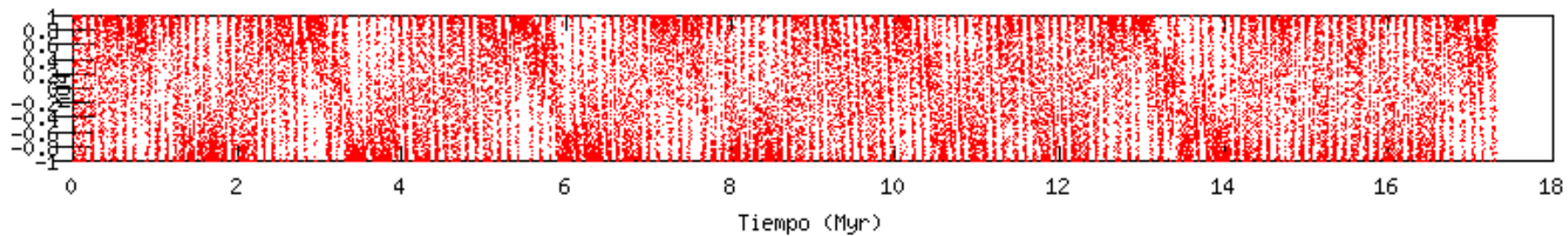
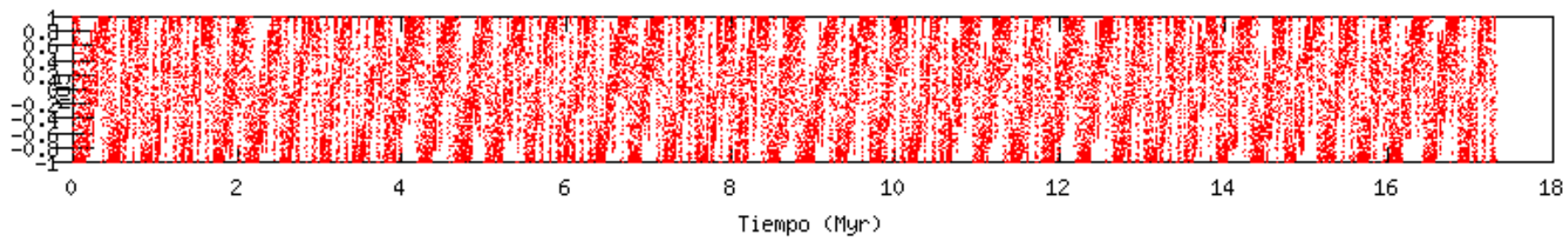
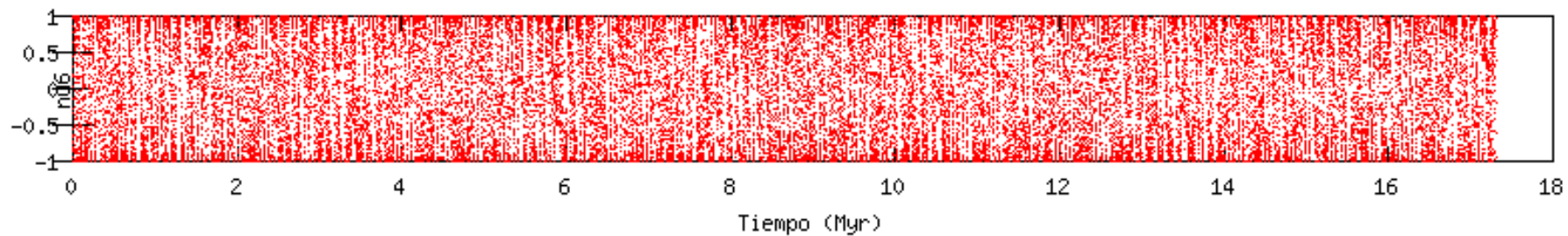
- 
-
- Se identifica la causa de los efectos en i y e debido a cercanía con ν_5
 - Para valores aproximados $0.42 < a < 0.6$
 - Se verifica la complejidad dinámica de esta región con $a < 2$ y la presencia de resonancias seculares con los planetas interiores
 - Se verifica la proximidad con otras res. como ν_{14}
 - Presencia de resonancia de Kozai con ω librando en 90°
 - Población con una vida media alta $T > 17$ Myrs

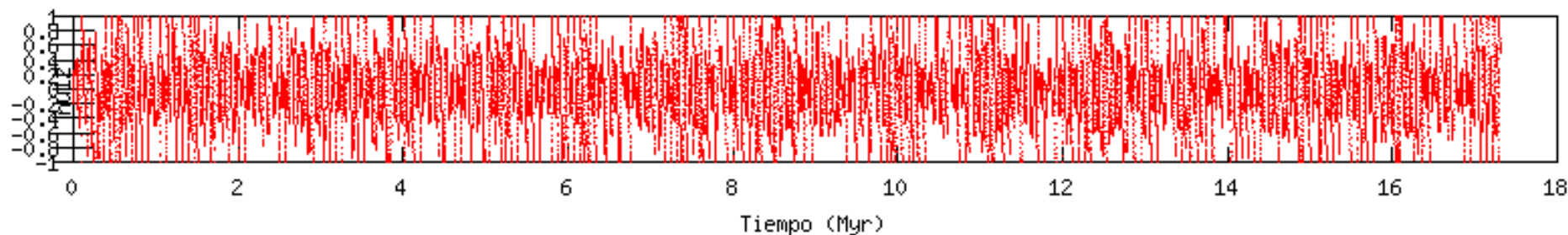
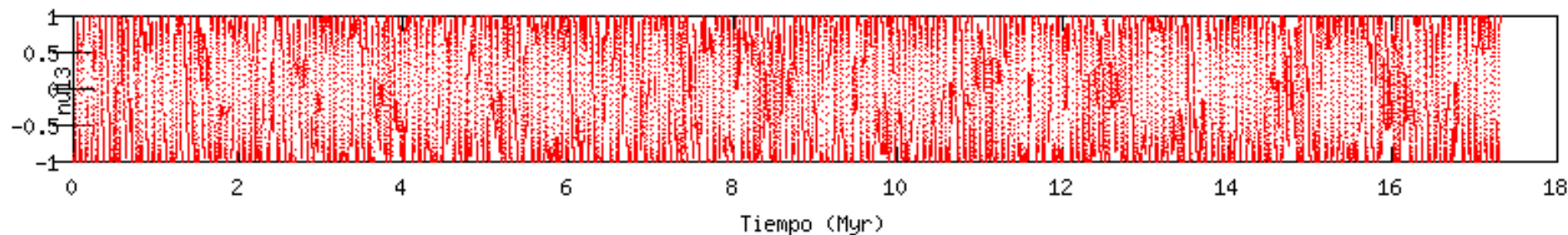
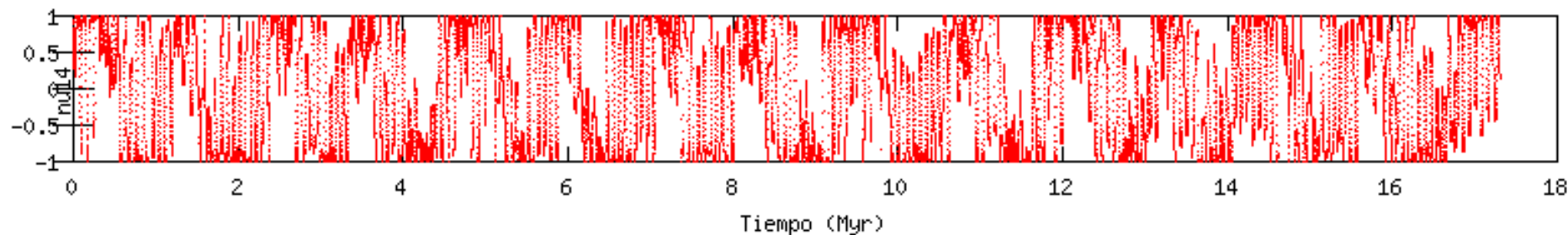
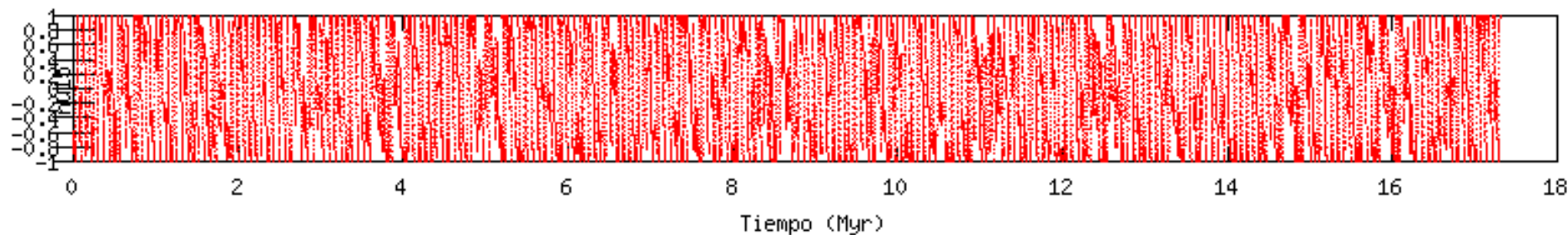
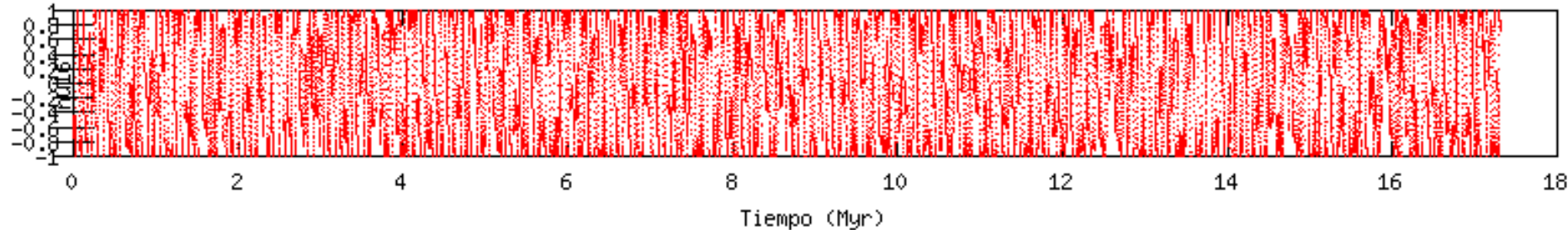


Objetos Interesantes

- Objetos 45a, 46a y 57a presentan valores de semieje prácticamente constantes ($a_{\text{inicial}} = a(t)$)
- 0.589 UA , 0.8 UA , 0.596 UA respectivamente.
- Excentricidades e Inclinaciones bajas durante toda la evolución del sistema
 - $e \leq 0.1$
 - $i \leq 10$
- Se estudian los argumentos críticos Ξ y Σ para estos objetos









Objetos interesantes y primeros resultados

- Clara presencia de ν_2 y ν_{12} para part. 46a, partículas 45a y 57a en res. ν_2 (se observa clara circulación del argumento crítico entorno de 0)
- Surgen pequeñas diferencias con los diagramas propuestos por Michel & Froeschlè en la ubicación de resonancias seculares
- Ejemplo: ubicación de ν_{12} en el espacio (a, i)
- Presencia de resonancia de Kozai en altas inclinaciones con ω librando en 90°
- Se propone una segunda etapa para el estudio de nuevos objetos con similares características



Segunda Etapa (elementos orbitales)

- $0.5695 < a < 0.64$ (UA)
- $0.73120 < a < 0.8250$ (UA)

- $0.002 < e < 0.03$

- $0.0002 < i < 4.0$



Primeros Resultados

- El 65% de la población (54 partículas) permanece estable durante toda la evolución del sistema.
- $e < 0.11$
- $0 < i < 12$
- $a_{\text{inicial}} = a(t) \quad \Delta a < 0.005$
- Fuerte presencia de v_2 y v_{12} en
 $0.59642 < a < 0.64$ (UA)
 $0.7746 < a < 0.8154$ (UA)



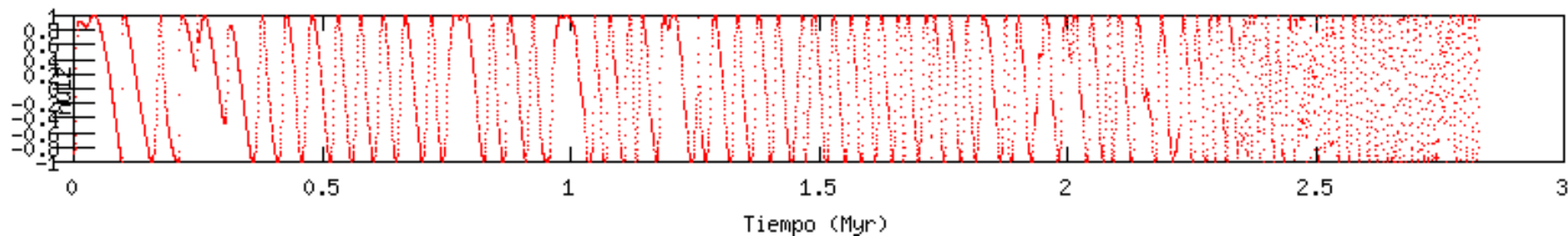
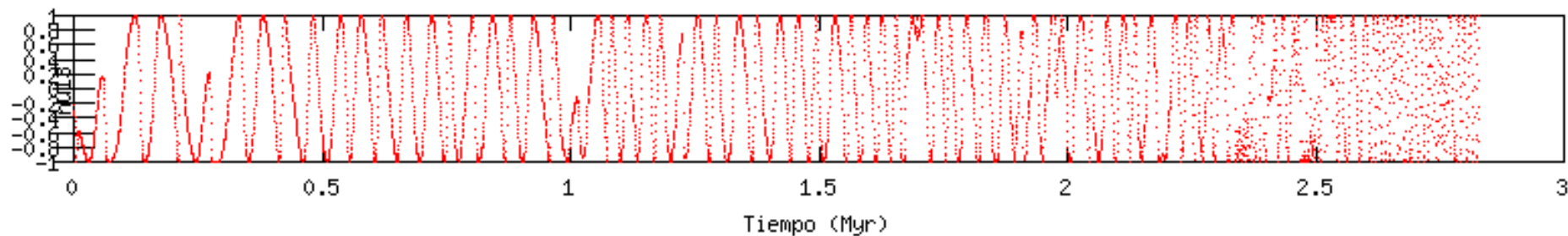
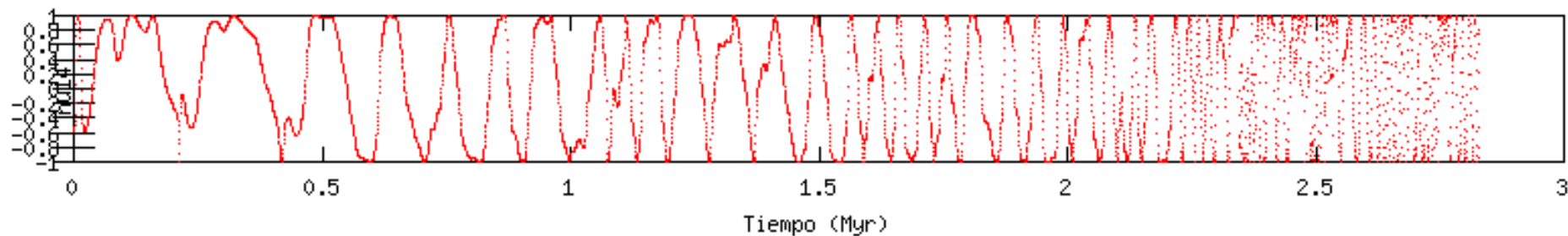
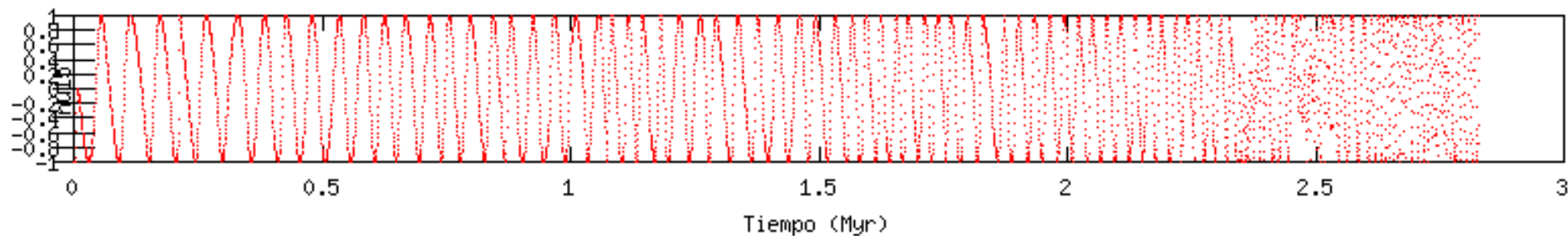
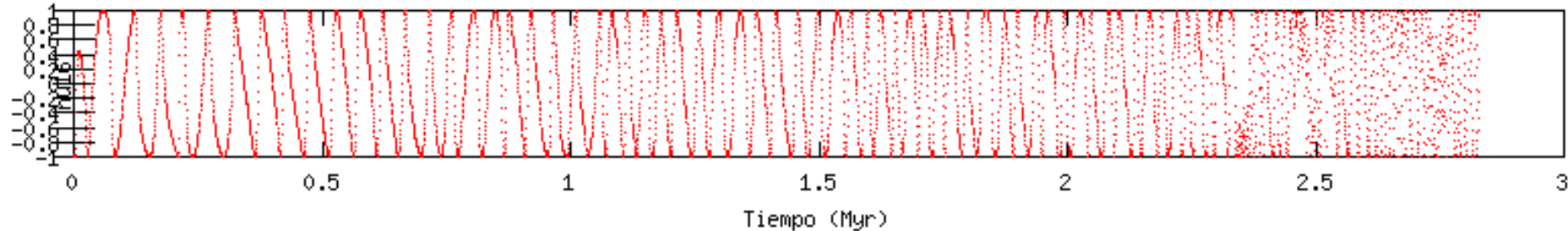
Resultados

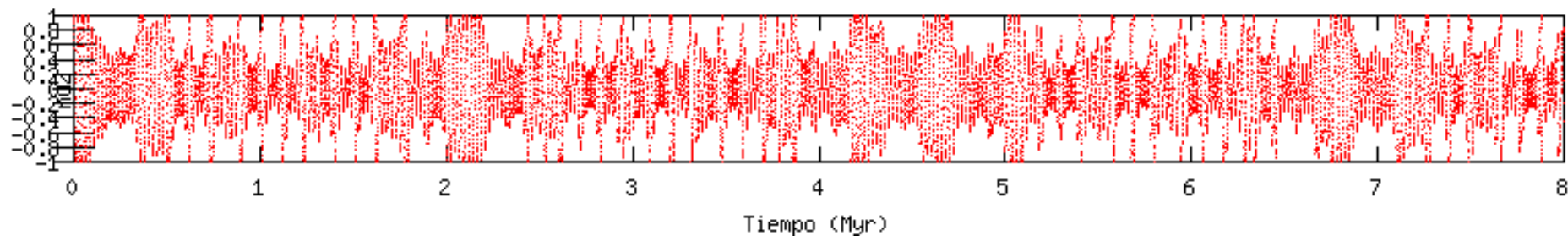
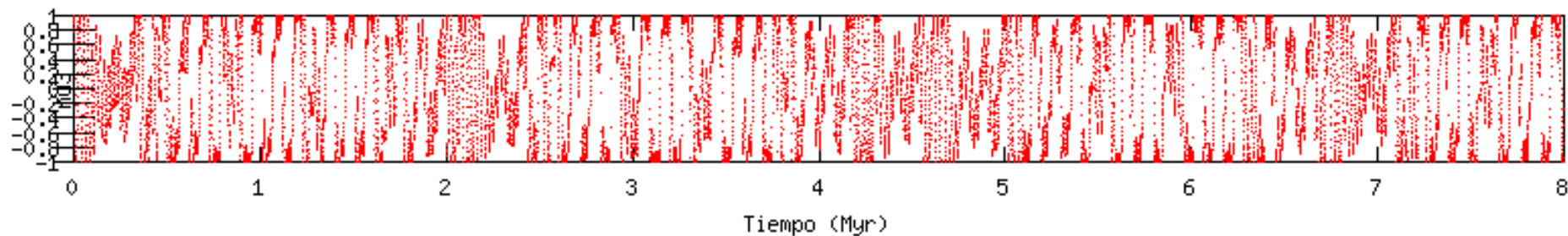
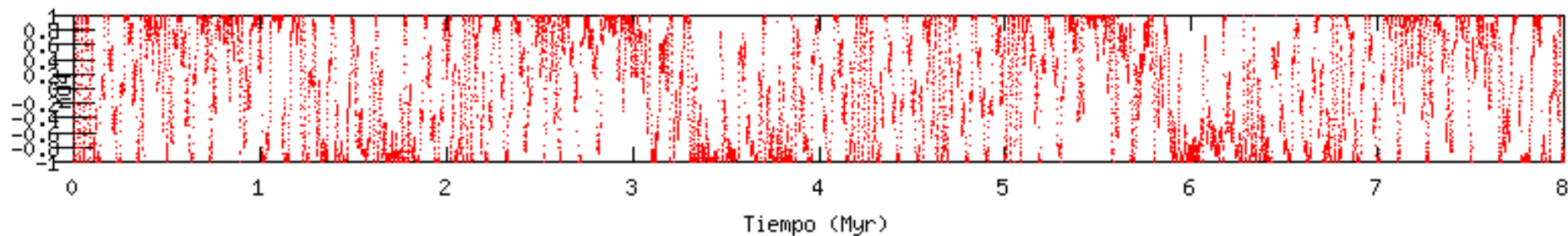
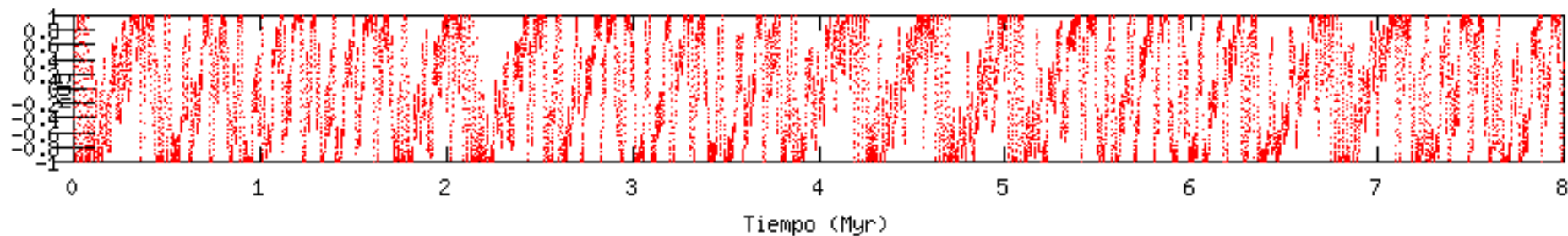
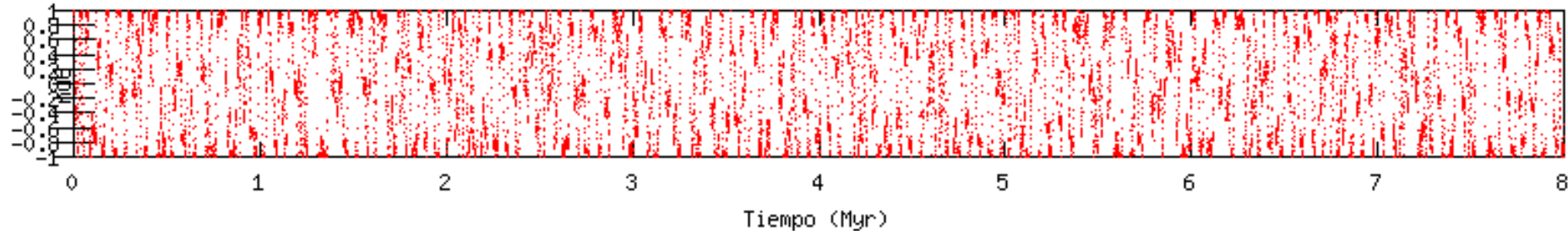
- Se constata presencia de ν_{12} para $0.5 < a < 0.6251 \text{ UA}$

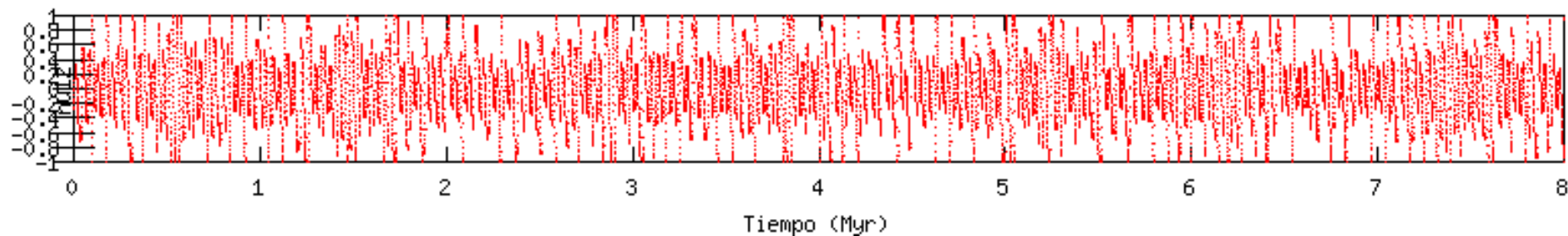
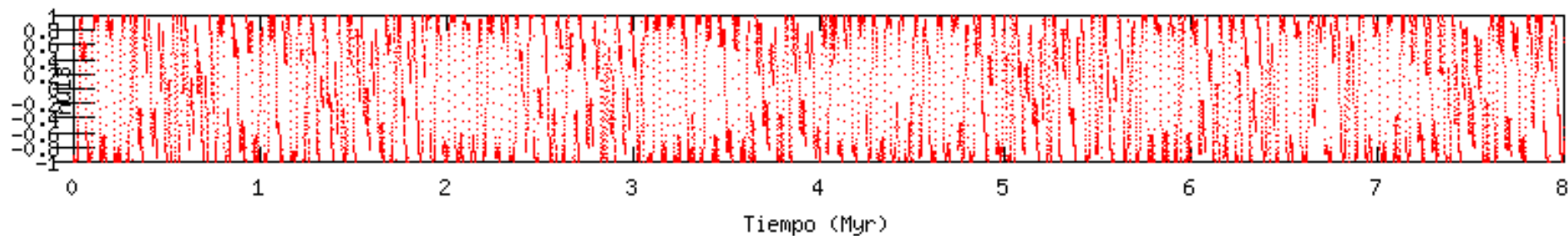
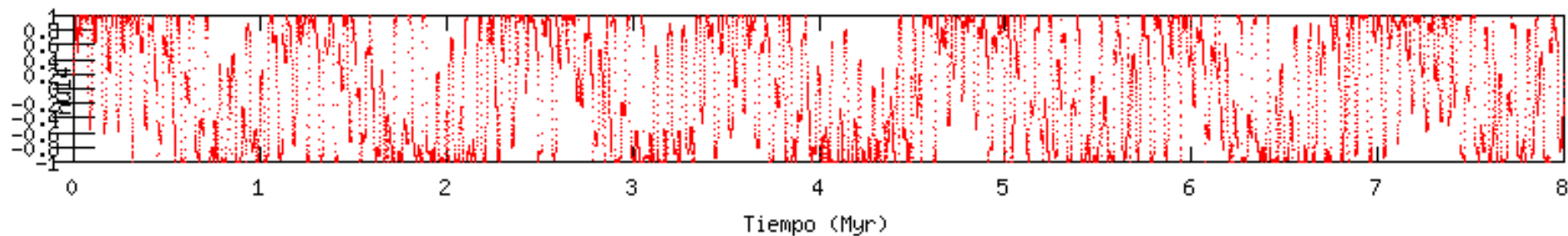
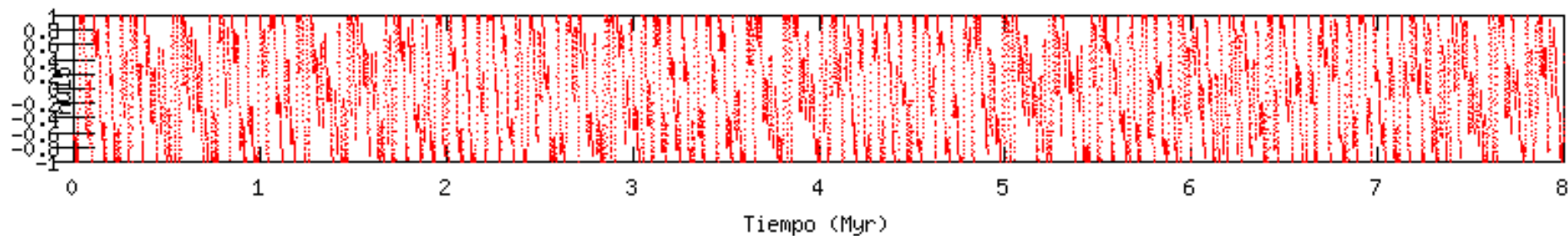
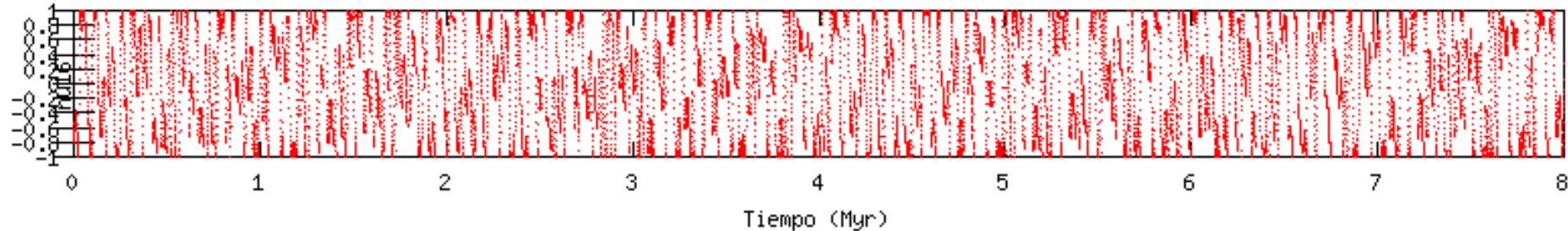
- Todas las partículas con:
 $e < 0.12$, $i < 12$, a constante

Se encuentran atrapadas en resonancias seculares ν_2 o ν_{12}
observamos overlapping de estas resonancias seculares
ejemplo objeto 34b

Se aprecia proximidad de la resonancias seculares ν_{12} ν_{13} ν_{15} ν_{16}
por ejemplo objeto 14b.









Tercera Etapa (elementos orbitales)

- $0.5750 < a < 0.6760$ (UA)
- $0.7600 < a < 0.8570$ (UA)

- Excentricidad: (e) 0.02

- Inclination: (i) 0.01



Primeros Resultados

- Cerca del 56% de las partículas entran en un estado estable durante toda la integración.

$$e < 0.14$$

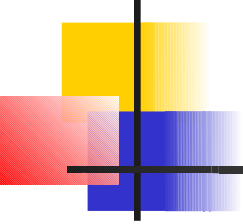
$$i < 12$$

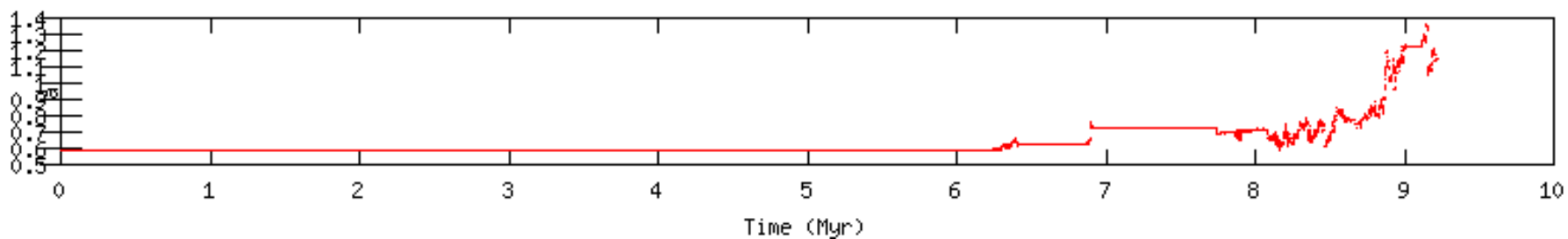
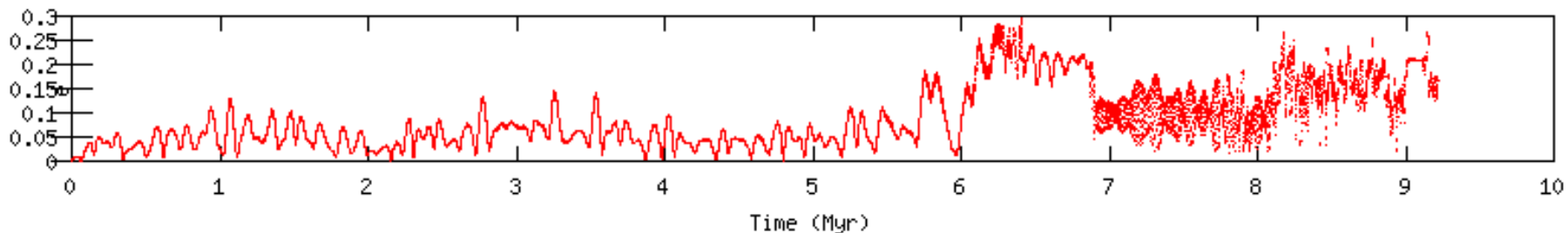
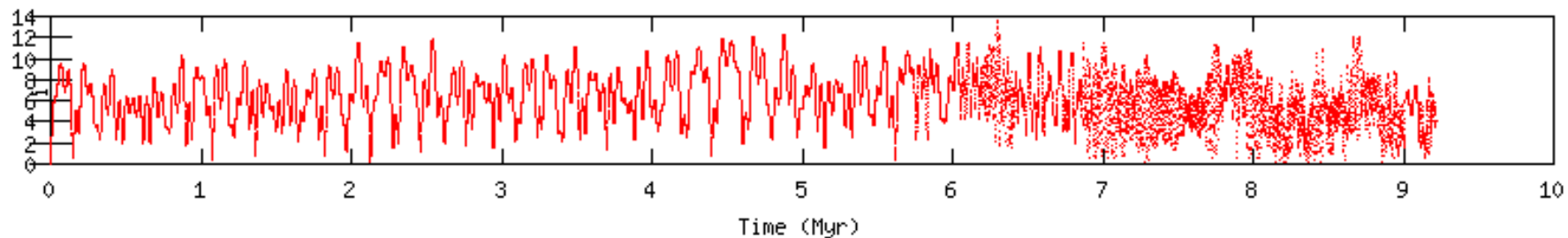
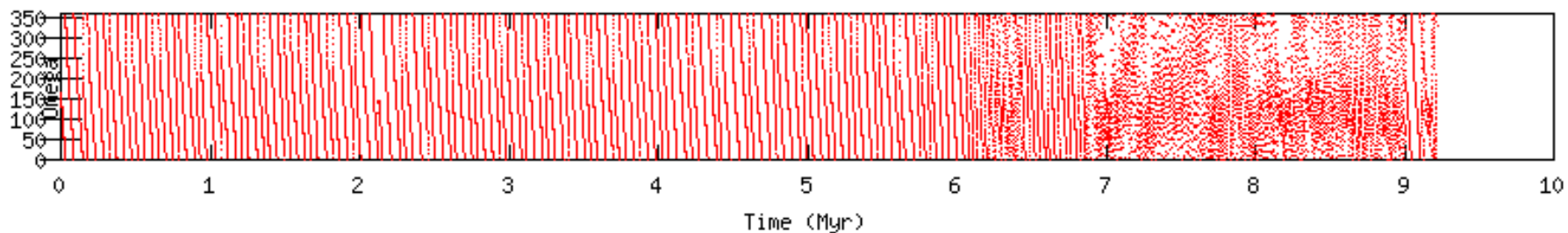
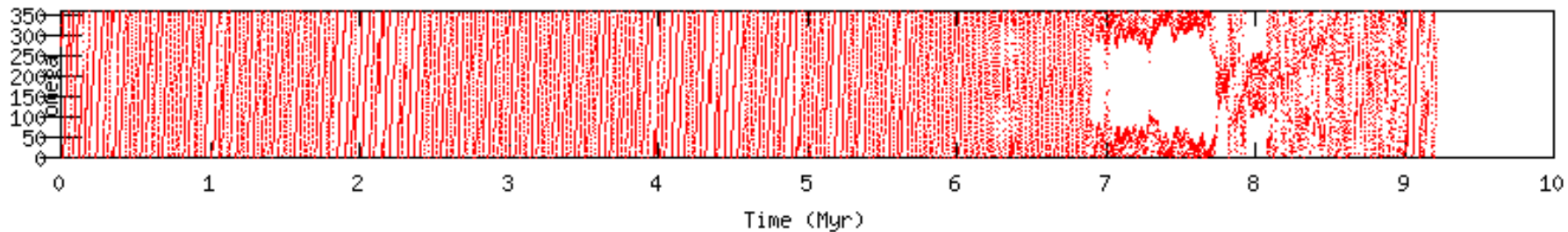
Semieje constante

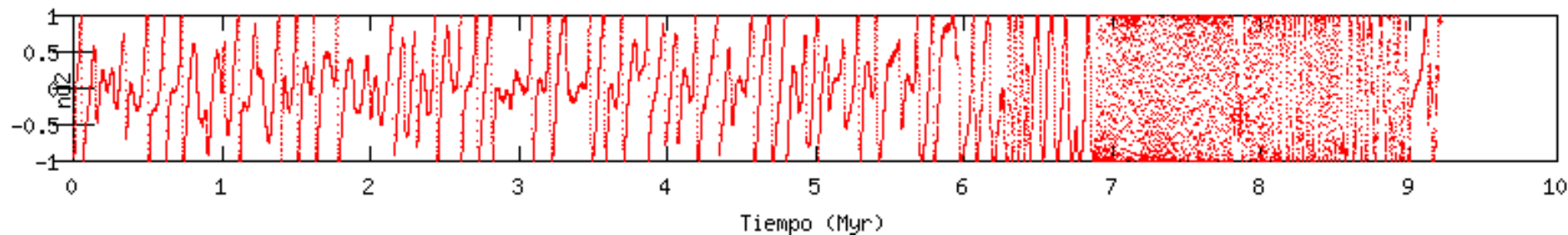
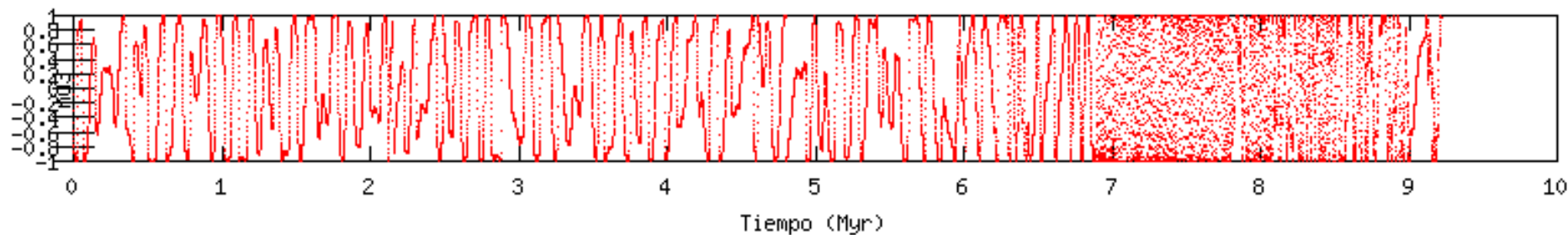
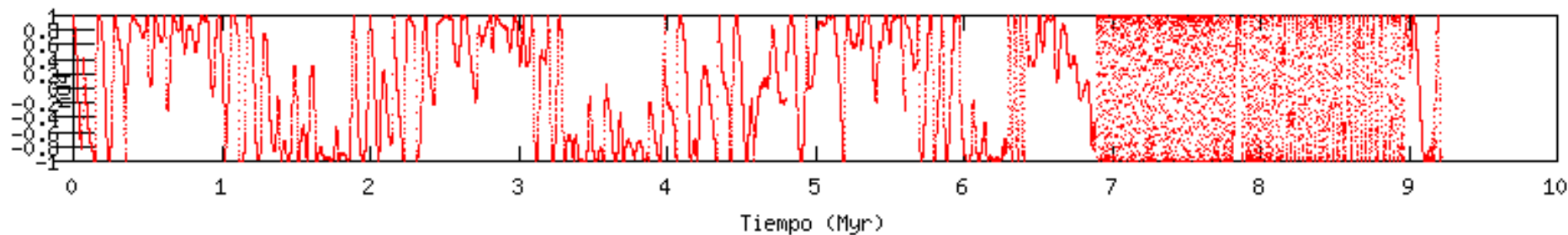
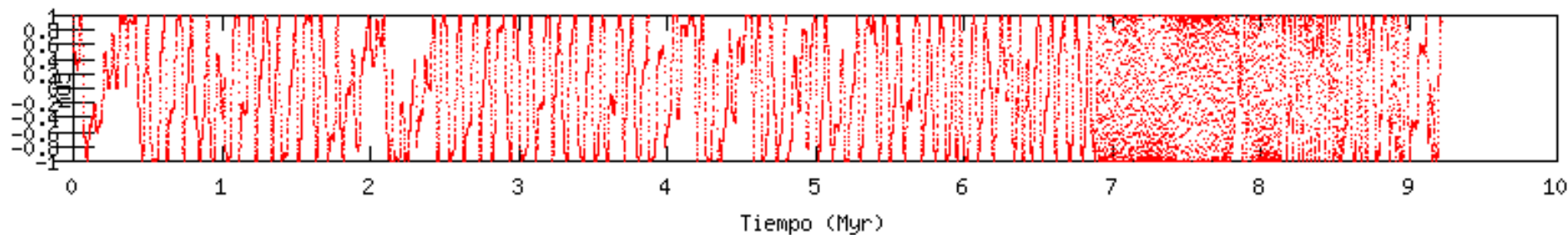
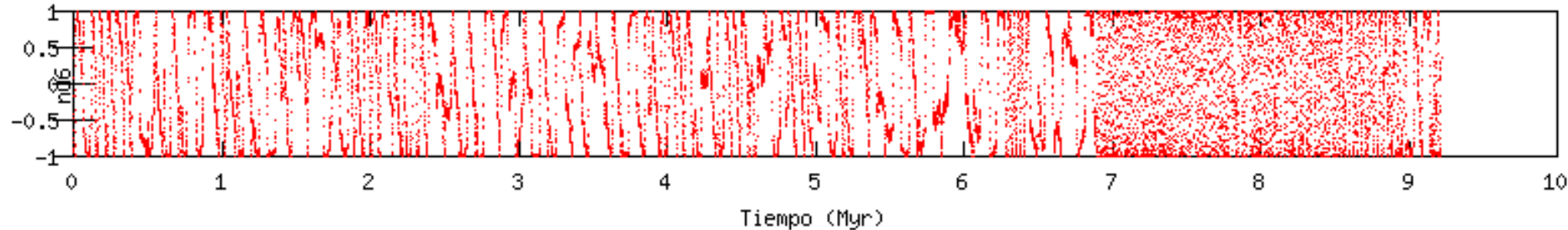
Se definen dos regiones de estabilidad bien diferenciadas:

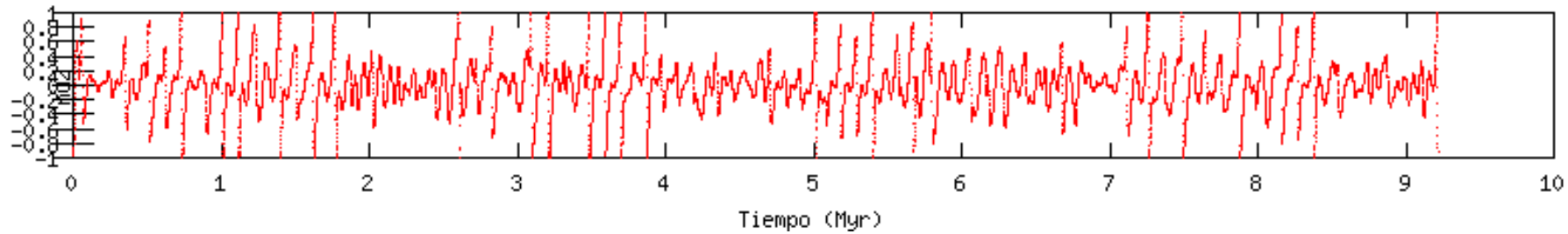
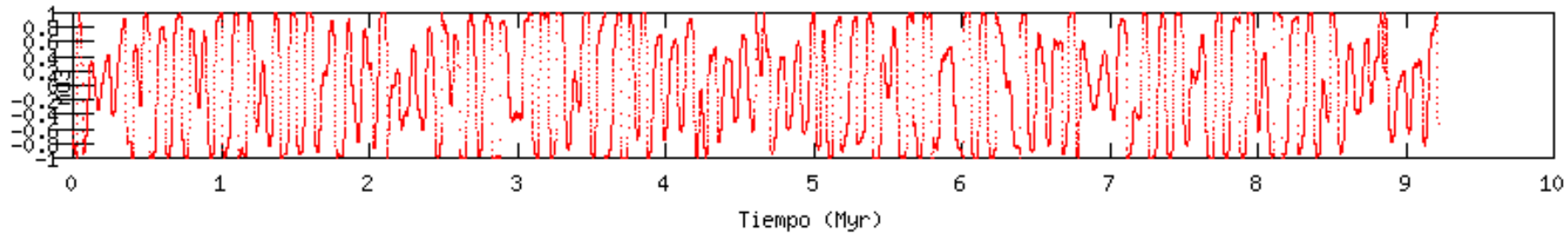
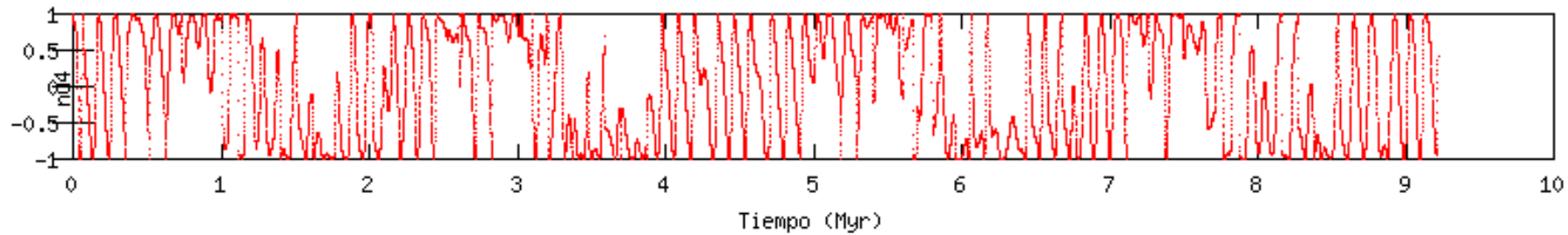
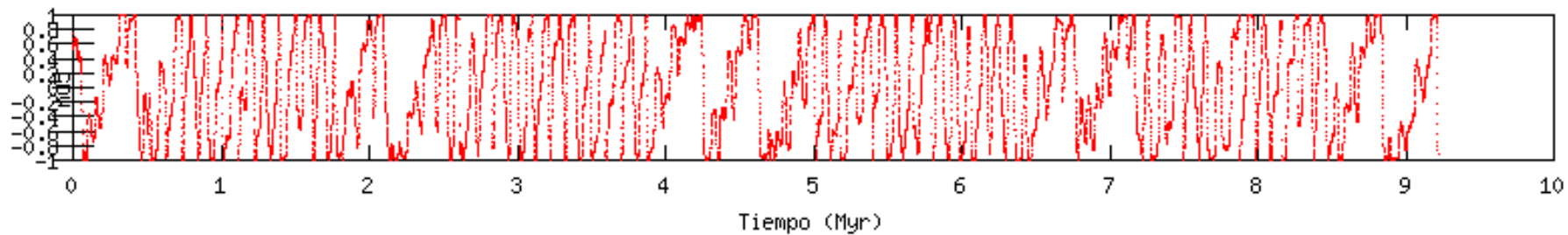
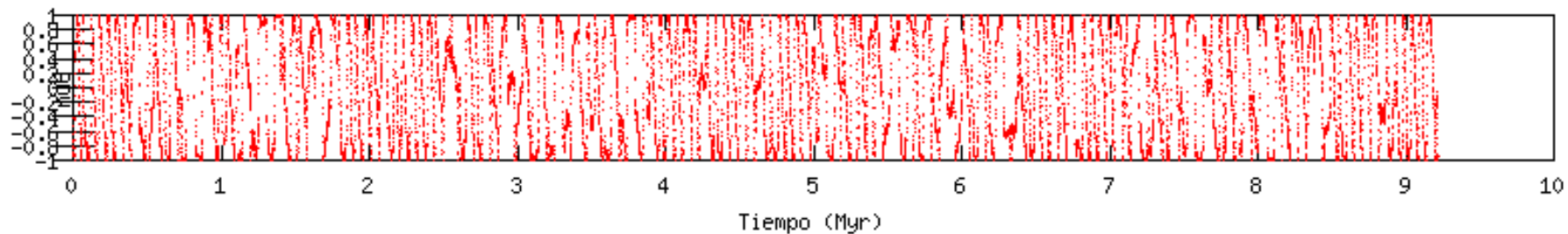
$$B_1 \quad 0.5910 < a < 0.6760$$

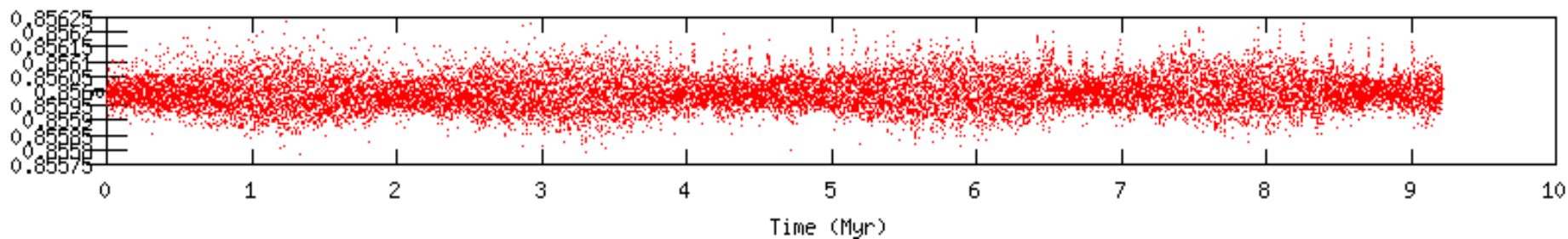
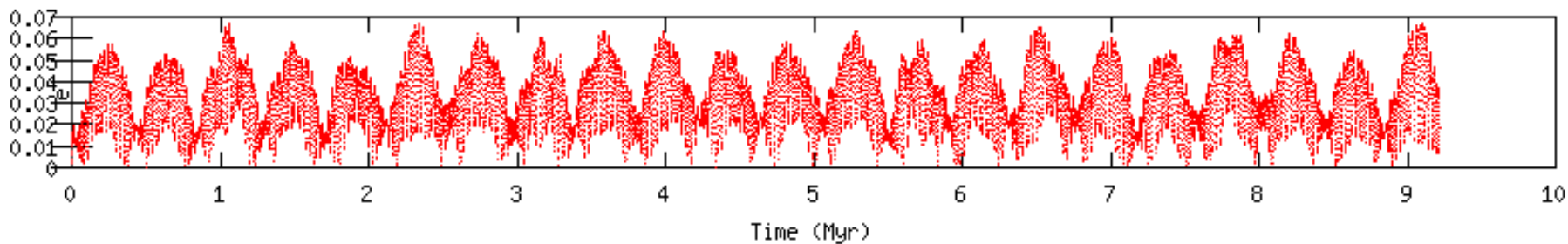
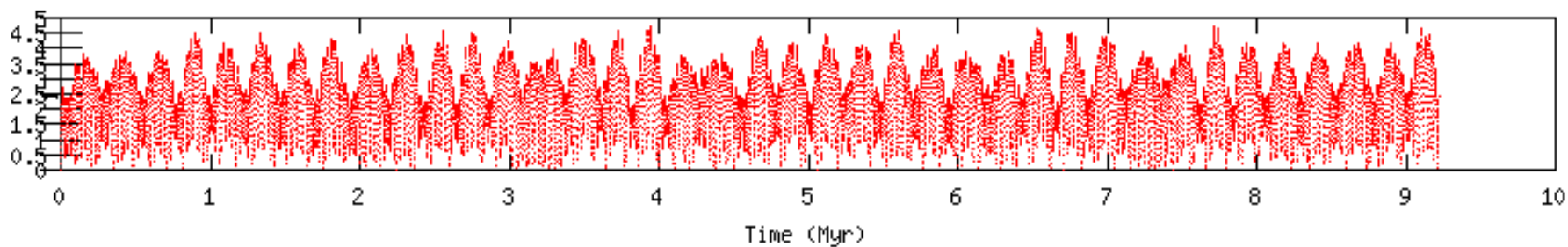
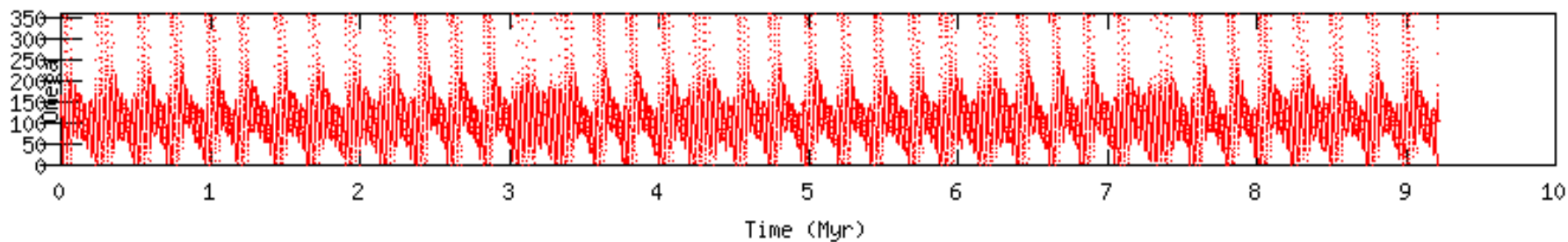
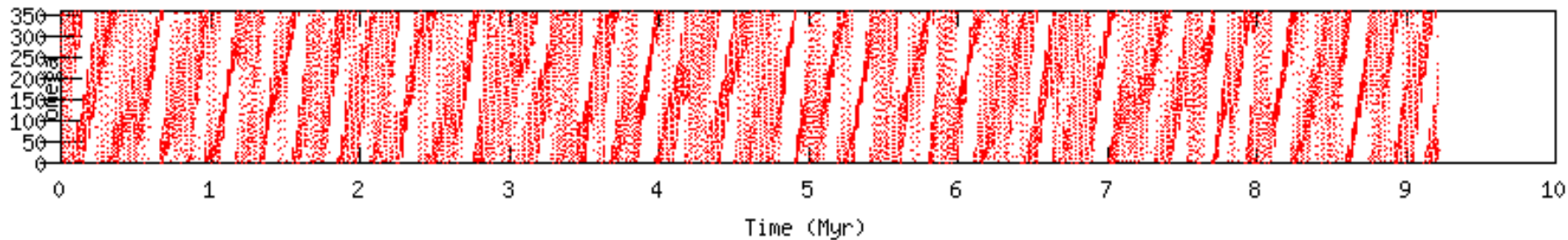
$$B_2 \quad 0.7720 < a < 0.8560$$

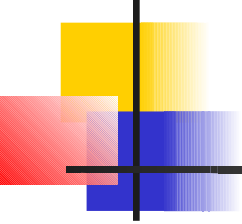
- 
-
- Se observan comportamientos similares con las etapas anteriores.
 - Se observa resonancia de Kozai con ω librando entorno a 180° a bajas inclinaciones
 - Encontramos objetos que en cercanías con v_2 abandonan resonancia por encuentros cercanos (objeto 27c)
 - Para valores de semieje > 0.6340 se aprecian vestigios de v_3
 - Hay una definida presencia de v_3 en $0.8240 < a < 0.8560$









- 
-
- Partículas entre $0.8240 < a < 0.8560$ se encuentran dentro de las resonancias seculares ν_2 y ν_3

- Posibles efectos asociados:

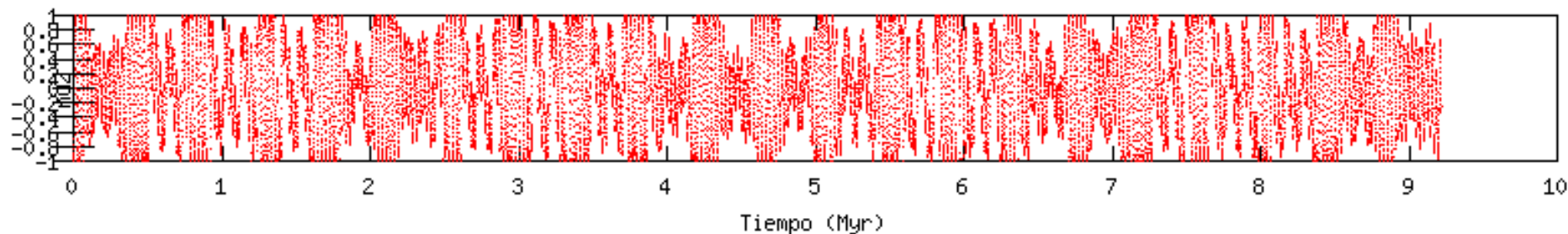
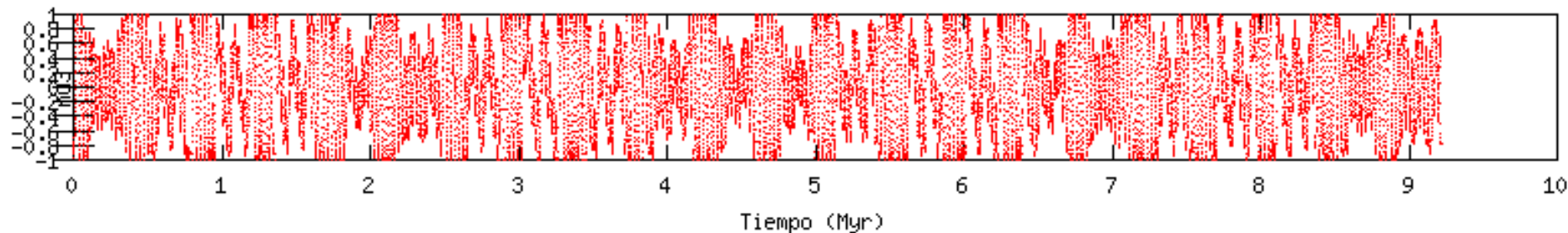
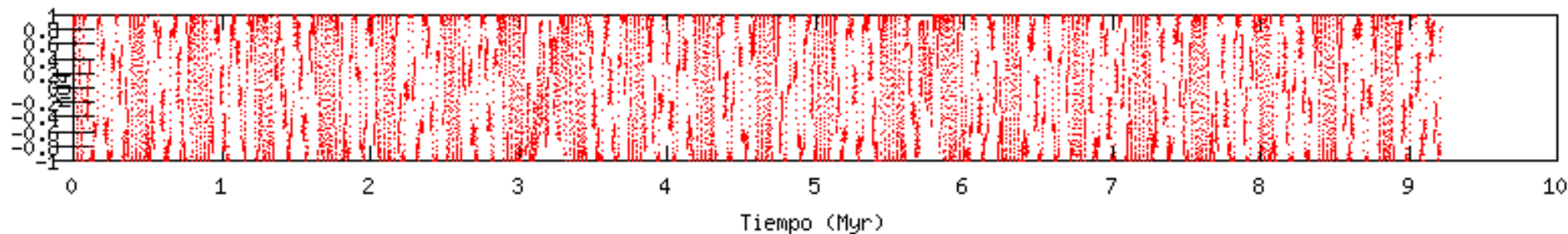
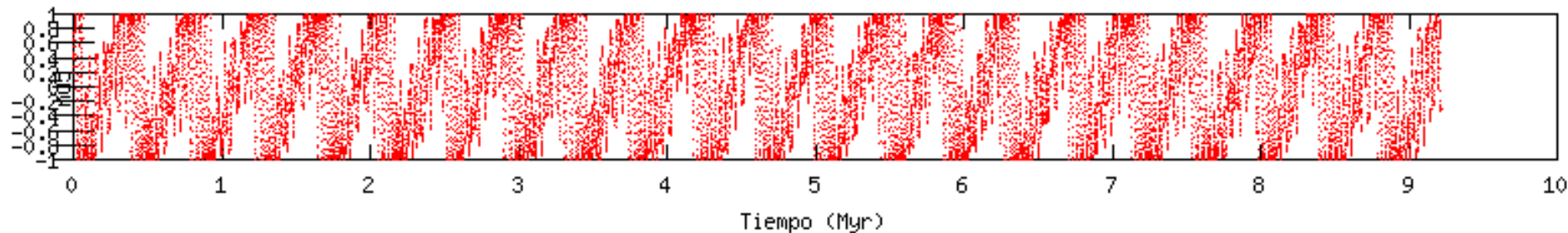
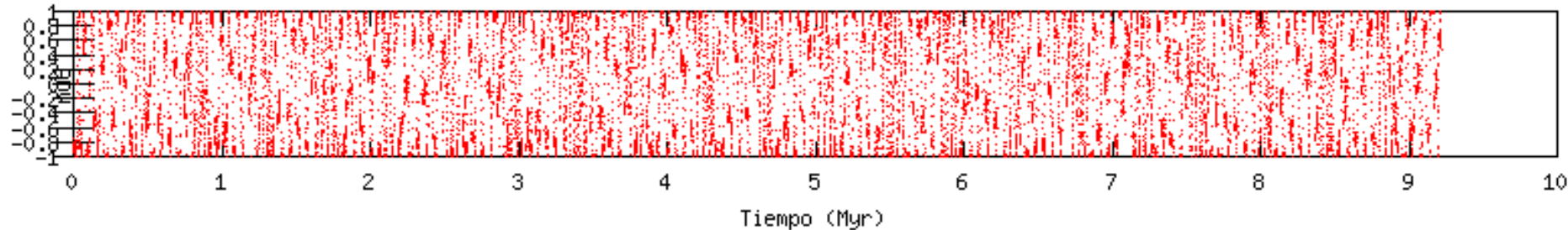
Poseen los mas bajos valores de i y e

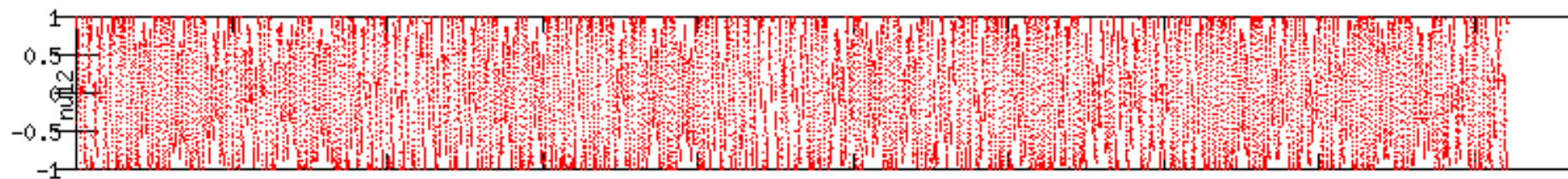
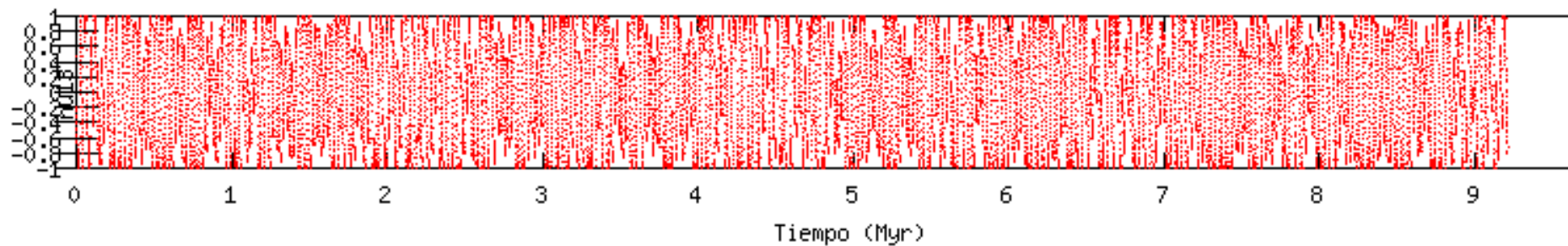
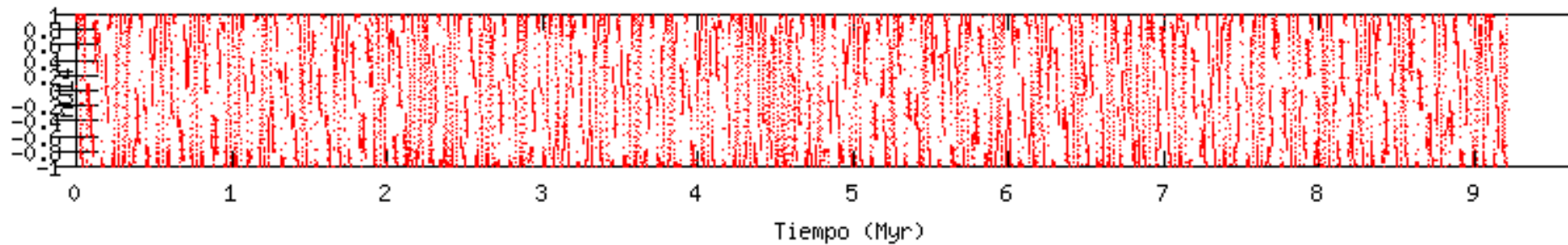
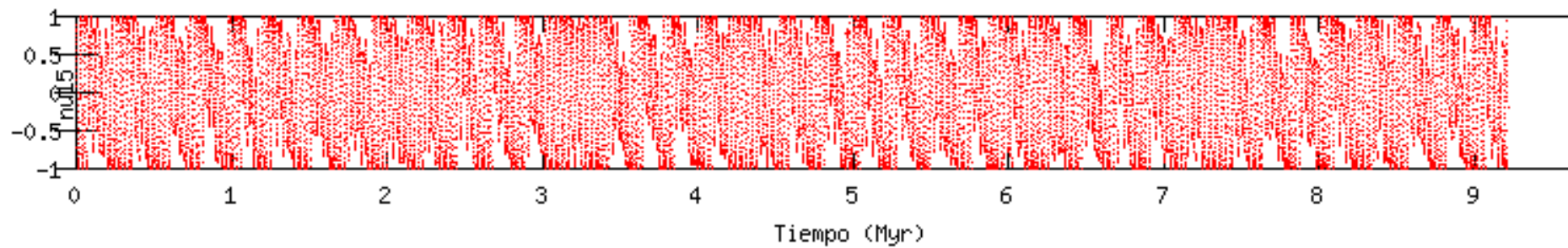
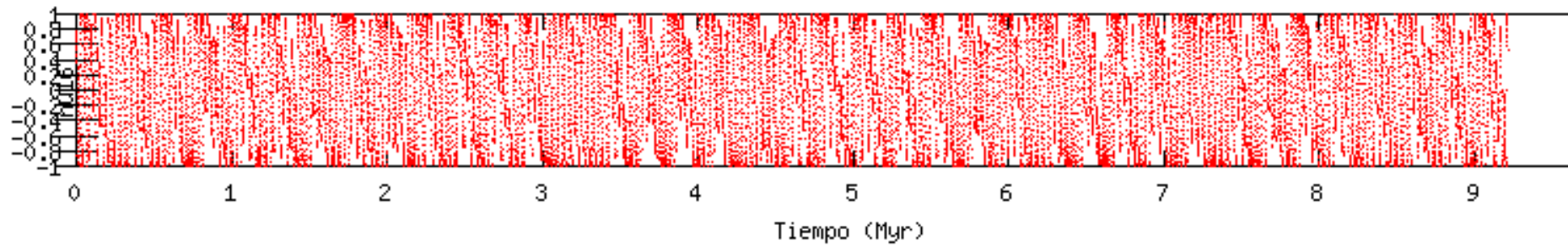
$$e \leq 0.07$$

$$i \leq 5$$

Se puede interpretar que para estos valores las res. ν_2 y ν_3 están muy cerca en el espacio (a, i)

Asimismo se constata la cercanía con ν_{12} ν_{13} ν_{15} y ν_{16}







Conclusiones.

- Se verifican los resultados antes obtenidos por diferentes autores. Los efectos producidos por resonancias seculares no deben ser omitidos en la evolución dinámica del sistema.
- Presencia de resonancias de Kozai asociadas a los planetas interiores. Concordancia con el trabajo de P. Michel & F. Thomas por la presencia de un nuevo tipo resonancia de Kozai esta vez con ω librando entorno de 180° a bajas inclinaciones $i_{\max} < 25^\circ$
- Pequeñas diferencias con los diagramas de ubicación de resonancias seculares propuestos por P. Michel & C. Froeschlé v_2 y v_3 estarían mas próximas en el espacio (a,i) v_{12} tendría un rango de acción mas allá de 0.5 UA



Conclusiones

- Región interior del Sistema Solar dominada por efectos asociados a los planetas interiores. Venus rige principalmente la evolución dinámica del sistema. Resonancias ν_2 y ν_{12}

- Dos regiones de estabilidad:

$$B_1 \quad 0.59642 < a < 0.64 \quad (\text{UA})$$

$$B_2 \quad 0.7746 < a < 0.8154 \quad (\text{UA})$$

Overlapping de ν_2 y ν_{12} en estas regiones



Conclusiones

- Overlapping de resonancias ν_2 y ν_3

$$0.8240 < a < 0.8560$$

partículas con las menores (i) y (e)

$$e \leq 0.07 \quad i \leq 5$$

- Para región cercana a < 0.65 UA

ν_{12} ν_{13} ν_{15} y ν_{16} se pueden considerar próximas en el espacio (a,i)



Estudios Propuestos

- Existencia de la población teórica:
Origen: Primordial.
- Población remanente de la formación del Sistema Solar. Se propone nuevas integraciones con algunas partículas por 4Gyrs
- Proveniente de otras regiones del sistema solar
P.Michel et al proponen regiones de donde se puede estar enviando material para sustentar poblaciones de asteroides (Atens, Apollos e IEO's) en la región interior del Sistema Solar

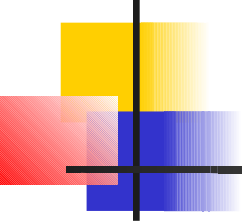


Fuentes (para objetos kilométricos o de varios metros de tamaño)

- Mars-crossers fuente de Earth-crossers (Migliorini et al 1998)

Asteroides del cinturón principal que por mecanismos no gravitacionales se convierten en Earth-crossers (Gladman et al 1997, Farinella& Vokrouhlický 1999)

- Asteroides provenientes del cinturón principal inyectados en una RMM 3:1 con Júpiter
- o en una resonancia secular ν_6 con Saturno (Farinella& Vokrouhlický 1999)

- 
-
- El trabajo realizado muestra que teóricamente se cuenta con una población mayor de Atens e IEOs que la observada (ver Tabla1)
 - Las integraciones numéricas llevadas a cabo por Michel et al proponen que debe haber una población real de IEOs que evolucionan de objetos provenientes de las fuentes mencionadas y que los objetos evolucionan dentro de estos grupos (Apollos, Atens e IEOs)



Proyectos

- Se propone un programa de búsqueda crepuscular para la detección de IEOs posiblemente localizados en las regiones de estabilidad B_1 o B_2

Se advierte de la dificultad de la búsqueda por cercanía con el Sol.

- Se consideran necesarias mas integraciones y estudios sobre la región con $a < 2$ para tener mas información sobre B_1 y B_2 (existencia, origen y evolución dinámica)
- Se requiere de un estudio fino sobre RMM



Agradecimientos 😊 !

- Tabare Gallardo por todo su apoyo teórico y técnico y por esa paciencia interminable!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
- Andrea Sanchez por facilitarme las transparencias!!



Referencias

- P.Michel and C. Froeschlé
The Location of Linear Secular Resonances for Semimajor Axes Smaller than 2 UA (1997)
- P.Michel
Effects of Linear Secular Resonances in the Region of Semimajor Axes Smaller than 2 UA (1997)
- P.Michel and Vincenzo Zappalá, Alberto Cellino, and Paolo Tanga
Estimates Abundance of Atens and Asteroids Evolving on Orbits between Earth and Sun (1999)
- P.Michle and F. Thomas
The Kozai resonance for near-Earth asteroids with semimajor axes smaller than 2 UA