



Universidad Nacional de La Plata
Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas

Tesis de Licenciatura en Astronomía
SISTEMAS PLANETARIOS SIN GIGANTES GASEOSOS:
SU DEPENDENCIA CON LA DISIPACIÓN DEL GAS

Irina Luciana San Sebastián

Director: Gonzalo Carlos de Elía

LA PLATA, ARGENTINA
- 2015 -

Resumen

En este trabajo estudiamos la formación de planetas terrestres y su potencial habitabilidad en sistemas sin gigantes gaseosos, alrededor de estrellas de tipo solar.

Elegimos estos discos ya que estudios observacionales y teóricos sugieren que estos sistemas planetarios formados sólo por planetas terrestres podrían ser los más comunes en el universo.

Analizamos la dependencia de las arquitecturas finales de los sistemas planetarios con el tiempo de disipación de la componente gaseosa del disco protoplanetario. En términos generales cuanto mayor es el tiempo de disipación, mayor es la masa distribuída en embriones planetarios y menos masiva es la población de planetesimales al final de la fase gaseosa.

Para llevar a cabo nuestro trabajo seleccionamos dos masas de discos protoplanetarios de $0.1M_{\odot}$ y $0.05M_{\odot}$, asegurándonos que no se formen en ellos planetas gigantes gaseosos. A su vez elegimos tres tiempos de disipación de la componente gaseosa: 1.5Ma, 2.5Ma y 5Ma, extraídos de estudios observacionales realizados por Mamajek (2009).

Para determinar las distribuciones de embriones y planetesimales al final de la etapa gaseosa utilizamos un modelo semianalítico. Dichas distribuciones se adoptaron como condiciones iniciales para las simulaciones de N-cuerpos. Realizamos 3 simulaciones por cada tiempo de disipación adoptado para cada masa de disco.

Nuestras simulaciones forman dos tipos de planetas en la zona habitable de los sistemas bajo consideración. Por un lado, mundos de agua provenientes de la región externa del disco, más allá de la línea de hielo que debido a sucesivas migraciones culminaron en la zona habitable. Los mundos de agua poseen entre un 21 % y un 50 % de agua. Por otro lado, planetas que se formaron “in situ” y acretaron sus contenidos finales de agua a partir de impactos de embriones y planetesimales provenientes del disco externo. Estos últimos muestran entre un 8 % y un 25 % de agua. Teniendo en cuenta el contenido porcentual de agua asociado a nuestro planeta, los planetas formados “in situ” con los menores contenidos de agua serán los de mayor interés astrobiológico. Nuestras simulaciones indican que tales planetas coexisten con súper tierras de $2M_{\oplus}$ a $3M_{\oplus}$ entre 2UA y 4UA, las cuales deberían ser observadas próximamente por la técnica de Microlentes Gravitatorias.

Consideramos que este trabajo de Tesis representa una contribución a estudios observacionales abocados a la búsqueda de exoplanetas.

Índice general

Resumen	III
1. Introducción	1
2. Conceptos básicos	3
2.1. Planetas en el Sistema Solar	3
2.2. Formación de planetas terrestres	3
2.2.1. Formación del disco protoplanetario	4
2.2.2. Primera etapa	4
2.2.3. Segunda etapa	4
2.2.4. Tercera etapa	5
2.3. Exoplanetas y su observación	5
2.4. Zona Habitable	7
2.5. Trabajos previos	8
2.5.1. Tiempo de Disipación del Gas	8
2.5.2. Sistemas planetarios terrestres	9
3. Modelos	11
3.1. Modelo Semianalítico: Descripción	11
3.2. Modelo de disco	12
3.2.1. Perfil de Densidad Superficial	12
3.2.2. Metalicidad	13
3.2.3. Tiempo de Disipación del Gas	13
3.2.4. Masa Inicial del Disco Protoplanetario	14
3.2.5. Distribución Inicial de Agua	15
3.3. Modelo de N-cuerpos: Descripción	15
4. Simulaciones con un Tiempo de Disipación del Gas de 1.5Ma	17
4.1. Disco $0.05 M_{\odot}$	17
4.1.1. Aplicación del Modelo Semianalítico	17
4.1.2. Modelo de N-Cuerpos: Condiciones Iniciales	18
4.1.3. Resultados del Modelo de N-cuerpos	19
4.2. Disco $0.1 M_{\odot}$	24
4.2.1. Aplicación del Modelo Semianalítico	24
4.2.2. Modelo de N-Cuerpos: Condiciones Iniciales	24
4.2.3. Resultados del Modelo de N-Cuerpos	24

5. Simulaciones para Tiempo de Disipación del Gas 2.5Ma	39
5.1. Disco $0.05M_{\odot}$	39
5.1.1. Aplicación del Modelo Semianalítico	39
5.1.2. Modelo de N-cuerpos: Condiciones Iniciales	40
5.1.3. Resultados del Modelo de N-cuerpos	40
5.2. Disco $0.1M_{\odot}$	45
5.2.1. Aplicación del Modelo Semianalítico	45
5.2.2. Condiciones Iniciales para el Modelo de N-cuerpos	45
5.2.3. Resultados del Modelo de N-cuerpos	46
6. Simulaciones para Tiempo de Disipación del Gas 5Ma	57
6.1. Disco $0.05M_{\odot}$	57
6.1.1. Aplicación del Modelo Semianalítico	57
6.1.2. Modelo de N-cuerpos: Condiciones Iniciales	57
6.1.3. Resultados del Modelo de N-cuerpos	58
6.2. Disco $0.1M_{\odot}$	65
6.2.1. Aplicación del Modelo Semianalítico	66
6.2.2. Condiciones Iniciales para el Modelo de N-cuerpos	67
6.2.3. Resultados del Modelo de N-cuerpos	67
7. Conclusiones	81
7.1. Comparación con las observaciones	83

Índice de figuras

2.1.	El histograma representa la cantidad de planetas que fueron descubiertos por año. Extraído de http://exoplanet.eu/	5
2.2.	En el gráfico se muestra la masa de los planetas en función de su semieje mayor. La masa se encuentra en unidades de masa de Júpiter. Extraído de http://exoplanet.eu/	6
2.3.	Número de planetas encontrados en función de la masa de la estrella a la que orbitan. Extraído de http://exoplanet.eu/	7
2.4.	Semiejes de los exoplanetas en función de la distancia a su estrella central. Extraído de http://exoplanet.eu/	8
2.5.	Figura extraída del trabajo de Kopparapu et al. (2013). La zona habitable optimista se encuentra delimitada por las líneas roja y azul y la región verde es la zona habitable conservativa.	9
2.6.	Gráfica extraída del trabajo de Mamajek (2009) donde se muestra la fracción de discos protoplanetarios observados en función de la edad de la estrella anfitriona. 10	
3.1.	Gráfico extraído del trabajo de Andrews et al. (2010) donde se muestran las distribuciones asociadas al gradiente de densidad superficial del disco y al radio característico. El eje y representa el número de discos y la zona rayada representa la contribución de 4 discos que presentan una disminución en la emisión de sus zonas centrales.	13
4.1.	Distribuciones de embriones y planetesimales al final de la etapa gaseosa asumiendo un disco $0.05M_{\odot}$ y tiempo de disipación 1.5Ma utilizando el modelo semianalítico. Serán las condiciones iniciales del modelo de N-cuerpos.	18
4.2.	Evolución temporal de la Simulación 1. Los puntos negros representan a los planetesimales, los círculos llenos representan a los embriones, y las variaciones de colores indican el porcentaje de agua de los mismos. Las regiones coloreadas son las Zonas de Habitabilidad, donde definimos una Conservadora y una Optimista. Las curvas de afelio y perihelio constantes son graficadas con colores azul y celeste y están asociadas a los límites internos y externos de las Zonas Habitables, Conservadora y Optimista. En el estado final del Sistema se encuentra un planeta en la Zona de Habitabilidad (N°28) con una masa de $1.42M_{\oplus}$, un semieje de 1.16UA y un 25.29% de agua.	22
4.3.	Porcentajes de planetesimales y embriones en función del tiempo. Gráfico correspondiente a la Simulación N°1 del disco de $0.05M_{\odot}$	23
4.4.	Esta gráfica representa la historia de colisiones del Planeta (N°28) que se encuentra en la Zona Habitable de la Simulación N° 1 del disco de $0.05M_{\odot}$. Cada número es identificatorio de un cuerpo, los coloreados en rojo son embriones y los blancos planetesimales	28

4.5. Evolución en el tiempo del Semieje Mayor (a), apocentro (Q) y pericentro (q) para el planeta (N°28) que se encuentra en la Zona de Habitabilidad correspondiente a la Simulación N°1 del disco de $0.05M_{\odot}$	29
4.6. Evolución en el tiempo de la masa del planeta (N°28) que se encuentra en la Zona de Habitabilidad para la Simulación N°1 del disco de $0.05M_{\odot}$	29
4.7. Variaciones en el tiempo de la inclinación y la excentricidad para los planetas más y menos masivos del sistema, N°61 y N°67 respectivamente, de la Simulación N°1 del disco de $0.05M_{\odot}$	29
4.8. Variaciones en el tiempo de la masa para el planeta más masivo (N°61) del sistema de la Simulación N°1 del disco de $0.05M_{\odot}$	30
4.9. Evolución temporal de la Simulación N° 2. Los puntos negros representan a los planetesimales, los círculos llenos representan a los embriones, y las variaciones de colores indican el porcentaje de agua de los mismos. Las regiones coloreadas son las Zonas de Habitabilidad, donde definimos una Conservadora y una Optimista. Las curvas de afelio y perihelio constantes son graficadas con colores azul y celeste y están asociadas a los límites internos y externos de las Zonas Habitables, Conservadora y Optimista. En el estado final del Sistema se encuentran dos planeta en la Zona de Habitabilidad. Un planeta (N°23) de $1.04M_{\oplus}$ con un contenido de agua del 23.48% ubicado en 1.11UA. El segundo planeta (N°59) ubicado a 1.43UA es un mundo de agua con una masa de $1.15M_{\oplus}$ y 34.69% de agua.	30
4.10. Porcentajes de planetesimales y embriones a medida que el sistema evoluciona en la Simulación N°2 del disco $0.05M_{\odot}$	31
4.11. Evolución en el tiempo del Semieje Mayor (a), apocentro (Q) y pericentro (q) para los planetas que se encuentra en la Zona de Habitabilidad correspondiente a la Simulación N°2 del disco de $0.05M_{\odot}$. El planeta N°23 es el más interno y el N°59 es un mundo de agua.	31
4.12. Evolución en el tiempo de la masa para los planetas que se encuentra en la Zona de Habitabilidad correspondientes a la Simulación N°2 del disco de $0.05M_{\odot}$. El planeta N°23 es el más interno y el N°59 es un mundo de agua.	31
4.13. Variaciones en el tiempo de la masa para el planeta más masivo del sistema (N°58) de la Simulación N°2 del disco de $0.05M_{\odot}$	32
4.14. Variaciones en el tiempo de la inclinación y la excentricidad para los planetas más y menos masivos del sistema, N°58 y N°16 respectivamente, de la Simulación N°2 del disco de $0.05M_{\odot}$	32
4.15. Distribuciones de embriones y planetesimales al final de la etapa gaseosa asumiendo un disco $0.1M_{\odot}$ y tiempo de disipación 1.5Ma utilizando el modelo semianalítico. Serán las condiciones iniciales del modelo de N-cuerpos.	32
4.16. Evolución temporal de la Simulación 1. Los puntos negros representan a los planetesimales, los círculos llenos representan a los embriones, y las variaciones de colores indican el porcentaje de agua de los mismos. Las regiones coloreadas son las Zonas de Habitabilidad, donde definimos una Conservadora y una Optimista. Las curvas de afelio y perihelio constantes son graficadas con colores azul y celeste y están asociadas a los límites internos y externos de las Zonas Habitables, Conservadora y Optimista. En el estado final del Sistema se encuentran dos planetas en la Zona de Habitabilidad. El más interno (N°23) a 0.81UA con una masa de $2.23M_{\oplus}$ con un 13.25% de agua. El más externo ubicado a 1.42UA es un mundo de agua (N°46) de $4.49M_{\oplus}$ con un 46.59% de agua.	33

4.17. Porcentajes de planetesimales y embriones a medida que el sistema evoluciona para la Simulación N°1 del disco de $0.1M_{\odot}$	33
4.18. Evolución en el tiempo del Semieje Mayor (a), apocentro (Q) y pericentro (q) para los planetas que se encuentra en la Zona de Habitabilidad correspondiente a la Simulación N°1 del disco de $0.1M_{\odot}$. El planeta N°23 es el más interno y el N°46 es un mundo de agua.	34
4.19. Evolución en el tiempo de la masa de los planetas que se encuentra en la Zona de Habitabilidad para la Simulación N°1 del disco de $0.1M_{\odot}$	34
4.20. Variaciones en el tiempo de la inclinación y la excentricidad para los planetas más y menos masivos del sistema de la Simulación N°1 del disco de $0.1M_{\odot}$. .	34
4.21. Evolución temporal de la Simulación N° 2 del disco de $0.1M_{\odot}$. Los puntos negros representan a los planetesimales, los círculos llenos representan a los embriones, y las variaciones de colores indican el porcentaje de agua de los mismos. Las regiones coloreadas son las Zonas de Habitabilidad, donde definimos una Conservadora y una Optimista. Las curvas de afelio y perihelio constantes son graficadas con colores azul y celeste y están asociadas a los límites internos y externos de las Zonas Habitables, Conservadora y Optimista. A los 200Ma, sobrevive en la Zona Habitable un mundo de agua (N°45) a 1.29UA con $3.1M_{\oplus}$ y 26.42% de agua.	35
4.22. Porcentajes de planetesimales y embriones en función del tiempo para la Simulación N°2 del disco de $0.1M_{\odot}$	35
4.23. Evolución temporal de la órbita y la masa del planeta ubicado en la zona habitable (N°45) para la Simulación N°2 del disco de $0.1M_{\odot}$	36
4.24. Esquema de la historia colisional del planeta más masivo del sistema (N°46) formado en la Simulación N°2 del disco de $0.1M_{\odot}$. Los círculos en rojo representan a los embriones planetarios, mientras que los círculos en blanco a los planetesimales. Los números que acompañan las flechas indican el momento en el cual sucedió la colisión.	37
4.25. Evolución temporal de la masa del planeta más masivo del sistema (N°46) de la Simulación N°2 del disco de $0.1M_{\odot}$	38
4.26. Variaciones en el tiempo de la inclinación y la excentricidad para los planetas más y menos masivos del sistema, N°46 y N°37 respectivamente, de la Simulación N°2 del disco de $0.1M_{\odot}$	38
5.1. Distribuciones de embriones y planetesimales al final de la etapa gaseosa asumiendo un disco de $0.05M_{\odot}$ y un tiempo de disipación de 2.5Ma utilizando el modelo semianalítico. Serán condiciones iniciales para el modelo de N-cuerpos.	39
5.2. Evolución temporal de la Simulación 1. Los puntos negros representan a los planetesimales, los círculos llenos representan a los embriones, y las variaciones de colores indican el porcentaje de agua de los mismos. Las regiones coloreadas son las Zonas de Habitabilidad, donde definimos una Conservadora y una Optimista. Las curvas de afelio y perihelio constantes son graficadas con colores azul y celeste y están asociadas a los límites internos y externos de las Zonas Habitables, Conservadora y Optimista. En el estado final del Sistema se encuentran dos planetas en la Zona de Habitabilidad. El más interno (N°29) a 0.85UA con una masa de $0.92M_{\oplus}$ y 11.67% de agua. Mientras que el más externo (N°44) se ubica a 1.33UA con una masa de $1.59M_{\oplus}$ y 23.78% de agua	42
5.3. Porcentajes de planetesimales y embriones a medida que el sistema evoluciona para la Simulación N°1 del disco de $0.05 M_{\odot}$	43

5.4. Evolución temporal de la masa de los planetas que se encuentran en la zona habitable (N°29 y N°44) de la Simulación N°1 del disco de $0.05 M_{\odot}$	43
5.5. Historia colisional de los planetas N°29 y N°44 que se encuentran en la Zona Habitable de la Simulación N°1 del disco de $0.05 M_{\odot}$. Cada número es identificatorio de un cuerpo, los coloreados en rojo son embriones y los blancos planetesimales	48
5.6. Evolución en el tiempo del Semieje Mayor (a), apocentro (Q) y pericentro (q) para los planetas que se encuentran en la zona de habitabilidad (N°29 y N°44) correspondiente a la Simulación N°1 del disco de $0.05 M_{\odot}$	49
5.7. Evolución temporal de la masa del planeta más masivo (N°61) de la Simulación N°1 del disco de $0.05 M_{\odot}$	49
5.8. Evolución en el tiempo de las excentricidades e inclinaciones de los planetas más y menos masivos, N°61 y N°12 respectivamente, de la Simulación N°1 del disco de $0.05 M_{\odot}$	49
5.9. Evolución temporal de la Simulación N°2 del disco de $0.05 M_{\odot}$. Los puntos negros representan a los planetesimales, los círculos llenos representan a los embriones, y las variaciones de colores indican el porcentaje de agua de los mismos. Las regiones coloreadas son las Zonas de Habitabilidad, donde definimos una Conservadora y una Optimista. Las curvas de afelio y perihelio constantes son graficadas con colores azul y celeste y están asociadas a los límites internos y externos de las Zonas Habitables, Conservadora y Optimista. En el estado final del Sistema se encuentran dos planetas en la Zona de Habitabilidad. El más interno (N°40) ubicado a 0.95UA tiene una masa de $1.52M_{\oplus}$ con 12.30 % de agua. El planeta más externo (N°60) resulta ser un mundo de agua ubicado a 1.43UA con una masa de $1.15M_{\oplus}$ y un 42.65 % de agua . . .	50
5.10. Porcentajes de planetesimales y embriones a medida que el sistema evoluciona para la Simulación N°2 del disco de $0.05 M_{\odot}$	50
5.11. Evolución en el tiempo del Semieje Mayor (a), apocentro (Q) y pericentro (q) para los planetas que se encuentran en la zona de habitabilidad (N°40 y N°60) correspondiente a la Simulación N°2 del disco de $0.05 M_{\odot}$	51
5.12. Evolución en el tiempo de las de las masas de los planetas que se encuentran en la zona de habitabilidad (N°40 y N°60) para la Simulación N°2 del disco de $0.05 M_{\odot}$	51
5.13. Evolución temporal de la masa del planeta más masivo (N°58) de la Simulación N°2 del disco de $0.05 M_{\odot}$	51
5.14. Evolución en el tiempo de las excentricidades e inclinaciones de los planetas más y menos masivos, N°58 y N°4 respectivamente, de la Simulación N°2 del disco de $0.05 M_{\odot}$	52
5.15. Distribuciones de embriones y planetesimales al final de la etapa gaseosa asumiendo un disco de $0.1M_{\odot}$ y un tiempo de disipación de 2.5Ma utilizando el modelo semianalítico. Serán las condiciones iniciales para el modelo de N-cuerpos. 52	52

5.16. Evolución temporal de la Simulación N°3. Los puntos negros representan a los planetesimales, los círculos llenos representan a los embriones, y las variaciones de colores indican el porcentaje de agua de los mismos. Las regiones coloreadas son las Zonas de Habitabilidad, donde definimos una Conservadora y una Optimista. Las curvas de afelio y perihelio constantes son graficadas con colores azul y celeste y están asociadas a los límites internos y externos de las Zonas Habitables, Conservadora y Optimista. En el estado final del Sistema se encuentra un mundo de agua (N°42) en la Zona de Habitabilidad ubicado a 1.56UA. Dicho planeta tiene una masa de $3.75M_{\oplus}$ con un 42.6% de agua. . .	53
5.17. Porcentajes de planetesimales y embriones a medida que el sistema evoluciona para la Simulación N°3 del disco de $0.1M_{\odot}$	53
5.18. Evolución temporal de la masa y la órbita del mundo de agua (N°42) ubicado en la zona de habitabilidad de la Simulación N°3 del disco de $0.1M_{\odot}$	54
5.19. Evolución temporal de la masa del planeta más masivo (N°43) de la Simulación N°3 del disco de $0.1M_{\odot}$	54
5.20. Esquema que representa la historia colisional del planeta más masivo (N°43) de la Simulación N°3 del disco de $0.1M_{\odot}$. Los círculos en rojo representan a los embriones, mientras que los círculos en blanco a los planetesimales.	55
5.21. Evolución en el tiempo de las excentricidades e inclinaciones de los planetas más y menos masivos, N°43 y N°45 respectivamente, de la Simulación N°3 del disco de $0.1M_{\odot}$	56
6.1. Distribuciones finales de embriones y planetesimales asumiendo un tiempo de disipación de la componente gaseosa de 5Ma para un disco de $0.05M_{\odot}$ utilizando el modelo semianalítico. Serán las condiciones iniciales del modelo de N-cuerpos.	58
6.2. Evolución temporal de la Simulación N°1 correspondiente al disco de $0.05M_{\odot}$. Los puntos negros representan a los planetesimales, los círculos llenos representan a los embriones, y las variaciones de colores indican el porcentaje de agua de los mismos. Las regiones coloreadas son las Zonas de Habitabilidad, donde definimos una Conservadora y una Optimista. Las curvas de afelio y perihelio constantes son graficadas con colores celeste y azul, y están asociadas a los límites internos y externos de las Zonas Habitables Conservadora y Optimista. En el estado final del Sistema se encuentran un mundo de agua (N°60) en la Zona de Habitabilidad ubicado a 1.28UA. Su masa es de $1.08M_{\oplus}$ con un contenido de agua del 49.7%.	60
6.3. Porcentajes de planetesimales y embriones en función del tiempo. Gráfico correspondiente a la Simulación N°1 del disco de $0.05M_{\odot}$	61
6.4. Evolución de la masa y la órbita en función del tiempo para el mundo de agua (N°60) ubicado en la zona habitable de la Simulación N°1 del disco de $0.05M_{\odot}$	61
6.5. Esquema representativo de la historia colisional del planeta ubicado en la zona habitable de la Simulación N°1 del disco de $0.05M_{\odot}$. Los círculos rojos representan los embriones y los círculos blancos los planetesimales.	62
6.6. Evolución temporal de la masa del planeta más masivo (N°57) de la Simulación N°1 del disco de $0.05M_{\odot}$	63
6.7. Evolución en el tiempo de las excentricidades e inclinaciones de los planetas más y menos masivos, N°57 y N°60 respectivamente, de la Simulación N°1 del disco de $0.05M_{\odot}$	63

6.8.	Evolución temporal de la Simulación N°2 del disco de $0.05M_{\odot}$. Los puntos negros representan a los planetesimales, los círculos llenos representan a los embriones, y las variaciones de colores indican el porcentaje de agua de los mismos. Las regiones coloreadas son las Zonas de Habitabilidad, donde definimos una Conservadora y una Optimista. Las curvas de afelio y perihelio constantes son graficadas con colores celeste y azul, y están asociadas a los límites internos y externos de las Zonas Habitables Conservadora y Optimista. En el estado final del Sistema se encuentran 3 planetas en la Zona de Habitabilidad. El más interno (N°11) ubicado a 0.78UA con una masa de $0.62M_{\oplus}$ y un porcentaje de agua del 9.37%. El siguiente (N°35) ubicado a 1.27UA con una masa de $0.32M_{\oplus}$ y un 8.21% de agua. Por último, planeta más externo (N°58) ubicado en 1.65UA resulta ser un mundo de agua, con una masa de $2.93M_{\oplus}$ y casi 42% de agua.	64
6.9.	Evolución de las órbitas en función del tiempo para los planetas ubicados en la zona habitable (N°11,N°35 y N°58) de la Simulación N°2 del disco de $0.05M_{\odot}$	65
6.10.	Evolución de la masa de los planetas de la zona habitable (N°11,N°35 y N°58) en función del tiempo para la Simulación N°2 del disco de $0.05M_{\odot}$	66
6.11.	Evolución en el tiempo de las excentricidades e inclinaciones de los planetas más y menos masivos (N°58 y N°37) de la Simulación N°2 del disco de $0.05M_{\odot}$.	67
6.12.	Distribuciones finales de embriones y planetesimales asumiendo un tiempo de disipación de la componente gaseosa de 5Ma para un disco de $0.1M_{\odot}$ utilizando el modelo semianalítico. Serán condiciones iniciales para el modelo de N-cuerpos.	67
6.13.	Evolución temporal de la Simulación N°1 del disco de $0.1M_{\odot}$. Los puntos negros representan a los planetesimales, los círculos llenos representan a los embriones, y las variaciones de colores indican el porcentaje de agua de los mismos. Las regiones coloreadas son las Zonas de Habitabilidad, donde definimos una Conservadora y una Optimista.Las curvas de afelio y perihelio constantes son graficadas con colores celeste y azul, y están asociadas a los límites internos y externos de las Zonas Habitables Conservadora y Optimista. A los 250Ma se encuentra un mundo de agua (N°42) en la Zona Habitable ubicado a 1.2UA con una masa de $5.85M_{\oplus}$ y 36.4% de agua.	69
6.14.	Porcentajes de planetesimales y embriones en función del tiempo. Gráfico correspondiente a la Simulación N°1 del disco de $0.1M_{\odot}$	70
6.15.	Evolución en el tiempo de la órbita y la masa del planeta que se ubica dentro de la zona de habitabilidad (N°42) para la Simulación N°1 del disco de $0.1M_{\odot}$	71
6.16.	Esquema de la historia colisional del planeta ubicado en la zona habitable de la Simulación N°1 del disco de $0.1M_{\odot}$. Los círculos rojos representan los embriones y los círculos blancos los planetesimales.	73
6.17.	Evolución temporal de la Simulación N°2 del disco de $0.1M_{\odot}$. Los puntos negros representan a los planetesimales, los círculos llenos representan a los embriones, y las variaciones de colores indican el porcentaje de agua de los mismos. Las regiones coloreadas son las Zonas de Habitabilidad, donde definimos una Conservadora y una Optimista.Las curvas de afelio y perihelio constantes son graficadas con colores celeste y azul, y están asociadas a los límites internos y externos de las Zonas Habitables Conservadora y Optimista. A los 250Ma se encuentra un mundo de agua en la Zona Habitable (N°41) ubicado a 1.46UA con una masa de $9.74M_{\oplus}$ y 44.64% de agua.	74
6.18.	Porcentajes de planetesimales y embriones en función del tiempo. Gráfico correspondiente a la Simulación N°2 del disco de $0.1M_{\odot}$	74

6.19. Evolución en el tiempo de la órbita y la masa del planeta que se ubica dentro de la zona de habitabilidad (N°41) para la Simulación N°2 del disco de $0.1M_{\odot}$	75
6.20. Esquema de la historia colisional del planeta ubicado en la zona habitable (N°41) de la Simulación N°2 del disco de $0.1M_{\odot}$. Los círculos rojos representan los embriones y los círculos blancos los planetesimales.	76
6.21. Evolución temporal de la Simulación N°2 del disco de $0.1M_{\odot}$. Los puntos negros representan a los planetesimales, los círculos llenos representan a los embriones, y las variaciones de colores indican el porcentaje de agua de los mismos. Las regiones coloreadas son las Zonas de Habitabilidad, donde definimos una Conservadora y una Optimista. Las curvas de afelio y perihelio constantes son graficadas con colores celeste y azul, y están asociadas a los límites internos y externos de las Zonas Habitables Conservadora y Optimista. La Zona Habitable se encuentra despoblada.	77
6.22. Porcentajes de planetesimales y embriones a medida que el sistema evoluciona para la Simulación N°3 del disco de $0.1M_{\odot}$	77
6.23. Esquema de la historia colisional del planeta más masivo (N°41) de la Simulación N°3 del disco de $0.1M_{\odot}$. Los círculos rojos representan los embriones y los círculos blancos los planetesimales.	78
6.24. Evolución temporal de la masa del planeta más masivo (N°41) de la Simulación N°3 del disco de $0.1M_{\odot}$	79
6.25. Evolución en el tiempo de las excentricidades e inclinaciones de los planetas más y menos masivos (N°41 y N°22) de la Simulación N°3 del disco de $0.1M_{\odot}$.	79
7.1. Esquema representativo de la técnica de tránsito de un planeta.	83
7.2. Planetas confirmados y candidatos de la Misión Kepler. Los recuadros de color amarillo y rojo corresponden a los planetas formados en nuestras simulaciones ubicados en la zona de habitabilidad para los discos de $0.05M_{\odot}$ y $0.1M_{\odot}$ respectivamente.	84
7.3. Esquema representativo de la Técnica de Microlente Gravitatorio.	84
7.4. Distribución de los 32 planetas detectados con la técnica de Microlente Gravitatorio. La región en verde representa los planetas formados entre 2UA y 4UA en nuestras simulaciones.	85
7.5. Figura extraída del trabajo del review realizado por Gaudi (2012), con la distribución actual de detección de exoplanetas donde se muestran los avances en la técnica de microlentes.	86

Índice de tablas

3.1. Resultados obtenidos utilizando el código desarrollado por Guilera et al. (2010) para la formación de un planeta a 3UA para diferentes masas de disco y tiempo de disipación 1.5Ma	14
3.2. Extraído del trabajo de de Elía et al.(2013) de la formación de un planeta a 3UA para diferentes masas de disco y tiempo de disipación 2.5Ma	14
3.3. Resultados obtenidos utilizando el código desarrollado por Guilera et al. (2010) para la formación de un planeta a 3UA para diferentes masas de disco y tiempo de disipación 5Ma	15
4.1. Condiciones iniciales para la población de planetesimales en un disco de $0.05M_{\odot}$ asumiendo un tiempo de disipación de la componente gaseosa de 1.5Ma	18
4.2. Planetas dentro de la Zona Habitable para las 3 Simulaciones con tiempo de disipación 1.5Ma y una masa de disco protoplanetario inicial de $0.05 M_{\odot}$	19
4.3. Planetas formados entre 2UA y 4UA para las 3 Simulaciones con tiempo de disipación 1.5Ma y una masa de disco protoplanetario inicial de $0.05 M_{\odot}$	19
4.4. Esta tabla muestra la cantidad de planetesimales (P) y embriones (E) que a lo largo de la integración fueron removidos debido a acreciones, eyecciones y colisiones con la estrella central para el disco de $0.05M_{\odot}$	20
4.5. Promedios de las excentricidades e inclinaciones para los planetas más y menos masivos del sistema de la Simulación N°1 del disco de $0.05M_{\odot}$	21
4.6. Promedios de las excentricidades e inclinaciones para los planetas más y menos masivos del sistema de la Simulación N°2 del disco de $0.05M_{\odot}$	23
4.7. Condiciones iniciales para la población de planetesimales del disco $0.1M_{\odot}$ asumiendo un tiempo de disipación de la componente gaseosa de 1.5Ma.	24
4.8. Principales características de los planetas formados en la Zona Habitable para las 3 Simulaciones realizadas considerando un disco de $0.1 M_{\odot}$ y un tiempo de disipación de 1.5Ma.	24
4.9. Principales características de los planetas formados entre 2UA y 4UA para las 3 Simulaciones asumiendo un tiempo de disipación 1.5Ma y una masa de disco protoplanetario inicial de $0.1 M_{\odot}$	25
4.10. Cantidad de planetesimales (P) y embriones (E) que a lo largo de la integración fueron removidos debido a acreciones, eyecciones y colisiones con la estrella central para el disco de $0.1M_{\odot}$	26
4.11. Promedios de las excentricidades e inclinaciones para los planetas más y menos masivos del sistema de la Simulación N°1 del disco de $0.1M_{\odot}$	26
4.12. Promedios de las excentricidades e inclinaciones para los planetas más y menos masivos del sistema, N°46 y N°37 respectivamente, de la Simulación N°2 del disco de $0.1M_{\odot}$	27

5.1.	Condiciones iniciales para la población de planetesimales en un disco de $0.05M_{\odot}$ asumiendo un tiempo de disipación de la componente gaseosa de 2.5Ma . . .	40
5.2.	Principales características de los planetas formados dentro de la Zona Habitable para las 3 Simulaciones con $\tau = 2.5Ma$ y una masa de disco protoplanetario inicial de $0.05M_{\odot}$	41
5.3.	Planetas formados entre 2UA y 4UA para las 3 Simulaciones con tiempo de disipación 2.5Ma y una masa de disco protoplanetario inicial de $0.05 M_{\odot}$. .	41
5.4.	Porcentaje de planetesimales (P) y embriones (E) que a lo largo de la integración fueron removidos debido a acreciones, eyecciones y colisiones con la estrella central asumiendo un tiempo de disipación del gas de 2.5Ma para un disco de $0.05 M_{\odot}$	41
5.5.	Promedios de las excentricidades e inclinaciones para los planetas más y menos masivos del sistema, N°61 y N°12 respectivamente, de la Simulación N°1 del disco de $0.05 M_{\odot}$	44
5.6.	Promedios de las excentricidades e inclinaciones para los planetas más y menos masivos del sistema para la Simulación N°2 del disco de $0.05 M_{\odot}$	45
5.7.	Condiciones iniciales para la población de planetesimales en un disco de $0.1M_{\odot}$ asumiendo un tiempo de disipación de la componente gaseosa de 2.5Ma . . .	45
5.8.	Principales características de los planetas formados en la Zona Habitable para las 3 Simulaciones con $\tau = 2.5Ma$ y una masa de disco protoplanetario inicial de $0.1M_{\odot}$	46
5.9.	Planetas formados entre 2UA y 4UA para las 3 Simulaciones con tiempo de disipación 2.5Ma y una masa de disco protoplanetario inicial de $0.1 M_{\odot}$. . .	46
5.10.	Porcentaje de planetesimales (P) y embriones (E) que a lo largo de la integración fueron removidos debido a acreciones, eyecciones y colisiones con la estrella central asumiendo un tiempo de disipación de 2.5Ma para un disco de $0.1M_{\odot}$	46
5.11.	Promedios de las excentricidades e inclinaciones para los planetas más y menos masivos del sistema (N°43 y N°45) de la Simulación N°3 del disco de $0.1M_{\odot}$	47
6.1.	Condiciones iniciales para la población de planetesimales asumiendo un tiempo de disipación de la componente gaseosa de 5Ma para un disco de $0.05M_{\odot}$. . .	58
6.2.	Características principales de los planetas formados dentro de la Zona Habitable para las 3 Simulaciones con tiempo de disipación de la componente gaseosa de 5Ma y una masa de disco protoplanetario inicial de $0.05 M_{\odot}$	59
6.3.	Planetas formados entre 2UA y 4UA para las 3 Simulaciones con tiempo de disipación 5Ma y una masa de disco protoplanetario inicial de $0.05 M_{\odot}$. . .	59
6.4.	Esta tabla muestra los porcentajes de planetesimales (P) y embriones (E) que a lo largo de la integración fueron removidos debido a acreciones, eyecciones y colisiones con la estrella central. Asumimos un tiempo de disipación de 5Ma y un disco de $0.05M_{\odot}$	59
6.5.	Promedios de las excentricidades e inclinaciones para los planetas más y menos masivos del sistema de la Simulación N°1 del disco de $0.05M_{\odot}$	63
6.6.	Promedios de las excentricidades e inclinaciones para los planetas más y menos masivos del sistema correspondientes a la Simulación N°2 del disco de $0.05M_{\odot}$	66
6.7.	Condiciones iniciales para la población de planetesimales en un disco de $0.1M_{\odot}$ asumiendo un tiempo de disipación de la componente gaseosa de 5Ma	68
6.8.	Características principales de los planetas formados dentro de la Zona Habitable para las 3 Simulaciones con tiempo de disipación 5Ma y una masa de disco protoplanetario inicial de $0.1 M_{\odot}$	68

6.9. Planetas formados entre 2UA y 4UA para las 3 Simulaciones con tiempo de disipación 5Ma y una masa de disco protoplanetario inicial de $0.1 M_{\odot}$	68
6.10. Porcentaje de planetesimales (P) y embriones (E) que a lo largo de la integración fueron removidos debido a acreciones, eyecciones y colisiones con la estrella central asumiendo un tiempo de disipación de 5Ma para un disco de $0.1M_{\oplus}$	70
6.11. Promedios de las excentricidades e inclinaciones para los planetas más y menos masivos (N°41 y N°22) del sistema de la Simulación N°3 del disco de $0.1M_{\odot}$.	72

Capítulo 1

Introducción

El estudio de los sistemas planetarios es un tópico de gran interés en las ciencias astronómicas. Hasta hace pocas décadas sólo se conocía el sistema planetario del cual formamos parte, el Sistema Solar. Sólo existían preguntas sobre la existencia de otros mundos, si es que los planetas eran un objeto único de nuestro sistema o si podemos encontrarlos en cada estrella del universo.

Gracias a las observaciones hay fuertes evidencias que indican la existencia de otros planetas orbitando estrellas distintas al Sol. Hoy en día se han descubierto 1894 planetas extrasolares y este número sigue en crecimiento (<http://exoplanets.eu/>).

A su vez los procesos de formación y evolución de sistemas planetarios resultan ser complejos, con muchos enigmas aún por resolver.

El objetivo general de nuestro trabajo es analizar la formación de planetas tipo terrestres en sistemas planetarios que no contengan gigantes gaseosos, alrededor de estrellas de tipo solar, y asumiendo diferentes escalas de tiempo para la disipación de la componente gaseosa del disco.

A partir de un estudio que realizamos para cada tiempo de disipación del disco protoplanetario, elegimos aquellos discos que no forman planetas gigantes. Para ello adoptamos el código que fue desarrollado por Guilera et al. (2010) con el que podemos analizar la formación de planetas gigantes gaseosos en un disco protoplanetario. Con estos resultados seleccionamos de manera correcta los discos que no formen este tipo de planetas.

Una vez elegidos los discos, utilizamos un modelo semianalítico desarrollado por Brunini y Benvenuto (2008) con el fin de analizar la evolución del sistema durante la etapa gaseosa. Este modelo nos permite modificar el tiempo de disipación del gas, que es el parámetro fundamental que buscamos testear en este trabajo. Elegimos tres valores distintos para este parámetro dentro del rango de los calculados por Mamajek (2009), entre 1.5 y 5 millones de años (Ma).

Los resultados del modelo semianalítico serán las condiciones iniciales que utilizaremos para el desarrollo de nuestras simulaciones de N-cuerpos. Para ello haremos uso del código MERCURY (Chambers 1999), en particular del integrador híbrido, el cual utiliza un método simpléctico de segundo orden cuando los objetos interactuantes están a menos de tres radios de Hill, y un método de Burlisch-Stoer para encuentros cercanos.

Nuestro objetivo es focalizar en el estudio de los planetas que se encuentran en la zona habitable, calculando sus características más importantes como por ejemplo su contenido de agua y determinar si existe algún tipo de correlación entre estos cuerpos y los que se forman a una distancia de la estrella central de entre 2UA y 4UA. De esta manera podremos analizar los sistemas de mayor interés astrobiológico y contrastar nuestros planetas con lo observado en la actualidad.

La tesis comenzará con una descripción de las consideraciones generales a tener en cuenta, luego pasaremos a describir los modelos que utilizamos tanto de disco protoplanetario como de los códigos que aplicamos durante el trabajo. Los siguientes capítulos estarán dedicados a los resultados alcanzados y para finalizar expondremos las conclusiones obtenidas.

Capítulo 2

Conceptos básicos

En este capítulo presentamos los conceptos básicos necesarios para comprender los fenómenos físicos que dan lugar a la formación de sistemas planetarios tanto desde el punto de vista teórico como observacional.

2.1. Planetas en el Sistema Solar

Durante mucho tiempo el Sistema Solar fue el único sistema planetario conocido y por ser el sistema del que formamos parte es del que tenemos mayor conocimiento.

Hace algunos años el Sistema Solar estaba compuesto por 9 planetas: Mercurio, Venus, Tierra, Marte, Júpiter, Saturno, Urano, Neptuno y Plutón. Sin embargo en la Asamblea General de la Unión Internacional Astronómica (IAU:International Astronomical Union) del año 2006 se resolvió que un planeta es todo cuerpo del sistema solar que no es un satélite, está en órbita alrededor del Sol, tiene suficiente masa para que su gravedad supere las fuerzas de cuerpo rígido y ha limpiado la vecindad de su órbita.

Por lo tanto, Plutón al no cumplir con el último requisito, dejó de llamarse planeta para entrar a una nueva clasificación, junto con otros cuerpos similares a él que se hallaron en el Sistema Solar, llamada planeta enano. Un planeta enano es aquel que cumple con los primeros dos requisitos de planeta pero que no ha barrido la vecindad de su órbita.

Luego, los planetas que componen el Sistema Solar son: Mercurio, Venus, Tierra, Marte, Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno. De los cuales los primeros cuatro son rocosos y los últimos cuatro son gigantes, rodeados por enormes envolturas gaseosas.

2.2. Formación de planetas terrestres

La formación de planetas terrestres puede dividirse en 3 modos distintos de crecimiento en el disco protoplanetario que se encuentran ordenados en el tiempo. En la primera etapa se forman los planetesimales en un disco de gas y polvo. En la segunda la evolución dinámica de la población de planetesimales genera colisiones entre los mismos formando una nueva clase de objetos llamada embriones planetarios, que representarían el estado intermedio entre planetesimales y planetas. En la tercera etapa, al finalizar la fase gaseosa, las órbitas de los embriones se vuelven inestables y las acreciones entre estos objetos o con cuerpos más pequeños forman lo que nosotros llamamos planetas terrestres.

Primero pasaremos a describir brevemente cómo es la formación del disco protoplanetario circunestelar.

2.2.1. Formación del disco protoplanetario

Todas las estrellas son el resultado del colapso gravitatorio de una nube de gas molecular. Si consideramos una nube esférica en equilibrio hidrostático autogravitante y la perturbamos, cuando su masa es mayor que una masa crítica se puede dar el colapso de la nube. El material alrededor de la estrella forma una estructura de disco orbitando alrededor del objeto central de acuerdo a la conservación del momento angular. Estos discos protoplanetarios se observan alrededor de estrellas de pre-secuencia principal.

2.2.2. Primera etapa

La formación de planetesimales del tamaño de kilómetros a partir de los granos de polvo es aún es un tópico en desarrollo. Los granos están sujetos a la fuerza de arrastre gaseoso. Esta fricción disminuye su energía orbital y genera que espiralen hacia la estrella central. A su vez, dichos granos son muy pequeñas como para que la gravedad sea efectiva en colisiones partícula-partícula y muy grandes como para que las fuerzas electrostáticas logren pegarlas. La fuerza que domina las colisiones en esta etapa es la fricción gaseosa.

La velocidad con la que son arrastrados estos granos depende del tamaño de los mismos, por lo que al colisionar tendrán velocidades relativas no despreciables y colisiones a estas velocidades podrían generar rupturas en vez de acreciones.

Para explicar la formación de planetesimales, existen 2 teorías que describiremos a continuación.

Una teoría propone que los planetesimales se forman mediante un proceso de coagulación de cuerpos más pequeños. Mientras más pequeños son los cuerpos con velocidades bajas, alrededor de un metro por segundo o menores, este proceso se hace más eficiente. Los cuerpos pequeños se aglutinan para formar objetos de mayores tamaños. Sin embargo, cuando los planetesimales alcanzan el tamaño de un metro, el tiempo de decaimiento a la estrella central es muy corto. Esta situación o problema se conoce como la “Barrera del metro”. Ya que si todos los planetesimales de un metro caen a la estrella central no es posible explicar la formación de objetos más grandes.

Otra teoría para la formación de planetesimales propone que los mismos se forman como resultado de grandes agrupamientos de pequeñas partículas concentradas en regiones del disco protoplanetario por alguna turbulencia del disco que generan inestabilidades gravitacionales. Estos modelos explican la formación de planetesimales con tamaños de 100km o mayores, sin pasar por tamaños intermedios. Una vez que hay suficientes partículas pequeñas concentradas la formación de planetesimales es rápida. Sin embargo la formación de estos enjambres es esporádica y no podríamos asumir que la formación de planetesimales comienza al mismo tiempo en toda región del disco protoplanetario.

2.2.3. Segunda etapa

Una vez formados los planetesimales y la dinámica de acreción es dominada por el efecto gravitatorio comienza la segunda etapa. Todavía no se ha disipado la componente gaseosa y la fricción que produce sobre los planetesimales amortigua sus excentricidades e inclinaciones.

Durante esta etapa, el crecimiento relativo de los cuerpos más masivos resulta ser mayor, dando lugar a lo que se conoce como etapa de crecimiento en fuga o “crecimiento runaway” (Kokubo y Ida, 1996). La fricción dinámica juega un papel importante amortiguando las excentricidades e inclinaciones de los cuerpos más masivos. Esto disminuye las velocidades relativas de estos cuerpos respecto a la población de planetesimales incrementando el enfocamiento gravitatorio. Al principio de esta fase, por necesidad, los planetesimales más grandes deben ser un pequeño porcentaje de la masa total.

El crecimiento en fuga termina cuando las masas de los cuerpos más grandes se vuelven importantes y por ende las perturbaciones de estos cuerpos comienzan a dominar la dinámica de la población de planetesimales.

El crecimiento de embriones se vuelve más lento a medida que crecen de tamaño. Sin embargo los embriones siguen acretando masa bajo un régimen llamado crecimiento oligárquico (Kokubo y Ida, 1998).

Las grandes velocidades relativas entre planetesimales impiden a los pequeños cuerpos acretar a otros, sus colisiones tienden a ser destructivas. Estos cuerpos pequeños entonces sólo pueden participar en el crecimiento de los embriones.

2.2.4. Tercera etapa

Cuando la componente gaseosa se encuentra presente en el disco, amortigua las excentricidades e inclinaciones de los cuerpos. Una vez disipado el gas, las excentricidades pueden crecer rápidamente debido a las interacciones gravitatorias, las órbitas comienzan a intersectarse y esto produce colisiones entre los embriones (Chambers & Wetherill 1998).

Este fenómeno conocido como crecimiento pos-oligárquico, forma cuerpos de tamaños mayores a los cuales llamaremos planetas. Estos planetas continúan creciendo debido a la acreción de planetesimales y embriones (Chambers, 2001; Raymond et al., 2006)) consumiendo el material que se encuentra aún disponible en su zona de alimentación.

2.3. Exoplanetas y su observación

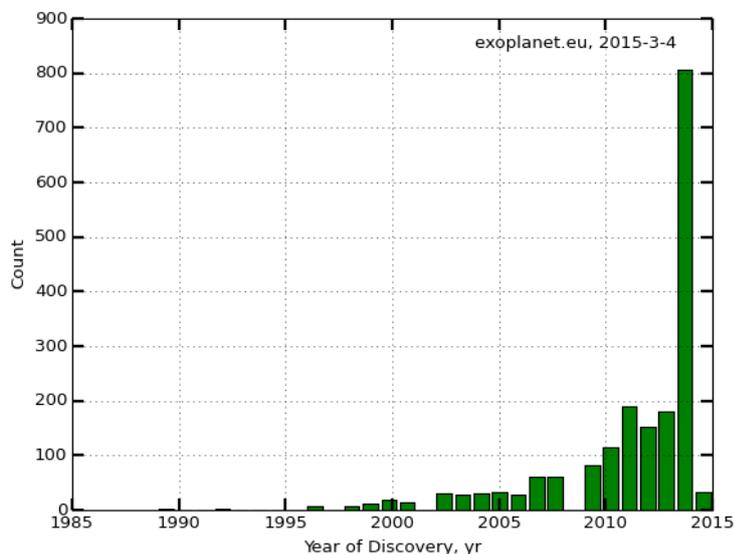


Figura 2.1. El histograma representa la cantidad de planetas que fueron descubiertos por año. Extraído de <http://exoplanet.eu/>

La definición de planeta extrasolar o exoplaneta es todo cuerpo que cumple con los requisitos para ser un planeta pero que no orbita alrededor del Sol. Durante mucho tiempo los planetas extrasolares fueron un misterio para la astronomía. No se podía responder si nuestro Sistema Solar era único o la formación de planetas era parte de un proceso natural que acompañaba al nacimiento de una estrella.

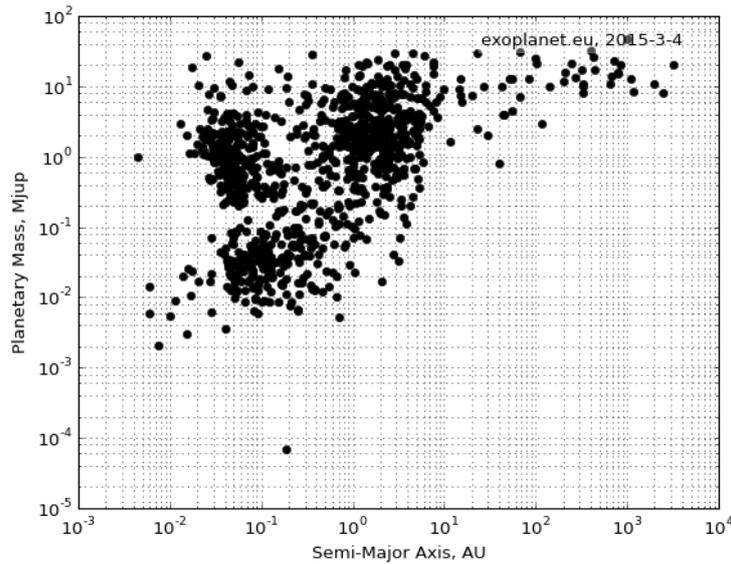


Figura 2.2. En el gráfico se muestra la masa de los planetas en función de su semieje mayor. La masa se encuentra en unidades de masa de Júpiter. Extraído de <http://exoplanet.eu/>

Lo que confirmó la existencia de exoplanetas fueron las observaciones por métodos indirectos como por ejemplo velocidades radiales, microlentes, tránsitos entre otras. La razón por la cual llevó tanto tiempo descubrir estos objetos es que los planetas son objetos oscuros cercanos a una fuente extremadamente brillante, su estrella anfitriona.

Según la Enciclopedia de Planetas Extrasolares (<http://exoplanet.eu/>), el número de planetas extrasolares confirmados descubiertos hasta el 28 de Junio de 2015 es de 1931. La cantidad de exoplanetas que se fueron descubriendo durante los últimos años se encuentra representada en la Figura 2.1.

Los planetas encontrados poseen características muy diversas en cuanto a los sistemas a los que pertenecen, sus excentricidades, sus masas y la masa de la estrella o las estrellas que orbitan, entre otras.

De la Figura 2.2 podemos observar que un gran porcentaje de los planetas detectados tiene masas entre $0.001-10 M_{Júpiter}$. A su vez el 70 % de los planetas detectados tienen masas mayores a la de Saturno.

Debido a un efecto de selección, la cantidad de planetas poco masivos es mucho menor, ya que es más dificultoso detectar observacionalmente este tipo de planetas. A su vez podemos observar que a diferencia de nuestro Sistema Solar encontramos planetas masivos con semiejes pequeños.

Además, si observamos la Figura 2.3 podremos ver que la mayor parte de los planetas detectados se encuentran orbitando estrellas tipo solar. Este es otro efecto de selección ya que estas estrellas en particular son las más observadas.

El planeta con la órbita más excéntrica dentro de nuestro Sistema Solar es Mercurio, con una excentricidad de 0.2. En la Figura 2.4 donde se presenta la excentricidad en función del semieje mayor, se puede observar que encontramos muchos planetas con excentricidades muy altas. Uno de los procesos que podría explicar este fenómeno es la dispersión planetaria.

Remarcamos que estos datos poseen un efecto de selección, detectando planetas más masivos, con órbitas más cortas y que aún las técnicas observacionales no pueden mostrarnos la diversidad de sistemas planetarios que se hayan en el universo.

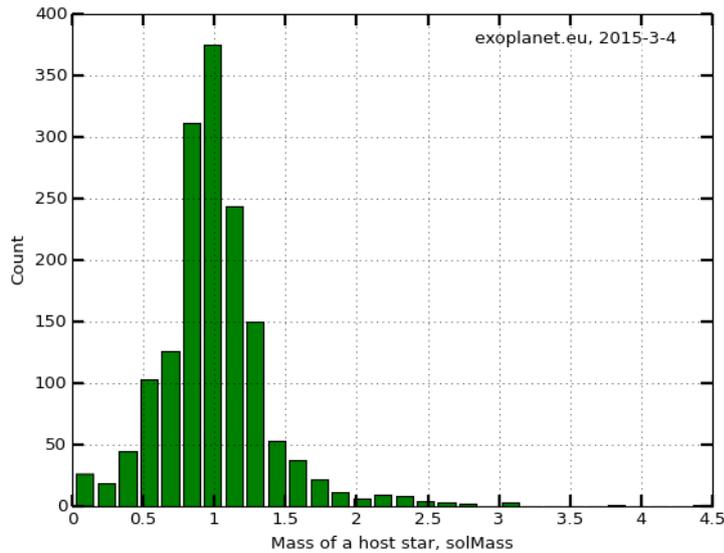


Figura 2.3. Número de planetas encontrados en función de la masa de la estrella a la que orbitan. Extraído de <http://exoplanet.eu/>

2.4. Zona Habitable

Uno de los objetivos de esta Tesis es poder determinar cuales son las características de aquellos sistemas planetarios capaces de albergar planetas potencialmente habitables. Para ello es fundamental definir a qué nos vamos a referir cuando hablemos de zona de habitabilidad o zona habitable. Cuando buscamos planetas potencialmente habitables lo hacemos comparando con las características del único planeta con vida conocido hasta el momento, la Tierra.

La zona habitable de un sistema planetario se define como la región circumestelar dentro de la cual un planeta con características similares a la Tierra es capaz de alojar agua en estado líquido en su superficie (Kasting et al., 1993).

En este trabajo adoptaremos dos zonas de habitabilidad propuestas por Kopparapu et al. (2013), la zona habitable optimista y la zona habitable conservadora, que se muestran en la Figura 2.5.

La zona habitable conservadora se encuentra relacionada con el efecto invernadero. El límite externo de esta región, en 1.70UA, es a partir del cual el efecto invernadero deja de ser eficiente y por lo tanto es posible congelar el agua que se encuentra en la superficie del planeta. El límite inferior de esta región, ubicado en 0.99UA, está determinado por efecto de 'pérdida de agua', para regiones más internas del sistema planetario la temperatura aumenta y esto genera que se evapore el agua de la superficie.

La zona habitable optimista se define comparando la luminosidad actual del Sol y la luminosidad que recibían Venus y Marte cuando alojaban agua en estado líquido en sus superficies. Estos límites están definidos entre 0.75UA y 1.77UA.

Luego, un planeta potencialmente habitable será el que se encuentre dentro de la zona de habitabilidad durante su órbita completa. Por lo tanto, siendo q la distancia pericéntrica y Q la distancia apocéntrica, la órbita del planeta se tiene que encontrar dentro de estos límites:

$$q = a(1 - e) = 0.75 \text{ UA} \quad (2.1)$$

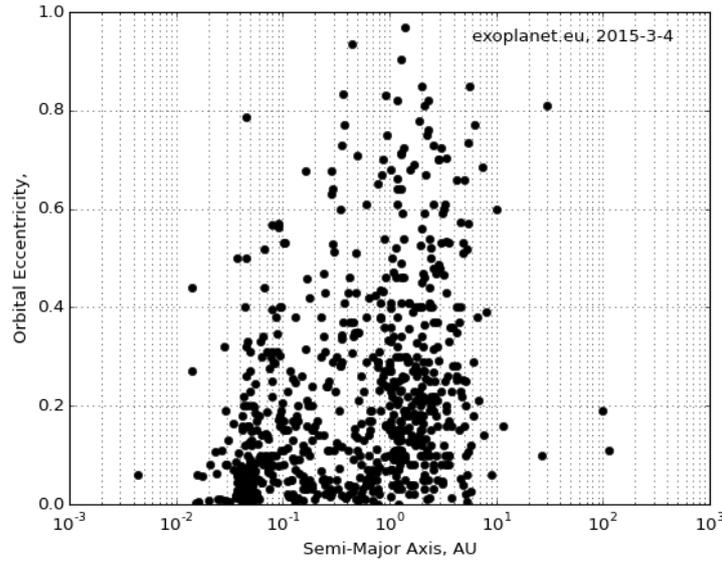


Figura 2.4. Semiejes de los exoplanetas en función de la distancia a su estrella central. Extraído de <http://exoplanet.eu/>

$$Q = a(1 + e) = 1.77 \text{ UA} \quad (2.2)$$

2.5. Trabajos previos

2.5.1. Tiempo de Disipación del Gas

Las propiedades estadísticas de los discos circumestelares alrededor de estrellas jóvenes es importante para contrastar con modelos teóricos de la formación y evolución temprana de sistemas planetarios.

La existencia de discos primordiales alrededor de estrellas jóvenes se infirió por medio de evidencia espectroscópica de polvo circumestelar alrededor de estrellas T-Tauri (estrellas pre-secuencia principal con masas menores a $2M_{\odot}$) que luego confirmaron estar distribuidos como discos.

La edad del disco protoplanetario es un parámetro relevante ya que debería decirnos algo sobre la naturaleza y distribución de material en el sistema. De acuerdo con Alexander et al. (2006) la mayoría de las estrellas de aproximadamente 10^6 años están rodeadas de discos que son generalmente un pequeño porcentaje de la masa solar, pero ya no se ven estrellas con discos de edades 10^7 años.

Estudios sobre cúmulos estelares jóvenes con particular énfasis en seguir la evolución de discos protoplanetarios primordiales mediante diagnósticos espectroscópicos y fotométricos, demostraron que la fracción de estrellas jóvenes con discos gruesos observables y/o aquellos que muestran evidencia de acreción parecieran seguir aproximadamente un decaimiento exponencial con un tiempo característico de 2.5Ma, como muestra la Figura 2.6(Mamajek (2009)). La muestra de estrellas con discos protoplanetarios observados presenta edades en el rango de $0.3 - 16 \times 10^6$ años.

Los discos protoplanetarios poseen las condiciones iniciales para la formación de planetas y para comprender la diversidad de sistemas planetarios debemos analizarlos en detalle. Estos resultados sobre los tiempos de disipación del gas de los discos, nos proveen un parámetro

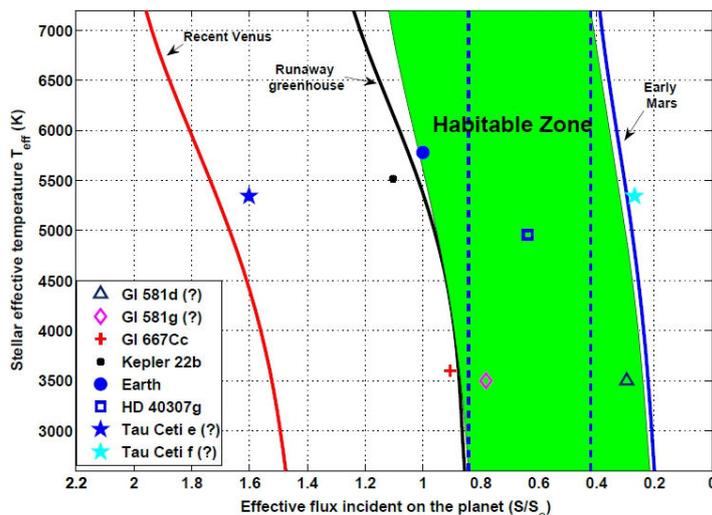


Figura 2.5. Figura extraída del trabajo de Kopparapu et al. (2013). La zona habitable optimista se encuentra delimitada por las líneas roja y azul y la región verde es la zona habitable conservativa.

para testear en los modelos de formación planetaria.

El objetivo general de este trabajo de Tesis es analizar la dependencia de la formación de planetas terrestres con la escala de tiempo de disipación de la componente gaseosa del disco protoplanetario. En términos generales, cuanto mayor es el tiempo de disipación de la componente gaseosa, mayor es la masa distribuida en embriones y menos masiva es la población de planetesimales al momento que el gas se disipa por completo.

2.5.2. Sistemas planetarios terrestres

Cumming et al. (2008), analizaron varios años de medidas de velocidades radiales tomados por el “Keck planet search” y descubrieron que solo el 17%-19% de los sistemas planetarios con estrellas tipo solar contienen planetas gigantes con masas mayores a $100M_{\oplus}$ dentro de las 20UA. A su vez Mayor y Queloz (2012) utilizaron datos espectroscópicos del Observatorio La Silla e infirieron que solamente alrededor del 14% de los sistemas con estrellas del tipo solar tienen planetas con masas mayores a $50M_{\oplus}$ dentro de las 5UA.

Mordasini et al. (2009), usaron un modelo de formación planetaria para calcular poblaciones de planetas que orbiten alrededor de estrellas tipo solar. Encontraron que sólo un 14% de los sistemas simulados poseían planetas con masas mayores a $100M_{\oplus}$, en concordancia con lo obtenido por Cumming et al. (2008).

Miguel et al. (2011), desarrollaron un código semianalítico para analizar la diversidad de sistemas planetarios. Para la acreción gaseosa utiliza un modelo de inestabilidad nucleada y tomando como condición inicial el régimen de crecimiento oligárquico. El disco protoplanetario inicial se constituye mayormente por una componente gaseosa, y una componente sólida formada por planetesimales y embriones. Los valores tomados para los tamaños y masas de los discos fueron obtenidas de los trabajos de Andrews et al. (2009) y Andrews et al. (2010a). Testeando este código para diferentes condiciones iniciales de discos hallaron que para discos de masas menores a $0.03M_{\odot}$ se forman sistemas planetarios únicamente constituídos por planetas terrestres.

Estos resultados, tanto teóricos como observacionales, son de gran interés, ya que nos indicarían que es un efecto de selección no encontrar sistemas conformados sólo con planetas terrestres, y que a futuro con mayor precisión instrumental y técnicas observacionales

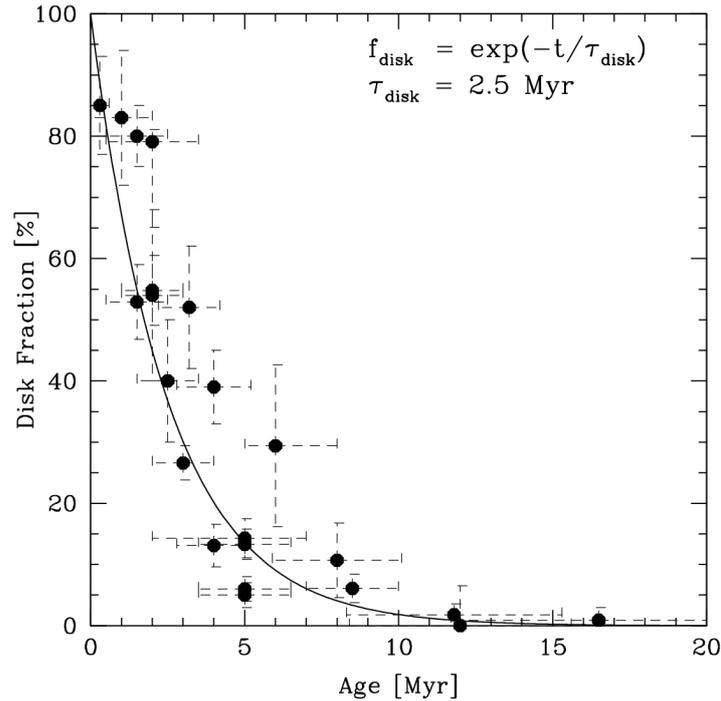


Figura 2.6. Gráfica extraída del trabajo de Mamajek (2009) donde se muestra la fracción de discos protoplanetarios observados en función de la edad de la estrella anfitriona.

avanzadas podríamos detectar una población significativa de esta clase sistemas planetarios.

A su vez, de Elía et al. (2013) desarrollaron simulaciones de N-cuerpos con el objetivo de analizar la formación de planetas terrestres en discos de alta masa sin gigantes gaseosos alrededor de estrellas de tipo solar. Este trabajo muestra un interés altamente significativo por diversas cuestiones. En primera instancia, los sistemas planetarios resultantes formaron Tierras, súper Tierras y mega Tierras en regiones cercanas a la línea de hielo. Estos planetas deberían ser vistos por futuros programas de observación basados en la técnica de microlentes gravitacionales (Green et al., 2011; Poteet et al., 2012). Por otra parte, dicho estudio focalizó en la formación de planetas de tipo terrestre en la zona de habitabilidad circumestelar. Los resultados indican que los planetas allí formados presentan una amplia diversidad de contenidos de agua por lo cual los sistemas en consideración tienen un interés astrobiológico relevante.

Las consideraciones generales brindadas en este capítulo servirán como marco teórico y observacional para el desarrollo de nuestro trabajo de tesis.

Capítulo 3

Modelos

En este capítulo describiremos los diferentes modelos que utilizaremos durante nuestro trabajo. En la primer sección describiremos el modelo semianalítico que nos permite determinar las condiciones del disco protoplanetario al finalizar la etapa gaseosa. Luego detallaremos el modelo de disco en que basaremos nuestro trabajo. Y por último describiremos el código con el que realizaremos las simulaciones de N-cuerpos.

3.1. Modelo Semianalítico: Descripción

Este modelo nos permite calcular la evolución del disco protoplanetario durante la fase gaseosa. Fue desarrollado por Brunini y Benvenuto (2008) con modificaciones de Guilera et al. (2010).

El disco protoplanetario tiene dos componentes que evolucionan en el tiempo, una componente gaseosa y otra componente sólida. El modelo asume que la masa inicial de sólidos se distribuye en su totalidad en planetesimales.

La componente gaseosa se disipa exponencialmente en un tiempo característico, que es un parámetro libre del modelo. La componente sólida evoluciona tanto por acreción como por migración de los planetesimales.

La componente sólida se ve representada por una grilla de dos dimensiones, una representa la coordenada radial y la otra los diferentes tamaños de los planetesimales. Mientras que la componente gaseosa se ve representada por una grilla de una dimensión que corresponde a la coordenada radial únicamente. Algunas cantidades como la densidad superficial del gas y el perfil de temperaturas sólo dependen de la coordenada radial, mientras que la densidad superficial de planetesimales, las excentricidades, inclinaciones y las velocidades de migración de los planetesimales además dependen del tamaño de los mismos.

La distribución de masa de los planetesimales está dada por la siguiente ley de potencias en base al trabajo de Kokubo y Ida (2000)

$$dn/dm \propto m^{-\alpha} \quad (3.1)$$

Ormel et al. (2010) obtuvieron un valor $\alpha = 2,5$, que caracterizaría la transición entre el régimen runaway y el régimen oligárquico.

Consideramos, basándonos en el trabajo Chambers (2006), que las excentricidades e inclinaciones de los planetesimales evolucionan tanto por excitaciones gravitacionales debidas a los embriones inmersos en el disco, como por el amortiguamiento debido al arrastre gaseoso. Las variaciones en las excentricidades e inclinaciones de los planetesimales debidas a las perturbaciones de los embriones fue modelada por Ohtsuki et al. (2002), pero es una aproximación local pues las excitaciones gravitacionales decrecen con el incremento de la distancia

entre el embrión planetario y los planetesimales. Hasegawa y Nakazawa (1990), demostraron que la interacción decae significativamente cuando la distancia es mayor que cuatro veces el radio de Hill del embrión.

Todavía queda modelar el efecto del gas sobre los planetesimales. La fuerza de arrastre gaseoso depende de la velocidad relativa entre el planetesimal y el gas y de la razón entre el radio del planetesimal y el camino medio libre molecular. Asumiendo que el disco gaseoso está mayormente compuesto por hidrógeno molecular, el camino medio está dado por Adachi (1976).

El crecimiento de los embriones se da durante el régimen de crecimiento oligárquico. La tasa de acreción de planetesimales está dada por Inaba et al. (2001), donde tenemos un parámetro que nos provee la probabilidad de colisión entre un embrión y los planetesimales que depende del radio del núcleo y el radio de Hill del embrión, y la velocidad relativa del mismo con el planetesimal. Si tenemos en cuenta que el embrión tiene una envoltura de gas no despreciable, tenemos que incorporar un aumento del radio efectivo de captura del embrión.

Definimos la región de alimentación del embrión, como la región en la cual el embrión puede acretar planetesimales. Esta región tiene un ancho de 4 Radios de Hill del embrión, centrada en la órbita del mismo.

En esta Tesis asumimos un único tamaño de los planetesimales, de radio de 10km, y no tenemos en cuenta la migración tipo I para los embriones.

3.2. Modelo de disco

Describiremos a continuación las características fundamentales de nuestro disco protoplanetario.

3.2.1. Perfil de Densidad Superficial

Adoptaremos una densidad superficial de gas inicial basándonos en los trabajos de Lynden-Bell y Pringle (1974) y Hartmann et al. (2009). Las siguientes expresiones combinan una ley de potencias para representar la parte más interna del disco, con un decaimiento exponencial para la parte más externa:

- Perfil de gas:

$$\Sigma_g(r, t = 0) = \Sigma_g^0 (r/R_c)^{-\gamma} e^{-(r/R_c)^{2-\gamma}} \quad (3.2)$$

Σ_g^0 es un valor que se determina a partir de la masa total inicial del disco.

Del mismo modo,

- Perfil de sólidos:

$$\Sigma_s(r) = \Sigma_s^0 \eta_{hielo} (r/R_c)^{-\gamma} e^{-(r/R_c)^{2-\gamma}} \quad (3.3)$$

donde R_c es el radio característico del disco y γ es el exponente que define de qué manera se distribuye el material. Asumimos $R_c = 39UA$ y $\gamma = 0.9$ que son valores medios obtenidos del trabajo de Andrews et al. (2010b) del análisis de 17 discos protoplanetarios. En la Figura 3.1 podemos ver las distribuciones de estos parámetros para los discos observados.

El parámetro η_{hielo} define el incremento de la densidad de sólidos por la condensación de material volátil más allá de la línea de hielo. Tomando el Modelo de la Nebulosa Solar Mínima de Hayashi (1981) ubicamos la Línea de Hielo en 2.7UA, donde la condensación del agua se da a aproximadamente 170°K. Luego la función será:

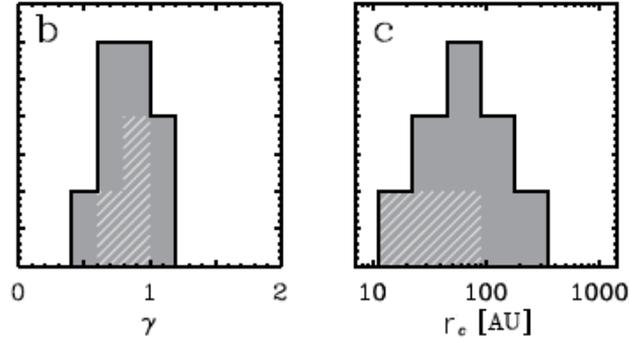


Figura 3.1. Gráfico extraído del trabajo de Andrews et al. (2010) donde se muestran las distribuciones asociadas al gradiente de densidad superficial del disco y al radio característico. El eje y representa el número de discos y la zona rayada representa la contribución de 4 discos que presentan una disminución en la emisión de sus zonas centrales.

$$\eta_{hielo} \begin{cases} 1/4 & \text{si } r < 2.7UA \\ 1 & \text{si } r > 2.7UA \end{cases}$$

3.2.2. Metalicidad

El cociente entre los perfiles de la densidad de gas y sólidos está relacionado con la metalicidad de la estrella central como

$$\left(\frac{\Sigma_s^0}{\Sigma_g^0}\right)_* = \left(\frac{\Sigma_s^0}{\Sigma_g^0}\right)_\odot 10^{[Fe/H]} = z_0 10^{[Fe/H]} \quad (3.4)$$

donde z_0 es la abundancia de elementos pesados en el Sol que resulta ser de 0.0149 según Lodders (2003).

En nuestro trabajo asumimos que la estrella central tiene $1 M_\odot$ y metalicidad solar, o sea que $[Fe/H] = 0$.

3.2.3. Tiempo de Disipación del Gas

Consideramos que la componente gaseosa se disipa exponencialmente como

$$\Sigma_g(r, t) = \Sigma_g(r, t = 0) e^{-t/\tau} \quad (3.5)$$

donde τ es el tiempo característico de disipación del gas. El objetivo de este trabajo es testear diferentes tiempos de disipación del gas, y ver su influencia sobre las arquitecturas finales de los sistemas simulados.

Mamajek (2009) realizó un estudio estadístico sobre la existencia de discos protoplanetarios primordiales observados en cúmulos jóvenes. La muestra de estrellas con discos protoplanetarios observados presenta edades en el rango de $0.3 - 16 \times 10^6$ años.

Como ya hemos mencionado, el objetivo de nuestro trabajo es analizar la dependencia de la formación de planetas terrestres con la escala de tiempo de disipación de la componente gaseosa del disco protoplanetario. Para ello elegimos 3 escalas de tiempo: $\tau = 1.5Ma$, $\tau = 2.5Ma$ y $\tau = 5Ma$. Luego integramos con el modelo semianalítico desde $t = 0$ hasta cada escala de tiempo característica.

Masa del disco [M_{\odot}]	Masa total [M_{\oplus}]	Masa del núcleo [M_{\oplus}]	Masa de la envoltura [M_{\oplus}]
0.05	0.141120	0.141120	10^{-7}
0.06	0.209082	0.209082	10^{-7}
0.07	0.305860	0.305859	10^{-6}
0.08	0.420904	0.420901	3×10^{-6}
0.09	0.565016	0.565007	9×10^{-6}
0.10	0.785312	0.785273	3.9×10^{-6}
0.11	1.13529	1.13507	0.00022
0.12	1.81014	1.80797	0.00217
0.13	2.4500	2.83185	0.01315
0.14	4.14102	4.09406	0.04696
0.15	5.51796	5.40151	0.11645

Tabla 3.1. Resultados obtenidos utilizando el código desarrollado por Guilera et al. (2010) para la formación de un planeta a 3UA para diferentes masas de disco y tiempo de disipación 1.5Ma

Masa del disco [M_{\odot}]	Masa total [M_{\oplus}]	Masa del núcleo [M_{\oplus}]	Masa de la envoltura [M_{\oplus}]
0.05	0.259705	0.259704	1×10^{-6}
0.06	0.404735	0.404733	2×10^{-6}
0.07	0.604869	0.604857	1.2×10^{-5}
0.08	0.911032	0.910959	7.3×10^{-5}
0.09	1.51200	1.51106	9×10^{-4}
0.10	2.54852	2.53771	0.01081
0.11	3.70717	3.66194	0.04523
0.12	4.91188	4.78922	0.12266
0.13	6.15131	5.89016	0.26114
0.14	7.47639	6.99829	0.4781
0.15	8.93513	8.13215	0.80298

Tabla 3.2. Extraído del trabajo de de Elía et al.(2013) de la formación de un planeta a 3UA para diferentes masas de disco y tiempo de disipación 2.5Ma

3.2.4. Masa Inicial del Disco Protoplanetario

Como hemos mencionado antes, el objetivo de este trabajo es testear el parámetro τ pero restringiéndonos a sistemas planetarios que no contengan gigantes gaseosos. Esto quiere decir, sistemas en que sólo se formen planetas del tipo terrestres.

Para poder obtener este resultado necesitamos definir a partir de qué masa inicial de disco comienza a no ser despreciable la masa de la envoltura gaseosa de un planeta formado con este tipo de simulaciones.

Las Tablas 3.1 y 3.3 obtenidas con el código desarrollado por Guilera et al. (2010), y la Tabla 3.2 extraída del trabajo de de Elía et al. (2013), contienen los resultados de la formación de un embrión en 3UA al finalizar la etapa gaseosa para diferentes masas de disco, para $\tau = 1.5Ma$, $\tau = 5Ma$ y $\tau = 2.5Ma$ respectivamente.

Se exponen sólo los resultados del embrión a 3UA dado que la región detrás de la línea de hielo representa la zona más eficiente para la formación de las estructuras más masivas del sistema, siempre y cuando no se tengan en cuenta efectos asociados a la migración tipo I.

Masa del disco [M_{\odot}]	Masa total [M_{\oplus}]	Masa del núcleo [M_{\oplus}]	Masa de la envoltura [M_{\oplus}]
0.05	0.634620	0.634607	1.3×10^{-5}
0.06	1.11211	1.11193	0.00018
0.07	1.94868	1.94495	0.00373
0.08	2.88511	2.85885	0.02626
0.09	3.83779	3.75251	0.08528
0.10	4.91287	4.70904	0.20383
0.11	6.13978	5.73815	0.40163
0.12	7.59426	6.86609	0.72817
0.13	9.39652	8.11282	1.2837
0.14	11.7188	9.48629	2.23251
0.15	15.2184	11.0325	4.1859

Tabla 3.3. Resultados obtenidos utilizando el código desarrollado por Guilera et al. (2010) para la formación de un planeta a 3UA para diferentes masas de disco y tiempo de disipación 5Ma

En la Tabla 3.1 podemos observar que aún para un disco de $0.15 M_{\odot}$ la masa de la envoltura gaseosa del embrión es mínima en comparación a la masa en sólidos del mismo. En cambio para el tiempo de disipación de 5Ma a mayores masas de disco la envoltura se vuelve más importante, aunque no es la necesaria para que se desate el runaway gaseoso.

Por lo analizado anteriormente, decidimos elegir 2 masas de disco de $0.05 M_{\odot}$ y $0.1 M_{\odot}$ en común para cada uno de los tiempos característicos de disipación del gas. Si bien en estos discos no se forman gigantes, esperamos que sí se formen Tierras, súper Tierras y hasta mega Tierras.

3.2.5. Distribución Inicial de Agua

Adoptamos una distribución inicial de agua en base a los datos obtenidos por Abe et al. (2000) de meteoritos primitivos. Por lo tanto el porcentaje de agua por masa dependiendo la distancia radial será:

$$\left\{ \begin{array}{ll} 0.001 \% & \text{si } r < 2UA \\ 0.1 \% & \text{si } 2UA < r < 2.5UA \\ 5 \% & \text{si } 2.5UA < r < 2.7UA \\ 50 \% & \text{si } r > 2.7UA \end{array} \right.$$

Estos valores son asignados antes de iniciar las simulaciones de N-cuerpos de acuerdo a sus ubicaciones iniciales en el disco, tanto para embriones como para planetesimales. Sin embargo, como esta distribución está basada a partir de muestras de nuestro Sistema Solar, es importante remarcar que esta distribución podría no ser representativa de la variedad de sistemas planetarios existentes.

3.3. Modelo de N-cuerpos: Descripción

El modelo de N-cuerpos que utilizamos en este trabajo fue desarrollado por Chambers (1999) y se conoce bajo el nombre de MERCURY. Es un integrador híbrido que utiliza un algoritmo simpléctico para calcular interacciones entre objetos con separaciones mayores que 3 radios de Hill y un método de Burlisch-Stoer para resolver encuentros cercanos.

La cantidad de cuerpos a utilizar en cada simulación se ve limitada por el tiempo de cómputo, ya que el algoritmo crece cuadráticamente con el número de partículas.

Otras consideraciones a tener en cuenta son: que los planetesimales no interactúan entre sí (lo cual reduce el tiempo de cómputo) y que en las colisiones se conserva tanto la masa como el contenido de agua, es decir, son inelásticas.

Para poder ejecutar el código de N-cuerpos, debemos definir tanto las condiciones iniciales del sistema luego de la etapa gaseosa, como parámetros necesarios del modelo para realizar la integración. Las cantidades que debemos precisar son:

1. Cantidad de cuerpos
2. Para cada cuerpo:
 - Masa
 - Elementos orbitales
 - Densidad
3. Tiempo de integración
4. Paso de integración

En este capítulo hemos descrito tanto los modelos numéricos como el modelo de disco que utilizaremos en nuestro trabajo. Los capítulos siguientes mostrarán los resultados obtenidos a partir de los escenarios propuestos luego de la aplicación de dichos modelos.

Capítulo 4

Simulaciones con un Tiempo de Disipación del Gas de 1.5Ma

A lo largo de este capítulo analizaremos los resultados de la formación de sistemas planetarios a partir de discos en los cuales la componente gaseosa se disipa en 1.5 Ma. Como anticipamos en el capítulo anterior, decidimos analizar escenarios de formación para discos de $0.05 M_{\odot}$ y $0.1 M_{\odot}$.

4.1. Disco $0.05 M_{\odot}$

En esta sección presentamos los resultados concernientes a la formación de sistemas planetarios a partir de un disco de $0.05 M_{\odot}$, asumiendo un tiempo de disipación para la componente gaseosa de 1.5Ma. En primer lugar haremos uso del modelo semianalítico para hallar las distribuciones de embriones planetarios y planetesimales al finalizar la etapa gaseosa. Dichas distribuciones serán nuestras condiciones iniciales para las simulaciones de N-cuerpos. Por último utilizaremos el código MERCURY para realizar nuestras simulaciones de N-cuerpos y analizaremos las características principales de los sistemas planetarios simulados.

4.1.1. Aplicación del Modelo Semianalítico

Como hemos visto en el capítulo anterior, el Modelo Semianalítico nos proporciona la evolución de embriones planetarios y planetesimales durante la etapa gaseosa. En este caso asumimos que el tiempo de disipación de la componente gaseosa es de 1.5Ma. Al finalizar la integración, este código numérico nos permite obtener una distribución de embriones y un residuo en planetesimales tal como muestra la Figura 4.1. La masa total en sólidos contenida entre 0.5UA y 5UA es de aproximadamente $14.55 M_{\oplus}$, donde el 25.5% se distribuye en embriones y el 74.5% en planetesimales.

Recordemos que nuestra región de estudio se extiende entre 0.5UA y 5UA. En efecto, la región seleccionada incluye la zona de habitabilidad del sistema, así como también un disco exterior a la línea de hielo (2.7UA) donde reside material rico en agua. A partir de esto, será posible analizar la formación de planetas potencialmente habitables, computar sus contenidos de agua, así como también derivar correlaciones con planetas formados en regiones más externas cercanas a la línea de hielo.

Los resultados obtenidos con el modelo semianalítico serán nuestras condiciones iniciales para el modelo de N-cuerpos.

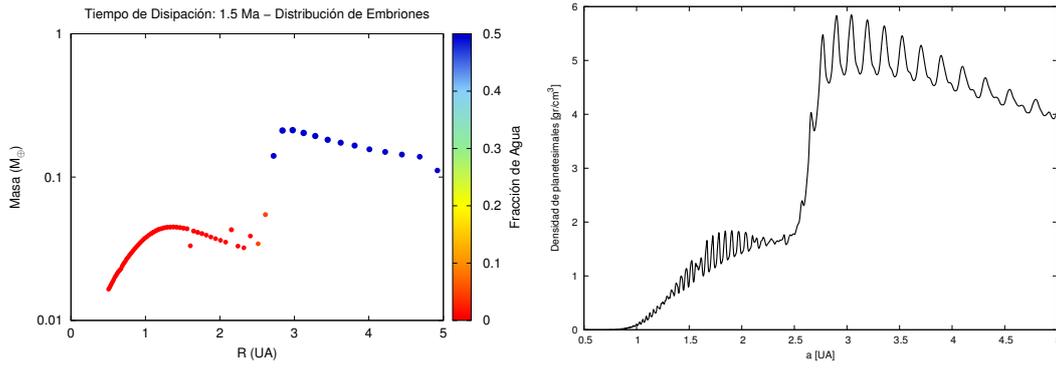


Figura 4.1. Distribuciones de embriones y planetesimales al final de la etapa gaseosa asumiendo un disco $0.05M_{\odot}$ y tiempo de disipación 1.5Ma utilizando el modelo semianalítico. Serán las condiciones iniciales del modelo de N-cuerpos.

Región del disco	Número de Planetesimales
0.5-1UA	0
1-1.5UA	7
1.5-2UA	27
2-2.5UA	40
2.5-3UA	124
3-3.5UA	181
3.5-4UA	199
4-4.5UA	207
4.5-5UA	215

Tabla 4.1. Condiciones iniciales para la población de planetesimales en un disco de $0.05M_{\odot}$ asumiendo un tiempo de disipación de la componente gaseosa de 1.5Ma

4.1.2. Modelo de N-Cuerpos: Condiciones Iniciales

El modelo semianalítico nos proporciona las masas individuales y semiejes para los embriones planetarios al finalizar la etapa gaseosa. Asumimos una densidad para los embriones de 3 gr/cm^3 .

Como mencionamos anteriormente, a partir del modelo semianalítico podemos calcular la masa total de planetesimales entre 0.5UA y 5UA cuando se disipa la componente gaseosa del disco. Por otro lado para modelar eficientemente el fenómeno de fricción dinámica que los planetesimales ejercen sobre los embriones, la masa de los planetesimales debe ser al menos un orden de magnitud menor que la masa del embrión menos masivo que se encuentra en la distribución obtenida al disiparse el gas.

De esta manera, y separando la región de estudio en 9 anillos de 0.5UA, podemos calcular cuántos planetesimales tenemos que introducir en cada anillo (Tabla 4.1). Recordemos que siempre se utilizan 1000 planetesimales en total.

Para distribuir los planetesimales en nuestra región de estudio, utilizamos el método de Von Neumann, que calculará el semieje de cada uno siguiendo la distribución dada por el modelo semianalítico. Asumimos una densidad para los planetesimales de 1.5 gr/cm^3 .

El resto de los elementos orbitales iniciales tanto para planetesimales como para embriones son asignados al azar para cada simulación. Puesto que el gas amortigua las excentricidades e inclinaciones tanto de los planetesimales como de los embriones, estos cuerpos se mantienen cercanos al plano del disco protoplanetario. Luego, las excentricidades e inclinaciones son

Simulación	Planeta	Semieje inicial	Semieje final	Masa final	Porcentaje de agua final
N° 1	N°28	1.05UA	1.16UA	$1.42M_{\oplus}$	25.29 %
N° 2	N°23	0.91UA	1.11UA	$1.04M_{\oplus}$	23.48 %
	N°59	2.98UA	1.43UA	$1.15M_{\oplus}$	34.69 %
N° 3	N°20	0.83UA	0.77UA	$1.69M_{\oplus}$	19 %
	N°58	2.84UA	1.34UA	$0.69M_{\oplus}$	43.24 %
	N°63	3.62UA	1.75UA	$0.94M_{\oplus}$	30.56 %

Tabla 4.2. Planetas dentro de la Zona Habitable para las 3 Simulaciones con tiempo de disipación 1.5Ma y una masa de disco protoplanetario inicial de $0.05 M_{\odot}$

Simulación	Planeta	Semieje inicial	Semieje final	Masa final
N° 1	N°67	4.44UA	3.18 UA	$0.30M_{\oplus}$
	N°63	3.62UA	3.21UA	$0.62M_{\oplus}$
N° 2	N°60	3.12UA	2.37UA	$1.43M_{\oplus}$
	N°58	2.84UA	3.02UA	$1.46M_{\oplus}$
N° 3	N°59	2.98UA	2.50 UA	$1.61 M_{\oplus}$
	N°66	4.22UA	3.03UA	$0.27M_{\oplus}$
	N°53	2.32UA	3.70UA	$0.04M_{\oplus}$

Tabla 4.3. Planetas formados entre 2UA y 4UA para las 3 Simulaciones con tiempo de disipación 1.5Ma y una masa de disco protoplanetario inicial de $0.05 M_{\odot}$

menores a 0.02 y 0.5° respectivamente. La longitud del nodo, el argumento del perihelio y la anomalía media varían entre 0° y 360° .

El tiempo de integración que asumimos para todas las simulaciones es de 200Ma basándonos en los trabajos de Touboul et al. (2007) y Dauphas y Pourmand (2011) que toman entre 100Ma y 200Ma como límites superiores para la formación de planetas terrestres en el Sistema Solar. El paso de integración lo determinamos en base a la órbita del objeto más interno de nuestra región de estudio. Para alcanzar una precisión suficiente utilizamos un paso de 6 días.

Debido a la naturaleza estocástica del proceso de acreción, realizamos 3 simulaciones, modificando el número “semilla” que genera variables al azar. Para cada simulación, como mencionamos antes, se generan 1000 planetesimales y la cantidad de embriones está dada por el modelo semianalítico. Si se obtienen N embriones estos se etiquetarán desde el número 1 hasta el N, luego los planetesimales serán etiquetados desde el número N+1 hasta el 1000+N+1 para cada simulación.

4.1.3. Resultados del Modelo de N-cuerpos

Las 3 simulaciones evolucionaron durante 200Ma. En nuestras simulaciones se forman dos clases diferentes de planetas en la zona habitable. Por un lado, los planetas formados “in situ” que acretan sus contenidos finales de agua a partir de impactos de planetesimales y embriones provenientes del disco externo. Por otro lado, los “mundos de agua” son planetas que comenzaron la simulación más allá de la línea de hielo y finalizaron en la zona habitable luego de sufrir una migración significativa producto de las interacciones gravitatorias con embriones y planetesimales. Como se ve, si bien esta clase de planetas potencialmente habitables tiene contenidos de agua superlativos, los mismos se definen a partir de consideraciones dinámicas.

Simulación	Acreciones		Eyecciones		Colisiones Centrales	
	P	E	P	E	P	E
N°1	32.6 %	79.71 %	1.2 %	0 %	1.6 %	0 %
N° 2	35.3 %	79.71 %	1.2 %	0 %	1.4 %	0 %
N° 3	33.6 %	76.81 %	0.7 %	0 %	2.4 %	0 %

Tabla 4.4. Esta tabla muestra la cantidad de planetesimales (P) y embriones (E) que a lo largo de la integración fueron removidos debido a acreciones, eyecciones y colisiones con la estrella central para el disco de $0.05M_{\odot}$

Es importante destacar que los mundos de agua tienen un contenido de agua primordial del 50 % de su masa inicial.

Para este disco con este tiempo de disipación vale la pena mencionar que todas las simulaciones forman al menos un planeta en la zona habitable del sistema. En la Tabla 4.2 se listan las características fundamentales de los mismos, tal como el porcentaje de agua, semieje inicial y final, y sus masas finales. A partir de estos datos es posible distinguir dos diferentes escenarios de interés significativo, por un lado el de la Simulación N°1 que presenta sólo un planeta en la zona de habitabilidad el cual proviene de la zona interna del disco, pues su semieje inicial es menor que 2.7UA. Por otra parte, el otro escenario de interés es el que presentan las Simulaciones N°2 y N°3, donde además de poseer un planeta de características similares al de la Simulación N°1, los mismos coexisten en la zona habitable con mundos de agua.

En la Tabla 4.3 presentamos los resultados más relevantes para los planetas que alcanzan la región entre 2UA y 4UA.

Primer escenario

En la Figura 4.2 presentamos la evolución temporal de la Simulación N°1. En un principio, debido a la distribución dada por el modelo semianalítico podemos ver que la mayoría de los planetesimales ocupan la parte más externa del disco. Al comenzar la evolución, tanto embriones como planetesimales comienzan a interactuar gravitatoriamente generando encuentros y colisiones en el sistema. Recordemos que, para simplificar, el modelo de N-cuerpos no considera interacciones entre planetesimales, no sufren ni colisiones ni encuentros entre ellos. Se puede observar la remoción de planetesimales y embriones a medida que pasa el tiempo, representado en la Figura 4.3 donde sólo el 34.5 % de los planetesimales fueron removidos, y sobreviven aproximadamente el 20 % de los embriones. El mecanismo de remoción de planetesimales más importante es la acreción ya que sólo el 1.2 % fueron eyectados y el 1.6 % colisionaron con la estrella central como indica la Tabla 4.4. Los embriones no sufrieron eyecciones ni colisiones con la estrella central, por lo tanto los mismos son removidos de la simulación a partir de procesos de acreción.

El planeta formado en la zona habitable (N°28) comienza la simulación en regiones internas a la línea de hielo, su semieje inicial era de 1.05UA. Por ende, dicho planeta no resulta ser un mundo de agua en base a las consideraciones dinámicas que hemos tenido en cuenta para esta definición. Sin embargo, tal como observamos de la Tabla 4.2, este planeta muestra un contenido final de agua elevado, el cual alcanza un 25 % de su masa. Recordemos que estos porcentajes representan una cota superior ya que consideramos colisiones inelásticas. Para averiguar de dónde proviene el agua acretada analizamos su historia colisional. La Figura 4.4 representa esquemáticamente las colisiones del planeta durante su evolución. En principio podemos resaltar que la colisión con planetesimales es mucho más frecuente que con embriones.

	Planeta	Masa	Semieje inicial	Semieje final	Promedio excentricidad	Promedio inclinación
Planeta más masivo	N°61	$2.06M_{\oplus}$	3.28UA	1.82UA	0.08	3.31°
Planeta menos masivo	N°67	$0.30M_{\oplus}$	4.44UA	3.18UA	0.18	7.37°

Tabla 4.5. Promedios de las excentricidades e inclinaciones para los planetas más y menos masivos del sistema de la Simulación N°1 del disco de $0.05M_{\odot}$.

Sabiendo los semiejes iniciales de cada cuerpo podemos hallar su porcentaje de agua y por ende el porcentaje de agua aportado por embriones y por planetesimales durante los 200Ma. Nuestros análisis sugieren que el 87.3% se debe a la acreción de planetesimales de la zona externa del disco y el porcentaje restante fue aportado por embriones. Debido a su posición inicial en el disco protoplanetario, el porcentaje de agua inicial es despreciable.

Es interesante estudiar cómo fue la evolución de este planeta dentro de la zona de habitabilidad. Podemos apreciar que el planeta desde un comienzo se encontró dentro de esta zona como muestra la Figura 4.5, y allí se mantuvo hasta los 200Ma. El contenido final de agua así como también su evolución orbital ofrecen un escenario óptimo para que este planeta pueda mantener agua en estado líquido sobre su superficie.

Otro dato a destacar es que la última gran colisión sufrida por el planeta formado en la zona habitable se da a los 196Ma, Figura 4.6. Este dato resulta de interés ya que es una medida de su tiempo de formación.

En la Figura 4.8 exponemos la evolución temporal de la masa del planeta más masivo de esta simulación. Dicho planeta finaliza con una masa de $2.06M_{\oplus}$ y recibe una última colisión debida a un embrión planetario a los 70.7Ma.

Analizando los planetas más y menos masivos del sistema podemos observar en la Figura 4.7 que para el planeta más masivo se amortiguan sus excentricidades e inclinaciones. Las excentricidades e inclinaciones medias de estos planetas se presentan en la Tabla 4.5. Para el planeta más masivo (N°61) los valores medios de excentricidad e inclinación son de 0.08 y 3.31° respectivamente, mientras que para el planeta menos masivo (N°67) se obtuvieron valores medios de 0.18 y 7.37° .

Segundo escenario

En la Figura 4.9 mostramos la evolución en el tiempo de la Simulación N°2, que elegimos como representativa de este escenario. Al igual que en el primer escenario, desde el comienzo de la evolución, los embriones y planetesimales interactúan gravitatoriamente. Luego de 200Ma, el sistema conserva el 20.29% de los embriones iniciales, mientras que el porcentaje de planetesimales sobrevivientes es del 62.1%, como muestra la Figura 4.10.

Cabe destacar que el mecanismo de remoción más importante es el de acreción, tanto para los grandes como pequeños cuerpos, tal como indica la Tabla 4.4. Las eyecciones y colisiones contra la estrella central sólo afectan a los pequeños cuerpos en un porcentaje menor al 2%. Los embriones planetarios no sufren tales efectos.

Al final de la simulación, dos planetas sobreviven en la zona habitable. Tomando los valores de la Tabla 4.2, vemos que uno de los planetas comienza la simulación en una región interna a la línea de hielo, mientras que el otro resulta ser un mundo de agua. El primero de estos planetas (N°23) comienza su evolución con un semieje mayor de 0.91UA. Debido a su localización inicial en el disco, su contenido primordial de agua es casi despreciable. Luego de evolucionar durante 200Ma, el planeta presenta un contenido de agua de 23.48%. Este porcentaje de agua proviene en un 5% de embriones planetarios y un 95% de planetesimales acretaados. Por lo tanto, para esta clase de planetas, los planetesimales juegan un rol

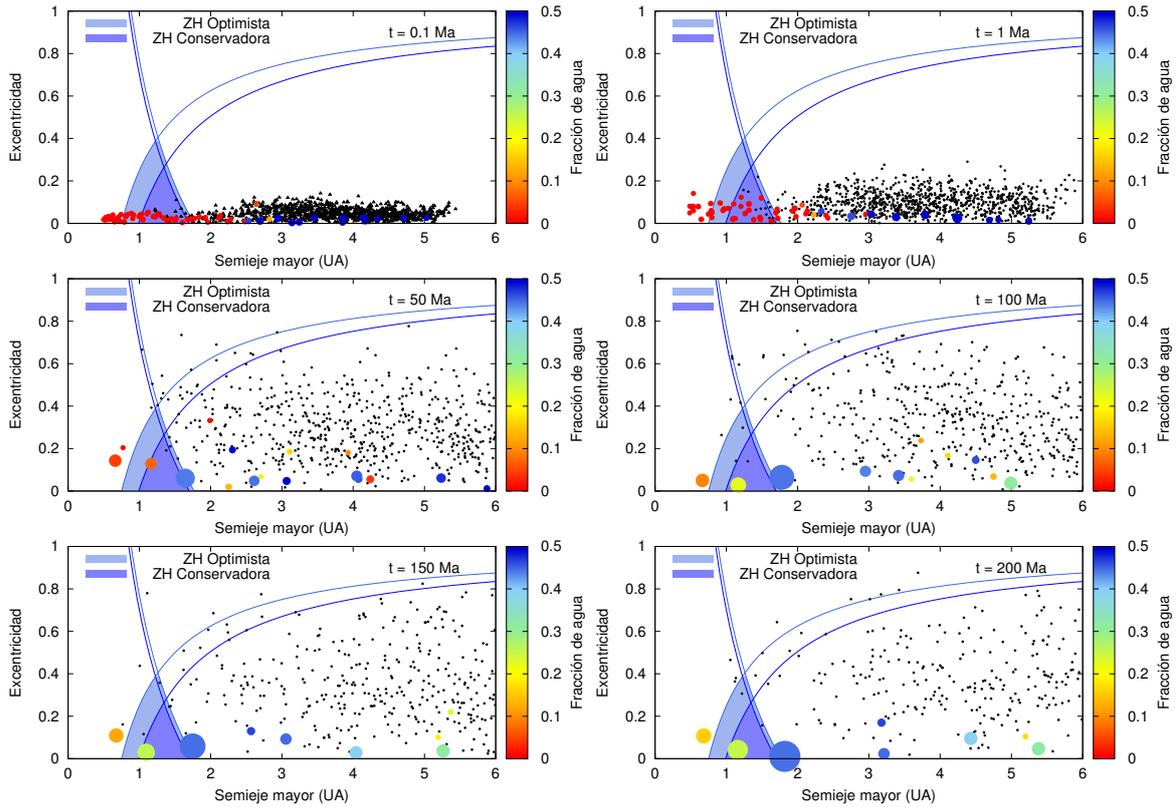


Figura 4.2. Evolución temporal de la Simulación 1. Los puntos negros representan a los planetesimales, los círculos llenos representan a los embriones, y las variaciones de colores indican el porcentaje de agua de los mismos. Las regiones coloreadas son las Zonas de Habitabilidad, donde definimos una Conservadora y una Optimista. Las curvas de afelio y perihelio constantes son graficadas con colores azul y celeste y están asociadas a los límites internos y externos de las Zonas Habitables, Conservadora y Optimista. En el estado final del Sistema se encuentra un planeta en la Zona de Habitabilidad (N°28) con una masa de $1.42M_{\oplus}$, un semieje de 1.16UA y un 25.29% de agua.

importante suministrando grandes cantidades de agua desde el disco externo.

Como ya mencionamos, el segundo planeta que finaliza en la zona habitable es un mundo de agua (N°59). Dicho planeta comienza la simulación más allá de la línea de hielo, con un semieje mayor inicial de 2.98UA. Debido a su localización inicial en el disco su contenido primordial de agua es del 50% de su masa inicial ($0.11M_{\oplus}$). El contenido final de agua, luego de 200Ma, es de 34.69%. En este caso el 73.57% proviene de la acreción de planetesimales de la región externa del disco y el 26.43% se debe tanto a la cantidad de agua primordial como a las colisiones con embriones.

Para cada uno de los planetas nos interesa analizar su evolución orbital y de este modo, investigar su permanencia en la zona habitable. De la Figura 4.11 podemos ver que el planeta más interno siempre se mantuvo dentro de la zona de habitabilidad. Sólo su apocentro estuvo por fuera de la zona en el momento del último gran impacto que tuvo este planeta, tal como podemos contrastar en la Figura 4.12. Podemos realizar el mismo análisis para el mundo de agua. De la Figura 4.11 vemos que al comenzar la evolución el embrión fue migrando desde la zona externa del disco hasta depositarse en la zona habitable a los pocos millones de años. Sin embargo, una gran colisión antes de los 50Ma (Figura 4.12) produjo que el planeta se apartara de la zona de habitabilidad, pero debido a interacciones gravitatorias posteriores se

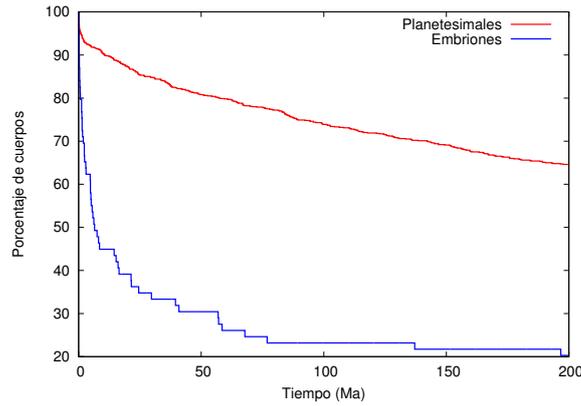


Figura 4.3. Porcentajes de planetesimales y embriones en función del tiempo. Gráfico correspondiente a la Simulación N°1 del disco de $0.05M_{\odot}$

	Planeta	Masa	Semieje inicial	Semieje final	Promedio excentricidad	Promedio inclinación
Planeta más masivo	N°58	$1.45M_{\oplus}$	2.84UA	3.02UA	0.08	3.39°
Planeta menos masivo	N°16	$0.97M_{\oplus}$	0.75UA	0.70UA	0.14	5.95°

Tabla 4.6. Promedios de las excentricidades e inclinaciones para los planetas más y menos masivos del sistema de la Simulación N°2 del disco de $0.05M_{\odot}$.

volvió a ubicar dentro de los límites de dicha región. A partir de estos análisis podemos inferir que ambos planetas presentan condiciones propicias para mantener agua en estado líquido sobre su superficie, convirtiéndose en blancos de gran interés astrobiológico.

El planeta más masivo (N°58) que se encuentra en el sistema tiene una masa de $1.46M_{\oplus}$ y un semieje final de 3.02UA. De la Figura 4.13 observamos que el tiempo asociado al último gran impacto recibido por este planeta es de 63.5Ma.

En la Figura 4.14 realizamos la comparación de excentricidades e inclinaciones de los planetas más y menos masivos del sistema, N°58 y N°16 respectivamente. Observamos que para el planeta más masivo estos valores se ven amortiguados. Los valores medios de las inclinaciones y excentricidades los mostramos en la Tabla 4.6. El planeta más masivo tiene una excentricidad media de 0.08 y una inclinación media de 3.39° , mientras que los valores para el planeta menos masivo son de 0.14 y 5.95° para la excentricidad e inclinación respectivamente.

Región del disco	Número de Planetesimales
0.5-1UA	0
1-1.5UA	0
1.5-2UA	1
2-2.5UA	11
2.5-3UA	37
3-3.5UA	97
3.5-4UA	185
4-4.5UA	274
4.5-5UA	395

Tabla 4.7. Condiciones iniciales para la población de planetesimales del disco $0.1M_{\odot}$ asumiendo un tiempo de disipación de la componente gaseosa de 1.5Ma.

Simulación	Planeta	Semieje inicial	Semieje final	Masa final	Porcentaje de agua final
N° 1	N°23	1.11 UA	0.81UA	$2.23M_{\oplus}$	13.25 %
	N°46	2.89 UA	1.42UA	$4.49M_{\oplus}$	46.59 %
N° 2	N°45	2.89UA	1.29UA	$3.1M_{\oplus}$	26.42 %
N° 3	N°48	3.27UA	1.05UA	$1.25M_{\oplus}$	48.65 %
	N°51	4.11UA	1.21UA	$1.94M_{\oplus}$	27.76 %

Tabla 4.8. Principales características de los planetas formados en la Zona Habitable para las 3 Simulaciones realizadas considerando un disco de $0.1 M_{\odot}$ y un tiempo de disipación de 1.5Ma.

4.2. Disco $0.1 M_{\odot}$

En esta sección realizamos un análisis análogo al anterior concerniente a la formación de sistemas planetarios, considerando un disco de $0.1M_{\odot}$ y asumiendo el mismo tiempo de disipación de 1.5Ma para la componente gaseosa.

4.2.1. Aplicación del Modelo Semianalítico

El modelo semianalítico nos proporciona la evolución del disco protoplanetario durante la etapa gaseosa. En este caso asumimos un tiempo de disipación de 1.5Ma. La Figura 4.15 presenta la distribución de embriones y planetesimales al final la integración durante la fase gaseosa. La masa total contenida entre 0.5UA y 5UA es de aproximadamente $29.1M_{\oplus}$, donde el 39 % se distribuye en embriones y el 61 % en planetesimales.

4.2.2. Modelo de N-Cuerpos: Condiciones Iniciales

Las condiciones iniciales para el modelo de N-cuerpos se calculan de manera análoga a lo explicado en la sección 4.1.2. En particular en este caso la distribución de planetesimales en la región de estudio está dada por la Tabla 4.7.

4.2.3. Resultados del Modelo de N-Cuerpos

En este caso las Simulaciones N°1 y N°2 fueron integradas hasta los 200Ma, mientras que la Simulación N°3 debido a los extensos tiempos de cómputo, sigue completando su integra-

Simulación	Planeta	Semieje inicial	Semieje final	Masa final
N° 1	N°48	3.27UA	2.33 UA	2.41 M_{\oplus}
	N°51	4.11UA	3.73UA	2.07 M_{\oplus}
N° 2	N°46	2.89UA	2.18UA	4.42 M_{\oplus}
	N°51	4.11UA	3.6UA	2.39 M_{\oplus}
	N°37	1.96UA	3.97UA	0.15 M_{\oplus}
N° 3	N°49	3.27UA	2.19UA	1.25 M_{\oplus}
	N°47	3.26UA	3.84UA	2.44 M_{\oplus}

Tabla 4.9. Principales características de los planetas formados entre 2UA y 4UA para las 3 Simulaciones asumiendo un tiempo de disipación 1.5Ma y una masa de disco protoplanetario inicial de 0.1 M_{\odot}

ción por lo que mostraremos los resultados a 83.9Ma. Destacamos que las tres simulaciones conservan la energía mejor que una parte en 10^3 .

Todas nuestras simulaciones forman planetas en la zona habitable del sistema, cuyas características más relevantes pueden ser observadas en la Tabla 4.8. A partir de los datos ofrecidos por esta tabla y de manera similar a lo analizado en el disco anterior, resulta interesante distinguir dos escenarios con características particulares, como los que presentan las simulaciones N°1 y N°2. En el escenario presentado por la Simulación N°1 coexisten, al finalizar la integración, en la zona habitable un mundo de agua y un planeta formado en la región interna del disco. Mientras que en la Simulación N°2, luego de 200Ma, sólo se forma un mundo de agua en la zona de habitabilidad.

Presentamos a su vez en Tabla 4.9 las características fundamentales de los planetas que se encuentran entre 2UA y 4UA para estas simulaciones.

Pasaremos a describir en detalle los dos escenarios de interés:

Primer escenario

En la Figura 4.16 presentamos el mosaico de evolución de la Simulación N°1. En un principio todos los cuerpos de la simulación muestran excentricidades e inclinaciones pequeñas, con los planetesimales en su mayoría ubicados más allá de la línea de hielo debido a la distribución dada por el modelo semianalítico. Cuando los cuerpos comienzan a interactuar generan colisiones y encuentros, que se traducen en cambios en sus posiciones y en la remoción de cuerpos en el disco.

La cantidad de cuerpos a medida que pasa el tiempo va disminuyendo, como muestra la Figura 4.17. Al finalizar la integración sobrevive un 49.2% de planetesimales y un 33.33% de embriones. Tanto para planetesimales como para embriones el mecanismo de remoción que predomina es la acreción. En efecto, el 26.6% de los planetesimales y 66.66% de los embriones fueron removidos por este fenómeno, como indica la Tabla 4.10. Por otra parte un 9.5% de los planetesimales colisionaron a su vez con la estrella central y un 14.7% fueron eyectados. Nuevamente destacamos que los embriones no sufrieron estos efectos de remoción.

Los planetas de mayor interés para nuestro análisis son aquellos que se encuentran en la zona habitable. Como hemos dicho antes, esta simulación forma dos planetas en dicha región. Por un lado, el más interno de esta región (N°23) se encuentra a 0.81UA, tiene una masa de 2.23 M_{\oplus} y finaliza con un 13.25% de agua. Destacamos que este planeta comienza la simulación en regiones internas a la línea de hielo. Debido a esto, su contenido primordial de agua es despreciable. Al los 200Ma el contenido final de agua de dicho planeta es proporcionado casi en su totalidad por planetesimales de la zona externa del disco.

Simulación	Acreciones		Eyecciones		Colisiones Centrales	
	P	E	P	E	P	E
N°1	26.6 %	66.67 %	14.7 %	0 %	9.5 %	0 %
N° 2	24.1 %	70.37 %	17.9 %	1.85 %	11.3 %	1.85 %
N° 3	24.3 %	62.1 %	6.4 %	0 %	9.2 %	1.85 %

Tabla 4.10. Cantidad de planetesimales (P) y embriones (E) que a lo largo de la integración fueron removidos debido a acreciones, eyecciones y colisiones con la estrella central para el disco de $0.1M_{\odot}$

	Planeta	Masa	Semieje inicial	Semieje final	Promedio excentricidad	Promedio inclinación
Planeta más masivo	N°46	$4.49M_{\oplus}$	2.89UA	1.42UA	0.12	4.69°
Planeta menos masivo	N°9	$0.72M_{\oplus}$	0.66UA	0.51UA	0.37	14.20°

Tabla 4.11. Promedios de las excentricidades e inclinaciones para los planetas más y menos masivos del sistema de la Simulación N°1 del disco de $0.1M_{\odot}$

El planeta más externo (N°46) de la zona habitable es un mundo de agua. El mismo se ubica a 1.42UA tiene una masa de $4.49M_{\oplus}$ y un contenido de agua del 46.59 %. Debido a la posición inicial que tenía en el disco, su contenido primordial de agua era del 50 % de su masa inicial ($0.47M_{\oplus}$). La cantidad de agua aportada por embriones teniendo en cuenta el contenido primordial del planeta es de aproximadamente 60 %, mientras que los planetesimales aportan aproximadamente el 40 %. Si bien los dos planetas se encuentran en la zona de habitabilidad su camino hasta ubicarse en la región fue distinto. En la Figura 4.18 presentamos la evolución temporal de los semiejes, apocentros y pericentros de los planetas en cuestión. En el caso del planeta más interno observamos que su semieje y apocentro siempre se mantuvieron dentro de los límites de la zona habitable, mientras que su pericentro varía entre la región más interna del disco y la zona de habitabilidad. Las excursiones periódicas del pericentro fuera de la zona habitable nos obliga a poner en duda el interés astrobiológico de este planeta. En efecto, este escenario no garantiza la sustentabilidad del agua en estado líquido sobre su superficie.

El mundo de agua inició su evolución más allá de la línea de hielo y migró, debido a interacciones gravitatorias con otros cuerpos, hacia la zona de habitabilidad. Luego de 200Ma, la órbita del mundo de agua se encuentra dentro de los límites de la zona habitable. Por ende este escenario es propicio para el mantenimiento del agua en estado líquido sobre su superficie. Por lo tanto el planeta de la zona de habitabilidad de mayor interés astrobiológico en este escenario es el mundo de agua. La Figura 4.19 nos muestra la evolución de la masa de los planetas de la zona habitable como función del tiempo. El tiempo asociado al último gran impacto es de Ma para el planeta más interno y 50Ma para el mundo de agua. Destacamos que el mundo de agua, con $4.5M_{\oplus}$, es el planeta más masivo del sistema.

Podemos ver de la Figura 4.20 la comparación las excentricidades e inclinaciones de los planetas más y menos masivos del sistema, N°46 y N°9 respectivamente, a lo largo del tiempo. Los valores medios de las excentricidades e inclinaciones para ambos planetas se encuentran en la Tabla 4.11. Para el planeta más masivo los valores medios de la excentricidad e inclinación son 0.12 y 4.69° respectivamente, mientras que para el planeta menos masivo son de 0.37 y 14.20° .

	Planeta	Masa	Semieje inicial	Semieje final	Promedio excentricidad	Promedio inclinación
Planeta más masivo	N°46	$4.42M_{\oplus}$	2.89UA	2.18UA	0.10	4.01°
Planeta menos masivo	N°37	$0.15M_{\oplus}$	1.96UA	3.97UA	0.38	18.74°

Tabla 4.12. Promedios de las excentricidades e inclinaciones para los planetas más y menos masivos del sistema, N°46 y N°37 respectivamente, de la Simulación N°2 del disco de $0.1M_{\odot}$.

Segundo escenario

La descripción general de la evolución de este sistema es análoga a la descrita en el escenario anterior, sin embargo su configuración final es distinta como muestra la Figura 4.21.

En la Figura 4.22 observamos el porcentaje de cuerpos remanentes en función del tiempo. A los 200Ma sobreviven en el disco el 46.7 % de planetesimales y 25.93 % de embriones que había en un principio. El 11.3 % de los cuerpos pequeños colisionaron con la estrella central, el 17.9 % fueron eyectados y el 24.1 % resultaron acretados por cuerpos más masivos. En el caso de los embriones el 70.37 % fueron acretados, 1 colisionó con la estrella central y 1 fue eyectado. En efecto, el mecanismo de remoción más efectivo para planetesimales y embriones fue la acreción.

A los 200Ma, la arquitectura final de este sistema presenta un planeta en la zona más interna del disco a 0.61UA con una masa de $2.14M_{\oplus}$. En la zona de habitabilidad se encuentra un mundo de agua (N°45) ubicado a 1.29UA con un 26.42 % de agua y una masa final de $3.1M_{\oplus}$. La región más poblada en este escenario es la zona entre 2UA y 4UA donde encontramos 3 planetas con masas entre $0.15-4.42M_{\oplus}$.

Es de particular interés para nuestro estudio, el análisis detallado del planeta ubicado en la zona de habitabilidad. De la Figura 4.23 observamos que el planeta comenzó su evolución en regiones externas a la línea de hielo. A los pocos millones de años ingresó en la zona habitable debido a una gran colisión que sufrió, la cual le aportó casi el 24 % de su masa. A partir de ese momento se mantuvo dentro de los límites de la zona habitable hasta los 200Ma. Por lo tanto este escenario es propicio para el mantenimiento del agua en estado líquido sobre su superficie. El porcentaje de agua aportado por planetesimales de la zona externa del disco fue aproximadamente del 56 %, mientras que el porcentaje restante se debió a colisiones con embriones y la cantidad de agua primordial del planeta. Debido a la posición inicial que tenía en el disco, su contenido primordial de agua era del 50 % de su masa inicial.

Al analizar la historia colisional del planeta más masivo del sistema (N°46), Figura 4.24, observamos que colisionó con 6 embriones a lo largo de su evolución y que a los 39.9Ma el planeta sufrió su último gran impacto. A su vez si comparamos con la Figura 4.25 observamos que a partir de ese momento su masa no aumentó considerablemente. Este dato es de gran interés ya que es una medida de su tiempo de formación.

En la Figura 4.26 presentamos la variación de las excentricidades e inclinaciones en función del tiempo para los planetas más y menos masivos del sistema, N°46 y N°37 respectivamente. Los valores medios de la excentricidad e inclinación del planeta más masivo son de 0.10 y 4.01° respectivamente, mientras que para el planeta menos masivo son de 0.38 y 18.74° como muestra la Tabla 4.12.

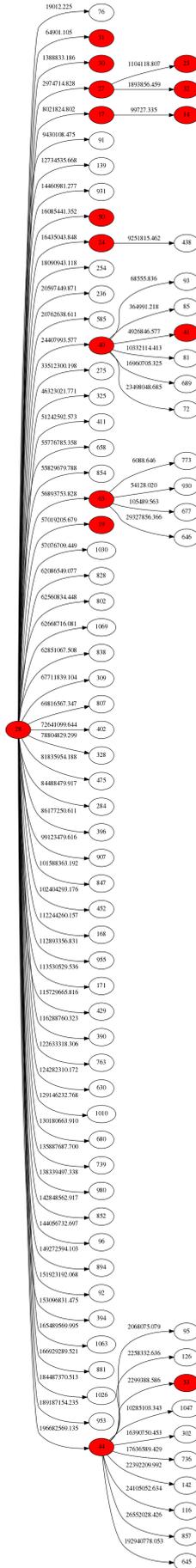


Figura 4.4. Esta gráfica representa la historia de colisiones del Planeta (N°28) que se encuentra en la Zona Habitable de la Simulación N° 1 del disco de $0.05M_{\odot}$. Cada número es identificatorio de un cuerpo, los coloreados en rojo son embriones y los blancos planetesimales

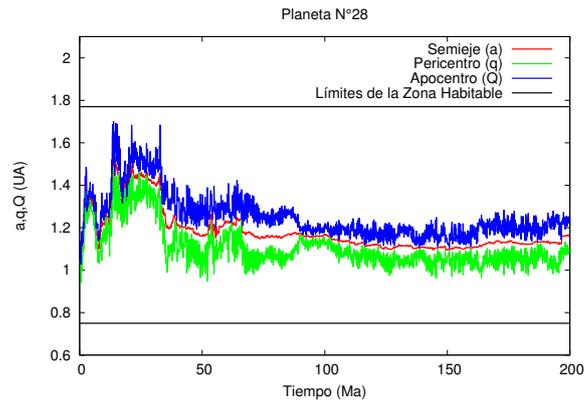


Figura 4.5. Evolución en el tiempo del Semieje Mayor (a), apocentro (Q) y pericentro (q) para el planeta (N°28) que se encuentra en la Zona de Habitabilidad correspondiente a la Simulación N°1 del disco de $0.05M_{\odot}$.

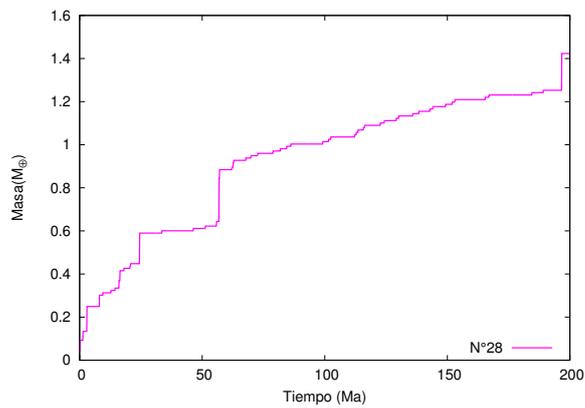


Figura 4.6. Evolución en el tiempo de la masa del planeta (N°28) que se encuentra en la Zona de Habitabilidad para la Simulación N°1 del disco de $0.05M_{\odot}$.

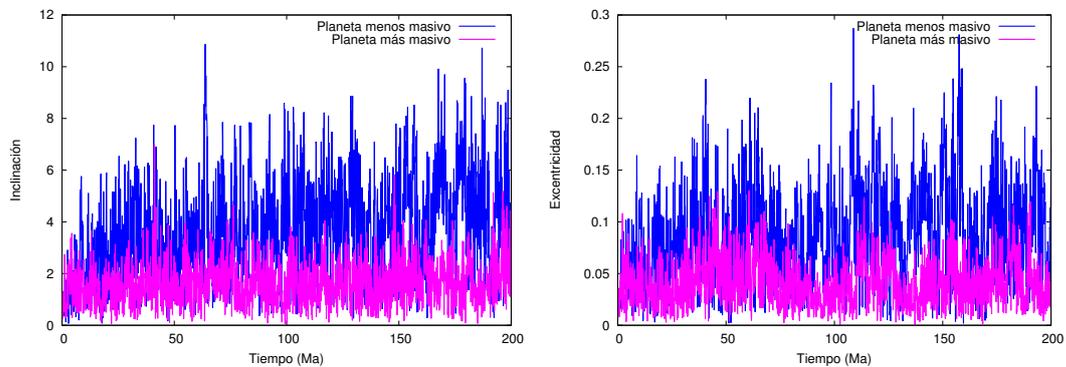


Figura 4.7. Variaciones en el tiempo de la inclinación y la excentricidad para los planetas más y menos masivos del sistema, N°61 y N°67 respectivamente, de la Simulación N°1 del disco de $0.05M_{\odot}$.

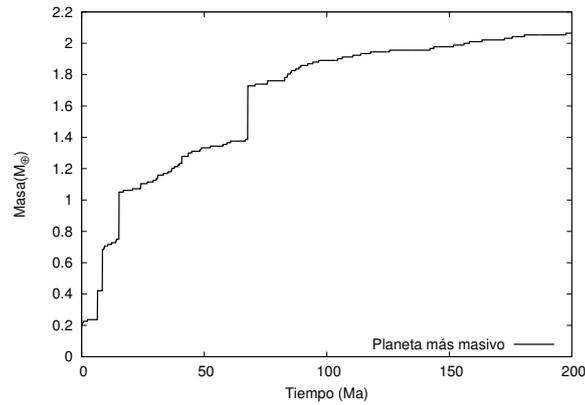


Figura 4.8. Variaciones en el tiempo de la masa para el planeta más masivo (N°61) del sistema de la Simulación N°1 del disco de $0.05M_{\odot}$.

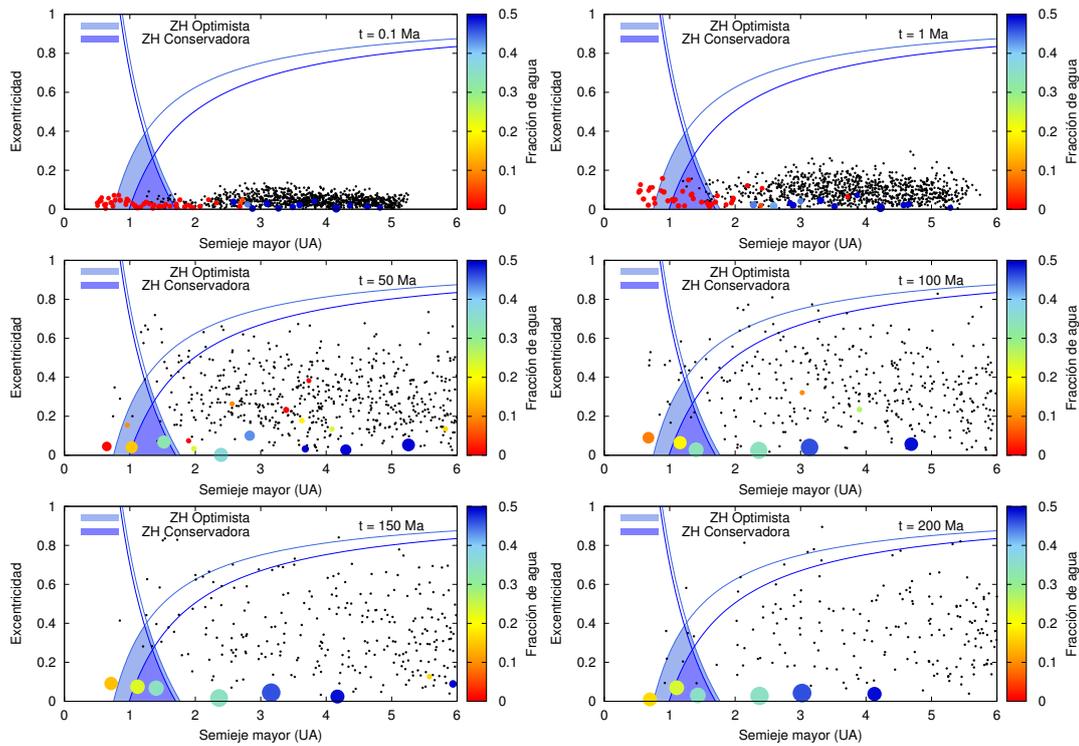


Figura 4.9. Evolución temporal de la Simulación N° 2. Los puntos negros representan a los planetesimales, los círculos llenos representan a los embriones, y las variaciones de colores indican el porcentaje de agua de los mismos. Las regiones coloreadas son las Zonas de Habitabilidad, donde definimos una Conservadora y una Optimista. Las curvas de afelio y perihelio constantes son graficadas con colores azul y celeste y están asociadas a los límites internos y externos de las Zonas Habitables, Conservadora y Optimista. En el estado final del Sistema se encuentran dos planeta en la Zona de Habitabilidad. Un planeta (N°23) de $1.04M_{\oplus}$ con un contenido de agua del 23.48 % ubicado en 1.11UA. El segundo planeta (N°59) ubicado a 1.43UA es un mundo de agua con una masa de $1.15M_{\oplus}$ y 34.69 % de agua.

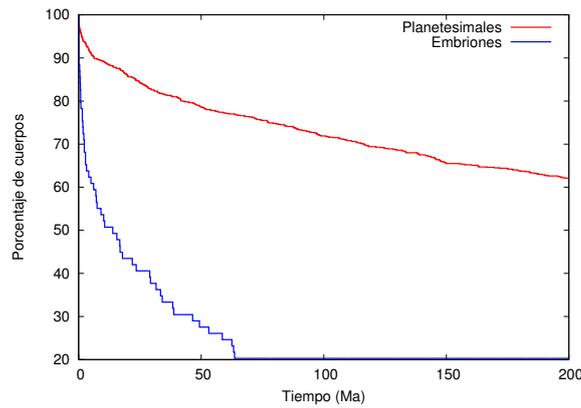


Figura 4.10. Porcentajes de planetesimales y embriones a medida que el sistema evoluciona en la Simulación N°2 del disco $0.05M_{\odot}$

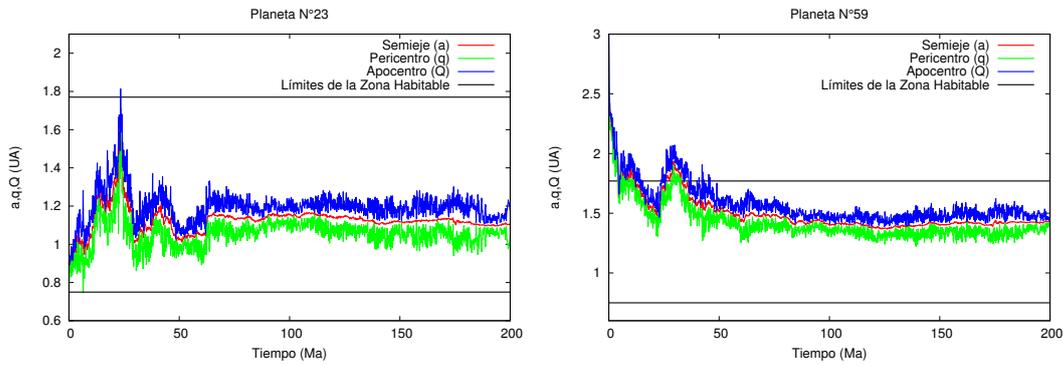


Figura 4.11. Evolución en el tiempo del Semieje Mayor (a), apocentro (Q) y pericentro (q) para los planetas que se encuentra en la Zona de Habitabilidad correspondiente a la Simulación N°2 del disco de $0.05M_{\odot}$. El planeta N°23 es el más interno y el N°59 es un mundo de agua.

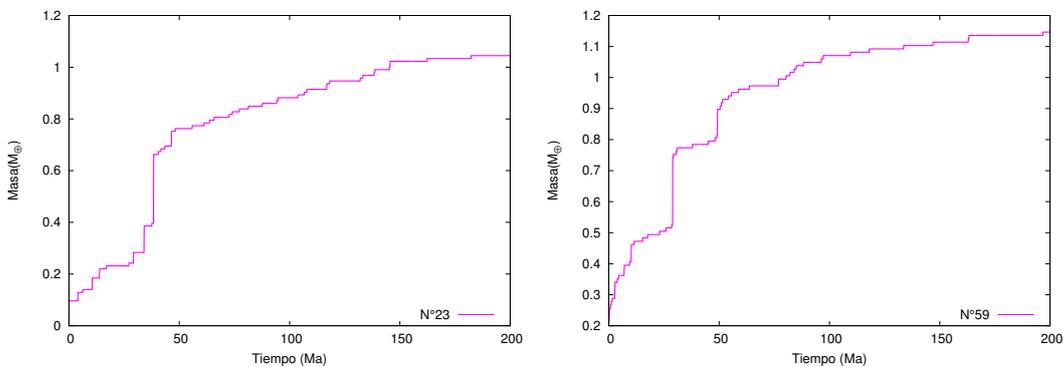


Figura 4.12. Evolución en el tiempo de la masa para los planetas que se encuentra en la Zona de Habitabilidad correspondientes a la Simulación N°2 del disco de $0.05M_{\odot}$. El planeta N°23 es el más interno y el N°59 es un mundo de agua.

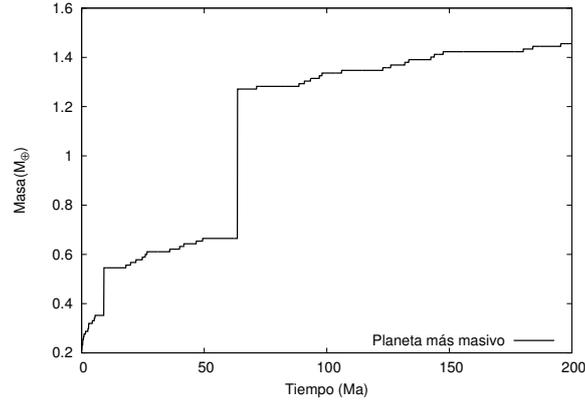


Figura 4.13. Variaciones en el tiempo de la masa para el planeta más masivo del sistema (N°58) de la Simulación N°2 del disco de $0.05M_{\odot}$.

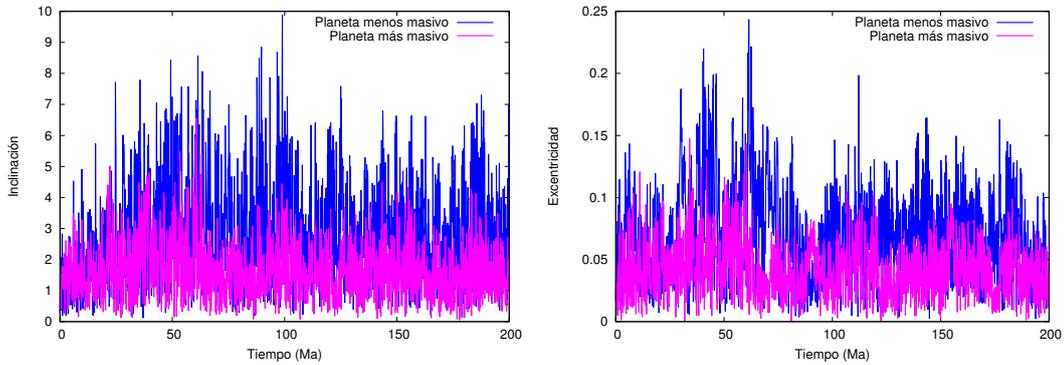


Figura 4.14. Variaciones en el tiempo de la inclinación y la excentricidad para los planetas más y menos masivos del sistema, N°58 y N°16 respectivamente, de la Simulación N°2 del disco de $0.05M_{\odot}$

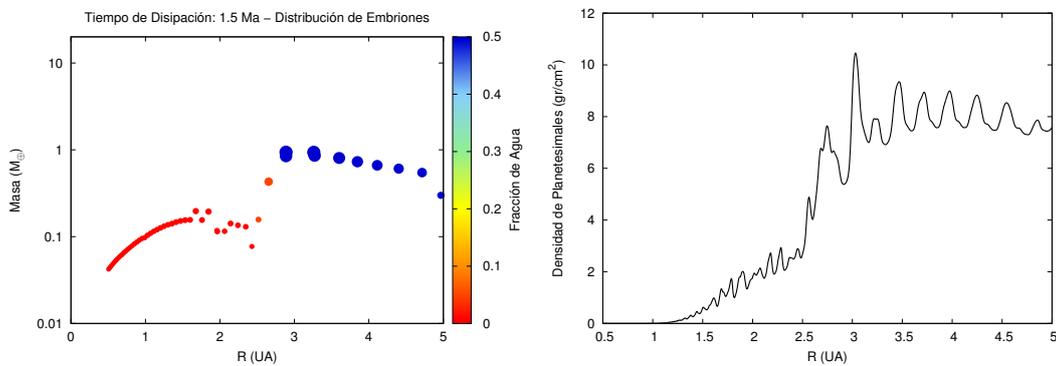


Figura 4.15. Distribuciones de embriones y planetesimales al final de la etapa gaseosa asumiendo un disco $0.1M_{\odot}$ y tiempo de disipación 1.5Ma utilizando el modelo semianalítico. Serán las condiciones iniciales del modelo de N-cuerpos.

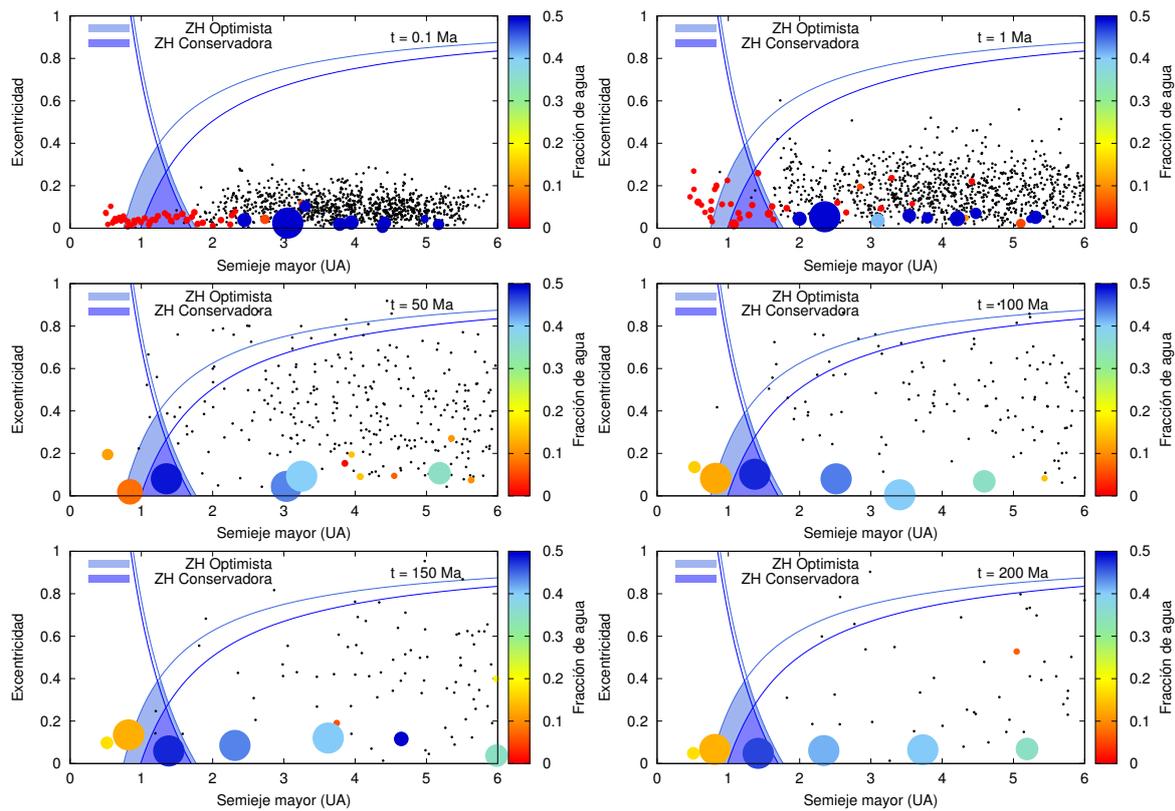


Figura 4.16. Evolución temporal de la Simulación 1. Los puntos negros representan a los planetesimales, los círculos llenos representan a los embriones, y las variaciones de colores indican el porcentaje de agua de los mismos. Las regiones coloreadas son las Zonas de Habitabilidad, donde definimos una Conservadora y una Optimista. Las curvas de afelio y perihelio constantes son graficadas con colores azul y celeste y están asociadas a los límites internos y externos de las Zonas Habitables, Conservadora y Optimista. En el estado final del Sistema se encuentran dos planetas en la Zona de Habitabilidad. El más interno (N°23) a $0.81UA$ con una masa de $2.23M_{\oplus}$ con un 13.25% de agua. El más externo ubicado a $1.42UA$ es un mundo de agua (N°46) de $4.49M_{\oplus}$ con un 46.59% de agua.

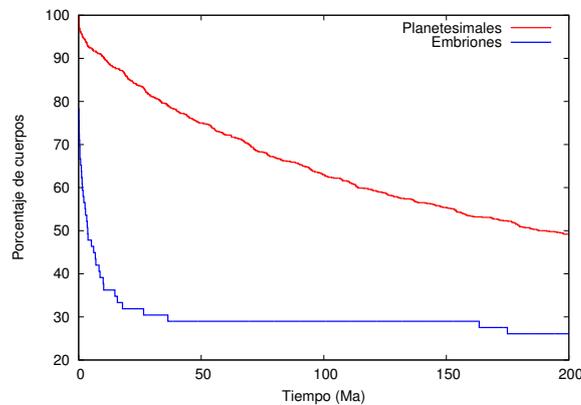


Figura 4.17. Porcentajes de planetesimales y embriones a medida que el sistema evoluciona para la Simulación N°1 del disco de $0.1M_{\odot}$.

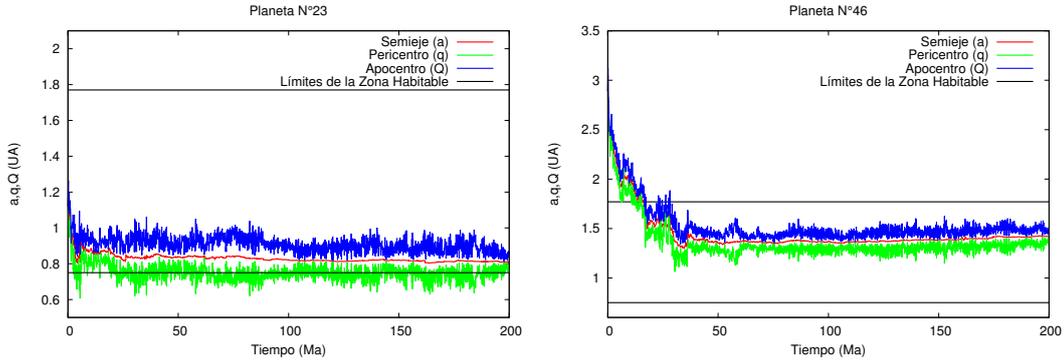


Figura 4.18. Evolución en el tiempo del Semieje Mayor (a), apocentro (Q) y pericentro (q) para los planetas que se encuentra en la Zona de Habitabilidad correspondiente a la Simulación N°1 del disco de $0.1M_{\odot}$. El planeta N°23 es el más interno y el N°46 es un mundo de agua.

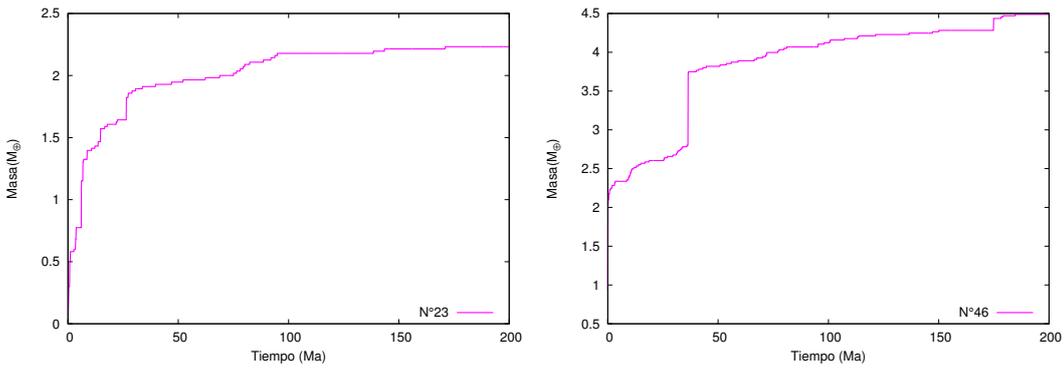


Figura 4.19. Evolución en el tiempo de la masa de los planetas que se encuentra en la Zona de Habitabilidad para la Simulación N°1 del disco de $0.1M_{\odot}$

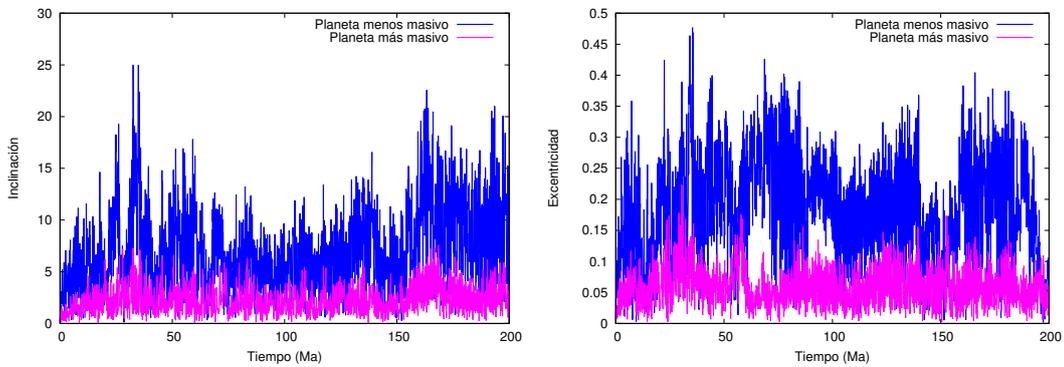


Figura 4.20. Variaciones en el tiempo de la inclinación y la excentricidad para los planetas más y menos masivos del sistema de la Simulación N°1 del disco de $0.1M_{\odot}$

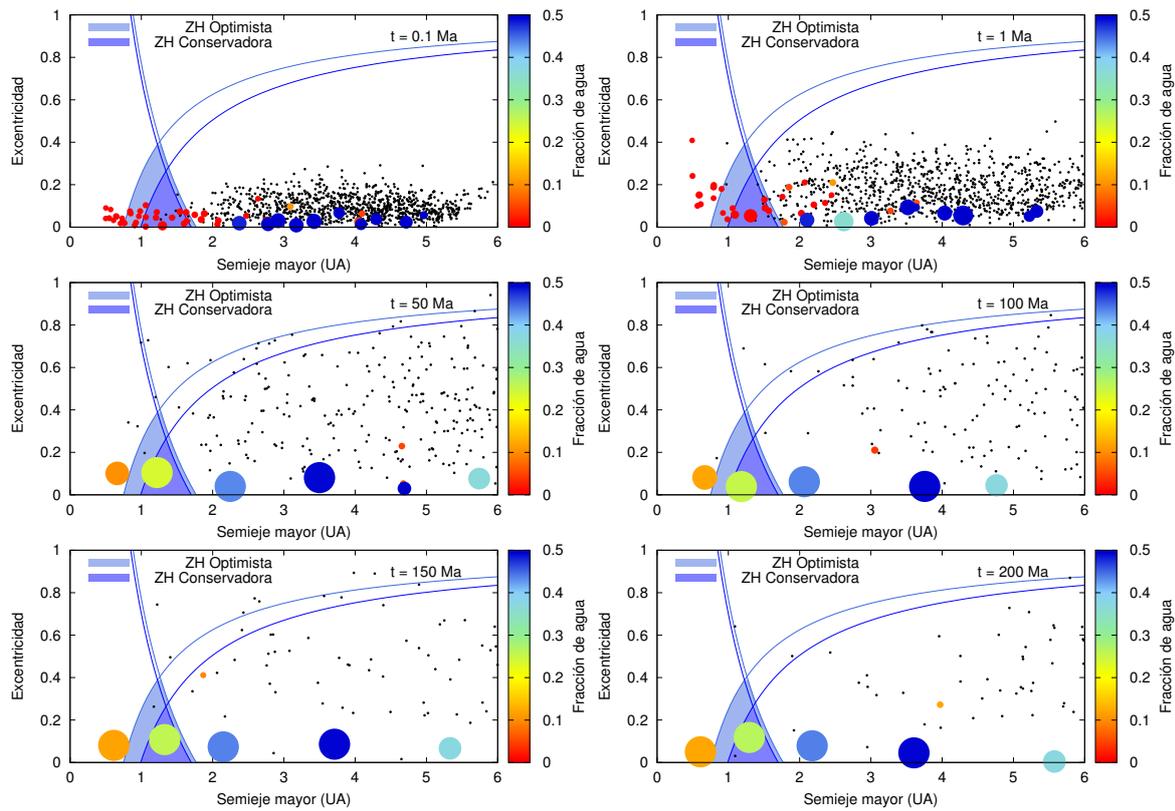


Figura 4.21. Evolución temporal de la Simulación N° 2 del disco de $0.1M_{\odot}$. Los puntos negros representan a los planetesimales, los círculos llenos representan a los embriones, y las variaciones de colores indican el porcentaje de agua de los mismos. Las regiones coloreadas son las Zonas de Habitabilidad, donde definimos una Conservadora y una Optimista. Las curvas de afelio y perihelio constantes son graficadas con colores azul y celeste y están asociadas a los límites internos y externos de las Zonas Habitables, Conservadora y Optimista. A los 200Ma, sobrevive en la Zona Habitable un mundo de agua (N°45) a 1.29UA con $3.1M_{\oplus}$ y 26.42% de agua.

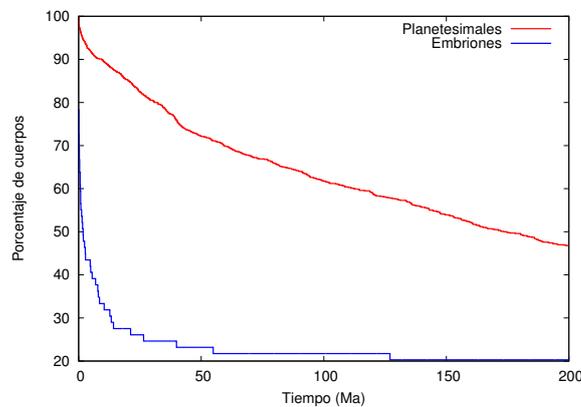


Figura 4.22. Porcentajes de planetesimales y embriones en función del tiempo para la Simulación N°2 del disco de $0.1M_{\odot}$.

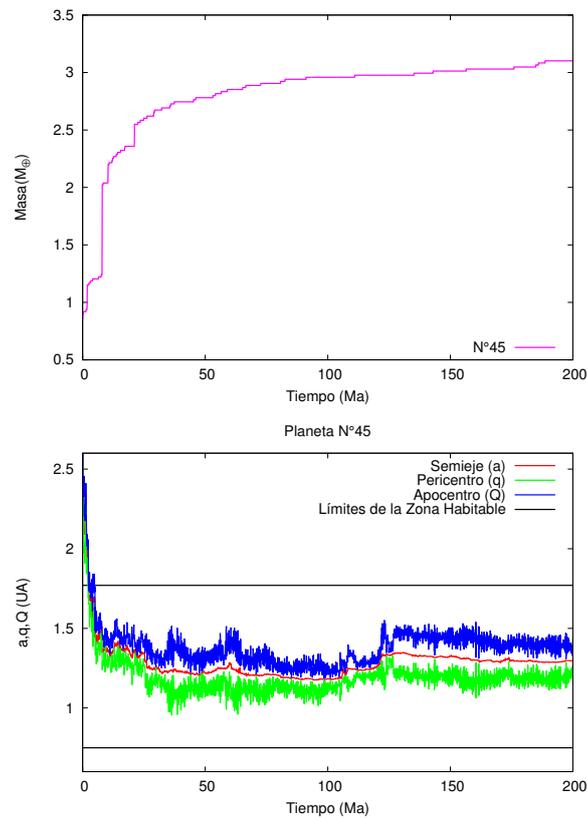


Figura 4.23. Evolución temporal de la órbita y la masa del planeta ubicado en la zona habitable (N°45) para la Simulación N°2 del disco de $0.1M_{\odot}$.

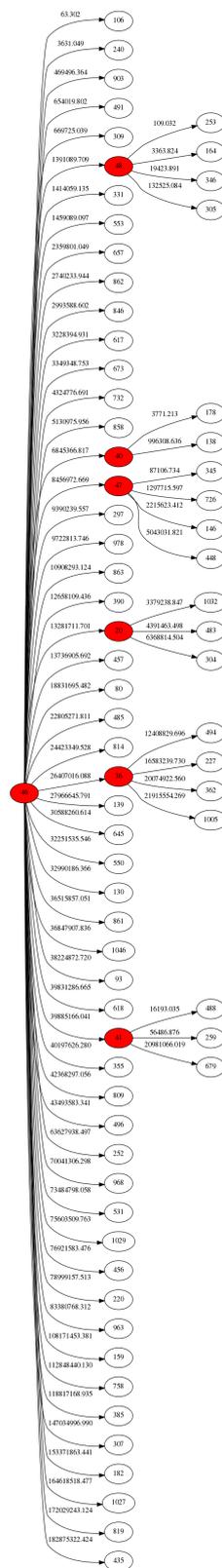


Figura 4.24. Esquema de la historia colisional del planeta más masivo del sistema (N°46) formado en la Simulación N°2 del disco de $0.1M_{\odot}$. Los círculos en rojo representan a los embriones planetarios, mientras que los círculos en blanco a los planetesimales. Los números que acompañan las flechas indican el momento en el cual sucedió la colisión.

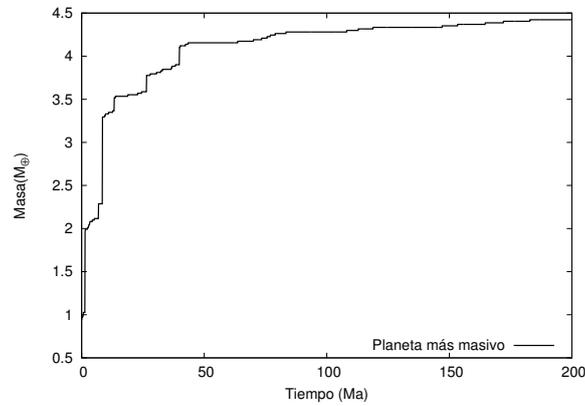


Figura 4.25. Evolución temporal de la masa del planeta más masivo del sistema (N°46) de la Simulación N°2 del disco de $0.1M_{\odot}$.

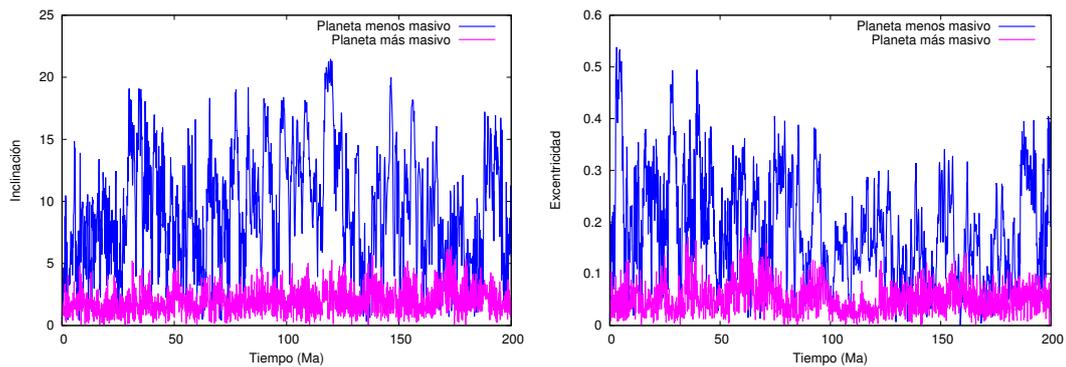


Figura 4.26. Variaciones en el tiempo de la inclinación y la excentricidad para los planetas más y menos masivos del sistema, N°46 y N°37 respectivamente, de la Simulación N°2 del disco de $0.1M_{\odot}$.

Capítulo 5

Simulaciones para Tiempo de Disipación del Gas 2.5Ma

En este capítulo discutiremos los resultados relacionados a los procesos de formación planetaria que suceden a partir de discos en los cuales la componente gaseosa se disipa en 2.5Ma. De manera análoga al capítulo anterior, decidimos analizar escenarios de formación para discos protoplanetarios con masas de $0.05M_{\odot}$ y $0.1M_{\odot}$.

5.1. Disco $0.05M_{\odot}$

En esta sección presentaremos los resultados concernientes a la formación de sistemas planetarios a partir de un disco de $0.05M_{\odot}$, asumiendo un tiempo de disipación para la componente gaseosa de 2.5Ma. En primera instancia utilizaremos un modelo semianalítico para encontrar las distribuciones de embriones planetarios y planetesimales al finalizar la etapa gaseosa. Dichas distribuciones serán nuestras condiciones iniciales para las simulaciones de N-cuerpos. Por último utilizaremos el código MERCURY para realizar nuestras simulaciones de N-cuerpos y analizaremos las características principales de los sistemas planetarios simulados.

5.1.1. Aplicación del Modelo Semianalítico

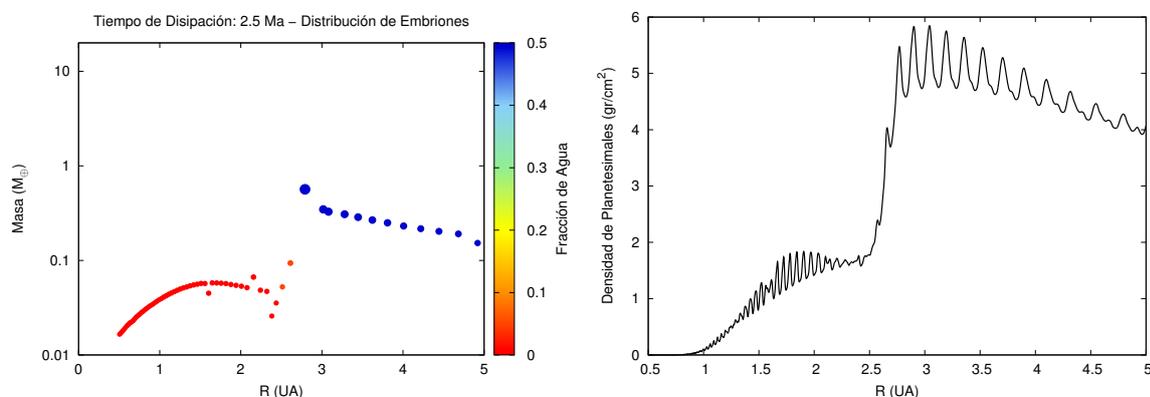


Figura 5.1. Distribuciones de embriones y planetesimales al final de la etapa gaseosa asumiendo un disco de $0.05M_{\odot}$ y un tiempo de disipación de 2.5Ma utilizando el modelo semianalítico. Serán condiciones iniciales para el modelo de N-cuerpos.

Región del disco	Número de Planetesimales
0.5-1UA	0
1-1.5UA	2
1.5-2UA	16
2-2.5UA	36
2.5-3UA	112
3-3.5UA	170
3.5-4UA	204
4-4.5UA	223
4.5-5UA	237

Tabla 5.1. Condiciones iniciales para la población de planetesimales en un disco de $0.05M_{\odot}$ asumiendo un tiempo de disipación de la componente gaseosa de 2.5Ma

Luego de hacer evolucionar el sistema durante la fase gaseosa utilizando el modelo semi-analítico, obtenemos una distribución de embriones y planetesimales como la que muestra la Figura 5.1. Tomando nuestra región de estudio entre 0.5UA y 5UA calculamos que la masa total en sólidos que se encuentra en esta zona es de $14.55M_{\oplus}$, donde el se distribuye 35.53 % en embriones planetarios y el 64.47 % en planetesimales.

Si comparamos con los resultados obtenidos en la sección 4.1.1, es posible inferir que un mayor tiempo de disipación de la componente gaseosa se traduce en un incremento en la masa de embriones y naturalmente en un decrecimiento en la masa asociada a la población de planetesimales.

5.1.2. Modelo de N-cuerpos: Condiciones Iniciales

Para calcular las condiciones iniciales del modelo de N-cuerpos, realizamos un procedimiento análogo a lo explicado en la sección 4.1.2. En particular, en la Tabla 5.1 presentamos la cantidad de planetesimales que se encuentran en cada intervalo de 0.5UA en nuestra zona de estudio entre 0.5UA y 5UA.

Debido a la naturaleza estocástica del proceso de acreción, realizamos 3 simulaciones para cada tiempo de disipación del gas con una masa de disco inicial dada, modificando el número "semilla" que genera variables al azar.

5.1.3. Resultados del Modelo de N-cuerpos

En todas nuestras simulaciones se forman planetas en la zona habitable del sistema. En particular cada una de las simulaciones realizadas producen dos planetas en la zona de habitabilidad. Presentamos las características más relevantes de estos planetas en la Tabla 5.2. A partir de esta información podemos hacer una distinción entre las arquitecturas finales de estos sistemas. En particular, podemos distinguir dos escenarios de interés. Por un lado, el escenario que presenta la Simulación N°1, donde los dos planetas formados en la zona habitable comienzan su evolución en regiones internas a la línea de hielo. El segundo escenario de interés es el que presentan las Simulaciones N°2 y N°3, en las cuales coexisten un mundo de agua y un planeta que comienza en regiones internas a la línea de hielo, dentro de la zona habitable.

En la Tabla 5.3 además mostramos las características de los planetas formados entre 2UA y 4UA de cada simulación. Separaremos el análisis en 2 secciones, una para cada escenario.

Simulación	Planeta	Semieje inicial	Semieje final	Masa final	Porcentaje de agua final
N° 1	N°29	1.08UA	0.85UA	$0.92M_{\oplus}$	11.67 %
	N°44	1.70UA	1.33UA	$1.59M_{\oplus}$	23.78 %
N° 2	N°40	1.51UA	0.95UA	$1.52M_{\oplus}$	12.30 %
	N°60	2.98UA	1.43UA	$1.15M_{\oplus}$	42.65 %
N° 3	N°39	1.46UA	0.91UA	$0.72M_{\oplus}$	17.58 %
	N°60	3.08UA	1.22UA	$1.43M_{\oplus}$	28.10 %

Tabla 5.2. Principales características de los planetas formados dentro de la Zona Habitable para las 3 Simulaciones con $\tau = 2.5Ma$ y una masa de disco protoplanetario inicial de $0.05M_{\odot}$

Simulación	Planeta	Semieje inicial	Semieje final	Masa final
N° 1	N°61	3.28 UA	2.43 UA	$2.74 M_{\oplus}$
	N°60	3.08 UA	3.71 UA	$0.8 M_{\oplus}$
N° 2	N°58	2.79 UA	2.79 UA	$3.05 M_{\oplus}$
N° 3	N°58	2.79 UA	3.43 UA	$2.03 M_{\oplus}$
	N°50	2.08 UA	3.80 UA	$0.06 M_{\oplus}$

Tabla 5.3. Planetas formados entre 2UA y 4UA para las 3 Simulaciones con tiempo de disipación 2.5Ma y una masa de disco protoplanetario inicial de $0.05 M_{\odot}$

Primer escenario

En la Figura 5.2 presentamos la evolución temporal del sistema para la Simulación N°1. En esta figura y particularmente en la Figura 5.3 es posible apreciar la remoción de embriones y planetesimales en función del tiempo. Luego de 200Ma, 18.84 % de embriones y 53.4 % de planetesimales sobrevive en el sistema. De acuerdo a los datos provistos por la Tabla 5.4 podemos decir que el 4.7 % de planetesimales fueron eyectados y que 4 % colisionaron con la estrella central. En el caso de los embriones sólo 1 de ellos resultó eyectado y ninguno colisionó con la estrella central. Podemos concluir que el mecanismo que predomina en cuanto a las remociones es la acreción, tanto para pequeños como para grandes cuerpos.

Este escenario presenta 2 planetas en la zona de habitabilidad, el más interno (N°29) con una masa de $0.92M_{\oplus}$ y un porcentaje de agua del 11.67 %, mientras que el planeta más externo (N°44) de la zona habitable es un poco más masivo con $1.59M_{\oplus}$ y un porcentaje de agua más alto de 23.78 %. Si observamos sus semiejes iniciales podemos decir que fueron embriones de la zona interna del disco, que se ubicaban al inicio de la simulación por dentro

Simulación	Acreciones		Eyecciones		Colisiones Centrales	
	P	E	P	E	P	E
N°1	37.9 %	79.71 %	4.7 %	1.45 %	4 %	0 %
N° 2	41.1 %	79.71 %	6.3 %	0 %	2.8 %	2.9 %
N° 3	35.2 %	79.71 %	2.5 %	0 %	2.5 %	0 %

Tabla 5.4. Porcentaje de planetesimales (P) y embriones (E) que a lo largo de la integración fueron removidos debido a acreciones, eyecciones y colisiones con la estrella central asumiendo un tiempo de disipación del gas de 2.5Ma para un disco de $0.05 M_{\odot}$.

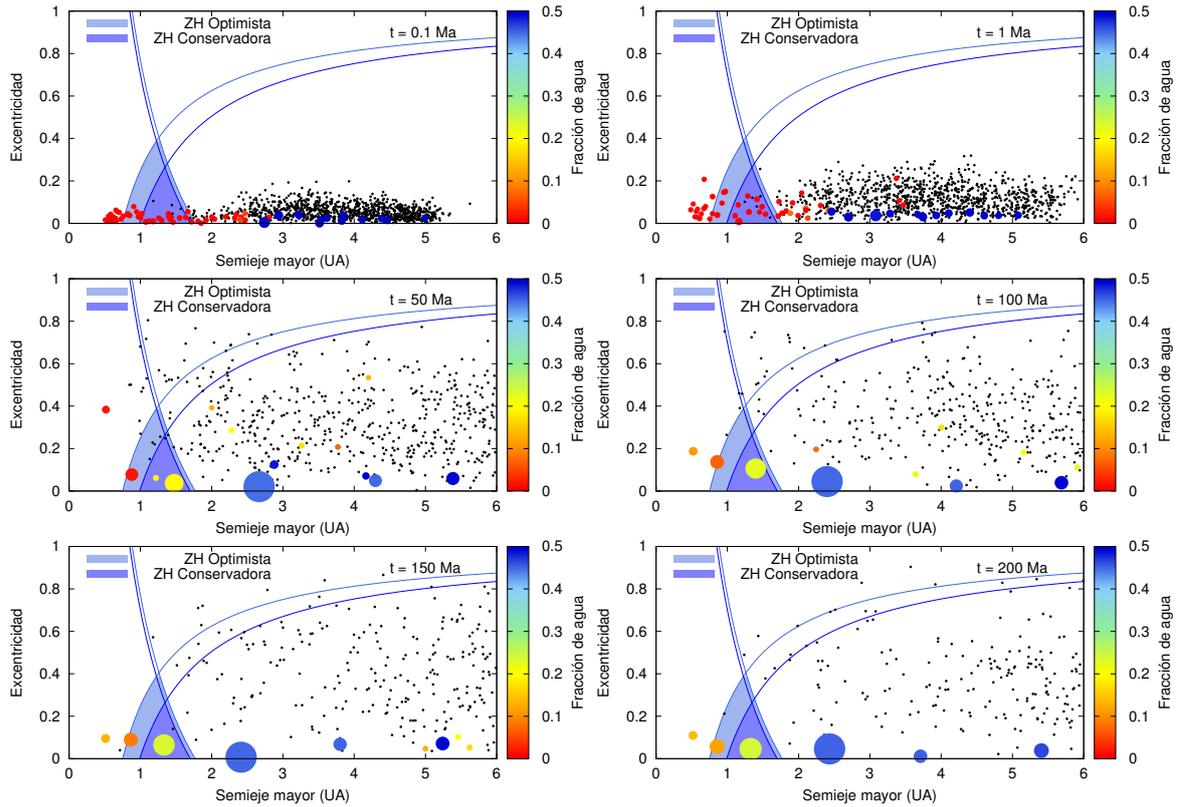


Figura 5.2. Evolución temporal de la Simulación 1. Los puntos negros representan a los planetesimales, los círculos llenos representan a los embriones, y las variaciones de colores indican el porcentaje de agua de los mismos. Las regiones coloreadas son las Zonas de Habitabilidad, donde definimos una Conservadora y una Optimista. Las curvas de afelio y perihelio constantes son graficadas con colores azul y celeste y están asociadas a los límites internos y externos de las Zonas Habitables, Conservadora y Optimista. En el estado final del Sistema se encuentran dos planetas en la Zona de Habitabilidad. El más interno (N°29) a 0.85UA con una masa de $0.92M_{\oplus}$ y 11.67% de agua. Mientras que el más externo (N°44) se ubica a 1.33UA con una masa de $1.59M_{\oplus}$ y 23.78% de agua

de la línea de hielo. De acuerdo a su localización inicial, el contenido primordial de agua de estos planetas es despreciable en ambos casos. Analizando de dónde proviene el porcentaje de agua de cada planeta podemos ver que para el planeta más interno (N°29) ubicado a 1.08 UA, casi la totalidad del agua acreetada proviene de los planetesimales provenientes de la zona externa del disco. Para el planeta ubicado a 1.70 UA (N°44) calculamos que aproximadamente el 27% del agua que fue acreetada proviene de embriones, uno de ellos originario de la zona externa del disco, y el restante se debe a la acreción de planetesimales con semiejes iniciales mayores a 2.7UA. Vemos entonces que, en este escenario particular, los planetesimales son los principales responsables del contenido de agua final para los planetas de la zona habitable.

En la Figura 5.4 presentamos la evolución de las masas de estos planetas en función del tiempo. El último gran impacto del planeta más interno fue aproximadamente a los 45 Ma, mientras que para el planeta más externo sucedió a los 49.57 Ma. Por otra parte, la Figura 5.5 muestra la historia colisional de estos planetas, ilustrando los impactos recibidos por parte de embriones y planetesimales. Destacamos nuevamente que estos datos son de gran interés ya que representan una medida de sus tiempos de formación.

Otro dato relevante para nuestro análisis está asociado con la evolución orbital de los

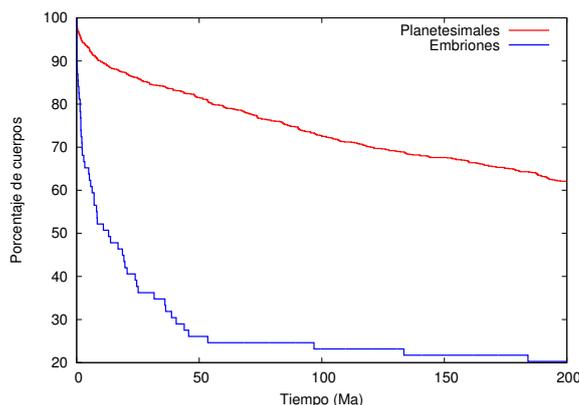


Figura 5.3. Porcentajes de planetesimales y embriones a medida que el sistema evoluciona para la Simulación N°1 del disco de $0.05 M_{\odot}$.

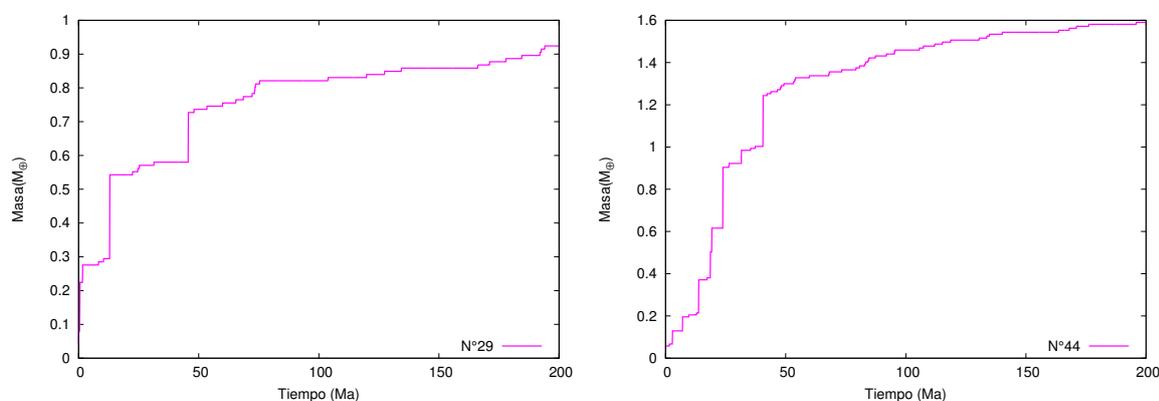


Figura 5.4. Evolución temporal de la masa de los planetas que se encuentran en la zona habitable (N°29 y N°44) de la Simulación N°1 del disco de $0.05 M_{\odot}$.

planetas en la zona de habitabilidad. Este estudio nos permite entender en qué momento ingresaron a la zona de habitabilidad y si se mantuvieron allí hasta los 200Ma o sus posiciones variaron fuera y dentro de la misma. De la Figura 5.6 podemos ver que el planeta más externo de la zona habitable (N°44) comienza su evolución por fuera de dicha región. Debido a interacciones gravitatorias con embriones y planetesimales, este planeta logra migrar dentro de la zona habitable y, a partir del momento en que recibe su última gran colisión, se estabiliza dentro de dicha región. Por otra parte, si bien el planeta más interno comienza su evolución dentro de la zona de habitabilidad, su pericentro no siempre se mantiene dentro de la misma hasta los últimos millones de años. Por lo tanto, el planeta más externo de la zona habitable parece poseer el escenario más propicio para el mantenimiento del agua en estado líquido sobre su superficie.

El planeta más masivo del sistema tiene una masa de $2.74M_{\oplus}$, y un semieje mayor de 2.43UA. De la Figura 5.7 podemos ver el planeta adquiere una fracción significativa de su masa a los 53.4Ma, a pesar de haber tenido una última gran colisión a los 96.8Ma. En la Figura 5.8 podemos notar cómo se amortiguan los valores de excentricidad e inclinación para el planeta más masivo. Los valores medios de la inclinación y excentricidad para el planeta más masivo son de 2.7° y 0.07 respectivamente, mientras que para el planeta menos masivo obtenemos valores mayores de 10.76° para la inclinación y 0.28 para la excentricidad (Tabla 5.5).

	Planeta	Masa	Semieje inicial	Semieje final	Promedio excentricidad	Promedio inclinación
Planeta más masivo	N°61	$2.74M_{\oplus}$	3.28UA	2.43UA	0.07	2.7°
Planeta menos masivo	N°12	$0.37M_{\oplus}$	0.67UA	0.52UA	0.28	10.76°

Tabla 5.5. Promedios de las excentricidades e inclinaciones para los planetas más y menos masivos del sistema, N°61 y N°12 respectivamente, de la Simulación N°1 del disco de $0.05 M_{\odot}$.

Segundo escenario

En la Figura 5.9 podemos apreciar la evolución temporal de la Simulación N°2 que es la que elegimos como representativa de este escenario. A medida que pasa el tiempo va disminuyendo la cantidad de cuerpos que se encontraban inicialmente como también muestra la Figura 5.10. Luego de 200Ma, 49.8 % de planetesimales y, 17.39 % de embriones sobreviven en el sistema. La remoción de objetos se debe principalmente a los procesos de acreción. Sin embargo se registran también algunas eyecciones y colisiones con la estrella central. En particular el 6.3 % de los planetesimales fueron eyectados y el 2.8 % colisionaron con la estrella central, mientras que los embriones no sufrieron eyecciones y sólo 2 de ellos colisionaron con la estrella central como muestra la Tabla 5.4 .

Como ya mencionamos, los planetas que se ubican en la zona habitable son de particular importancia para nuestro trabajo. El planeta más interno (N°40) tiene un semieje mayor de 0.95UA, una masa de $1.52M_{\oplus}$ y un contenido de agua de 12.3 %. Vale la pena destacar que este planeta comienza su evolución en la región interna a la línea de hielo. Dada su localización inicial, su contenido primordial de agua despreciable. En particular para este planeta, los planetesimales son los principales responsables de su contenido de agua. Mientras que, el planeta más externo (N°60) de la zona habitable es un mundo de agua, con una masa de $1.15M_{\oplus}$ y un contenido de agua de 42.65 %. Una característica relevante de este planeta es que el contenido primordial de agua es del 50 % de su masa inicial (M_{\oplus}). Analizando su contenido final, destacamos que el 45 % del agua proviene de embriones (tanto cantidad de agua primordial, como por embriones acretados) y un 55 % fue aportado por planetesimales. En este caso tanto el contenido aportado por embriones como el suministrado por planetesimales es igualmente importante.

En la Figura 5.11 podemos ver la evolución del semieje, pericentro y apocentro de los planetas de la zona habitable. El planeta más interno siempre se mantuvo durante los límites de la zona habitable, mientras que el mundo de agua migró desde la zona externa del disco, y hasta los 50Ma de su evolución permaneció por fuera de los límites de la zona de habitabilidad. A partir de los 100Ma el mundo de agua se mantuvo dentro de la zona habitable. Luego, podemos decir, que los dos planetas de la zona habitable poseen escenarios propicios para mantener agua en estado líquido sobre sus superficies.

La masa de los planetas de la zona habitable fue evolucionando como muestra la Figura 5.12, el planeta más interno tuvo su última gran colisión a los 128.4Ma y el mundo de agua a los 147.7Ma. Estos valores son buenas estimaciones de sus tiempos de formación.

El planeta más masivo del sistema tiene una masa de $3.05M_{\oplus}$ y se ubica en 2.79UA. La Figura 5.13 nos muestra la evolución temporal de la masa de este planeta. A partir de la misma se puede ver que el tiempo asociado a su último gran impacto es de 66Ma.

En la Figura 5.14 mostramos la evolución temporal de la excentricidad e inclinación para los planetas más y menos masivos del sistema (N°58 y N°4 respectivamente). Los valores medios de excentricidad e inclinación para el planeta más masivo son de 0.05 y 2.35° respectivamente. Para el planeta menos masivo obtenemos valores medios más altos, 0.24 y

	Planeta	Masa	Semieje inicial	Semieje final	Promedio excentricidad	Promedio inclinación
Planeta más masivo	N°58	$3.05M_{\oplus}$	2.79UA	2.79UA	0.05	2.35°
Planeta menos masivo	N°4	$0.55M_{\oplus}$	0.55UA	0.65UA	0.24	8.35°

Tabla 5.6. Promedios de las excentricidades e inclinaciones para los planetas más y menos masivos del sistema para la Simulación N°2 del disco de $0.05 M_{\odot}$

Región del disco	Número de Planetesimales
0.5-1UA	0
1-1.5UA	0
1.5-2UA	6
2-2.5UA	25
2.5-3UA	76
3-3.5UA	155
3.5-4UA	207
4-4.5UA	244
4.5-5UA	287

Tabla 5.7. Condiciones iniciales para la población de planetesimales en un disco de $0.1M_{\odot}$ asumiendo un tiempo de disipación de la componente gaseosa de 2.5Ma

8.35° .

5.2. Disco $0.1M_{\odot}$

En esta sección realizaremos un análisis análogo al anterior sobre la formación de sistemas planetarios, considerando un disco de $0.1M_{\odot}$ con un tiempo de disipación de 2.5Ma. Los datos con los que trabajaremos se utilizaron previamente en trabajo de de Elía et al.(2013) y fueron proporcionados por los autores de dicho trabajo.

5.2.1. Aplicación del Modelo Semianalítico

El modelo semianalítico nos proporciona la evolución del disco protoplanetario durante la etapa gaseosa. Asumiendo un tiempo de disipación de 2.5Ma, obtenemos una distribución de embriones planetarios y planetesimales como la representada en la Figura 5.15. Tomando nuestra región de estudio entre 0.5UA y 5UA calculamos que la masa total que se encuentra en esta zona es de $29.1M_{\oplus}$, donde el 46 % se distribuye en planetesimales y el 54 % en embriones.

Si comparamos con los resultados obtenidos en la sección 4.2.1, es posible inferir que un mayor tiempo de disipación de la componente gaseosa se traduce en un incremento en la masa de embriones y naturalmente en un decrecimiento en la masa asociada a la población de planetesimales.

5.2.2. Condiciones Iniciales para el Modelo de N-cuerpos

Las condiciones iniciales para el modelo de N-cuerpos se calculan de manera análoga a lo explicado en la sección 4.1.2. En particular, utilizando una masa de disco de $0.1M_{\odot}$ y asumiendo un tiempo de disipación de 2.5Ma, la distribución de planetesimales en la región de estudio está dada por la Tabla 5.7.

Simulación	Planeta	Semieje inicial	Semieje final	Masa final	Porcentaje de agua final
N° 1	N°42	2.88UA	1.22UA	$3.7M_{\oplus}$	43.7 %
N° 2	N°43	3.26UA	1.15UA	$4.2M_{\oplus}$	39.34 %
N° 3	N°42	2.89UA	1.56UA	$3.75M_{\oplus}$	42.6 %

Tabla 5.8. Principales características de los planetas formados en la Zona Habitable para las 3 Simulaciones con $\tau = 2.5Ma$ y una masa de disco protoplanetario inicial de $0.1M_{\odot}$

Simulación	Planeta	Semieje inicial	Semieje final	Masa final
N° 1	N°43	3.26UA	2.02 UA	$4.66M_{\oplus}$
	N°44	3.72UA	3.08UA	$2.96M_{\oplus}$
N° 2	N°42	2.89UA	2.3UA	$4.06M_{\oplus}$
	N°45	4.25UA	3.29UA	$3.85M_{\oplus}$
N° 3	N°43	3.26UA	2.52 UA	$5.87 M_{\oplus}$

Tabla 5.9. Planetas formados entre 2UA y 4UA para las 3 Simulaciones con tiempo de disipación 2.5Ma y una masa de disco protoplanetario inicial de $0.1 M_{\odot}$

Debido a la naturaleza estocástica del proceso de acreción, realizamos 3 simulaciones de N-cuerpos.

5.2.3. Resultados del Modelo de N-cuerpos

Las simulaciones N°2 y N°3 evolucionaron durante 200Ma mientras que la Simulación N°1 durante 142.2Ma, mostraremos los resultados para los respectivos tiempos de integración.

Vale la pena destacar que todas las simulaciones presentan un mundo de agua en la zona habitable. Las características más relevantes de estos planetas se encuentran en la Tabla 5.8. También encontramos en los 3 sistemas un planeta en la zona interna del disco. Además, en la Tabla 5.9 mostramos los resultados más relevantes de los planetas que alcanzaron la zona entre 2UA y 4UA.

Elegimos la Simulación N°3 en representación a este escenario, la evolución temporal de este sistema se muestra en la Figura 5.16. Desde un comienzo los cuerpos son rápidamente excitados debido a la propia interacción gravitatoria. Las excentricidades aumentan y esto produce que las órbitas de los cuerpos se crucen generando colisiones. Se puede observar la remoción de planetesimales y embriones a medida que pasa el tiempo, representado en la Figura 5.17, donde sólo el 21.28 % y 37.7 % de embriones y planetesimales respectivamente sobreviven al finalizar la simulación. El principal mecanismo de remoción en el caso de los

Simulación	Acreciones		Eyecciones		Colisiones Centrales	
	P	E	P	E	P	E
N°1	20.6 %	48.15 %	24.9 %	0 %	10.8 %	5.56 %
N° 2	19.7 %	46.29 %	23.9 %	1.85 %	15.1 %	12.96 %
N° 3	20.8 %	64.81 %	26.8 %	0 %	15.1 %	1.85 %

Tabla 5.10. Porcentaje de planetesimales (P) y embriones (E) que a lo largo de la integración fueron removidos debido a acreciones, eyecciones y colisiones con la estrella central asumiendo un tiempo de disipación de 2.5Ma para un disco de $0.1M_{\odot}$

	Planeta	Masa	Semieje inicial	Semieje final	Promedio excentricidad	Promedio inclinación
Planeta más masivo	N°43	$5.87M_{\oplus}$	3.26UA	2.52UA	0.10	3.79°
Planeta menos masivo	N°45	$2.8M_{\oplus}$	4.25UA	4.66UA	0.12	6.12°

Tabla 5.11. Promedios de las excentricidades e inclinaciones para los planetas más y menos masivos del sistema (N°43 y N°45) de la Simulación N°3 del disco de $0.1M_{\odot}$.

embriones fue la acreción, ya que no se registraron eyecciones y sólo un embrión colisionó con la estrella central (Tabla 5.10). En el caso de los planetesimales el 26.8 % sufrieron eyecciones, el 20.8 % fueron acretados y el 15.1 % colisionaron con la estrella central.

A los 200Ma, el sistema se encuentra configurado por un planeta de $3 M_{\oplus}$ en la zona interna del disco, un mundo de agua (N°42) dentro de los límites de la zona de habitabilidad con una masa de $3.75 M_{\oplus}$ y 42.6 % de agua ubicado en 1.56UA, y una súper tierra en 2.52UA que resulta ser el planeta más masivo del sistema.

En la Figura 5.18 observamos tanto la evolución orbital del mundo de agua como el crecimiento de su masa en el tiempo. El cuerpo inició su evolución más allá de la línea de hielo y fue migrando hacia regiones más internas del disco debido a interacciones gravitatorias con otros cuerpos. Podemos ver que su primer gran impacto lo posicionó dentro de los límites de la zona de habitabilidad. Si bien a partir de este impacto su semieje se mantuvo dentro de esta región, su apocentro fue variando dentro y fuera del límite superior de esta zona. Por lo tanto, las condiciones del mundo de agua, no garantizan la sustentabilidad del agua en estado líquido sobre su superficie poniendo en duda el interés astrobiológico de este planeta.

La última gran colisión que sufrió el mundo de agua fue a los 34.4Ma. Este dato es de gran interés ya que nos indica una medida de tiempo de la formación de este planeta.

Calculando de dónde proviene el agua del planeta ubicado en la zona habitable, obtenemos que el 19.37 % proviene de la acreción de planetesimales de la zona externa del disco, mientras que el porcentaje restante fue aportado por embriones, tanto de la semilla originaria como de los embriones planetarios acretados durante su evolución. Vale destacar que debido a su ubicación inicial en el disco, la cantidad inicial de agua que poseía el planeta era del 50 % de su masa inicial. Los embriones, por lo tanto, juegan un rol importante suministrando grandes cantidades de agua a este planeta.

El planeta más masivo (N°43) de nuestro sistema se encuentra entre 2UA y 4UA. Este cuerpo adquirió más del 50 % de su masa durante una colisión que sufrió a los 77.6Ma como se puede ver en la Figura 5.19. A su vez si contrastamos con el esquema de su historia colisional, Figura 5.20, podemos observar que en ese momento colisionó con un embrión con una rica historia de acreción.

Si comparamos las variaciones de la excentricidad e inclinación para el planeta más y menos masivo del sistema (N°43 y N°45), como muestra la Figura 5.21, no notamos grandes diferencias. Sin embargo al calcular los valores medios de estos parámetros como indica la Tabla 5.11 podemos ver que la excentricidad e inclinación del cuerpo más masivo se ven más amortiguadas que las del planeta con menor masa.

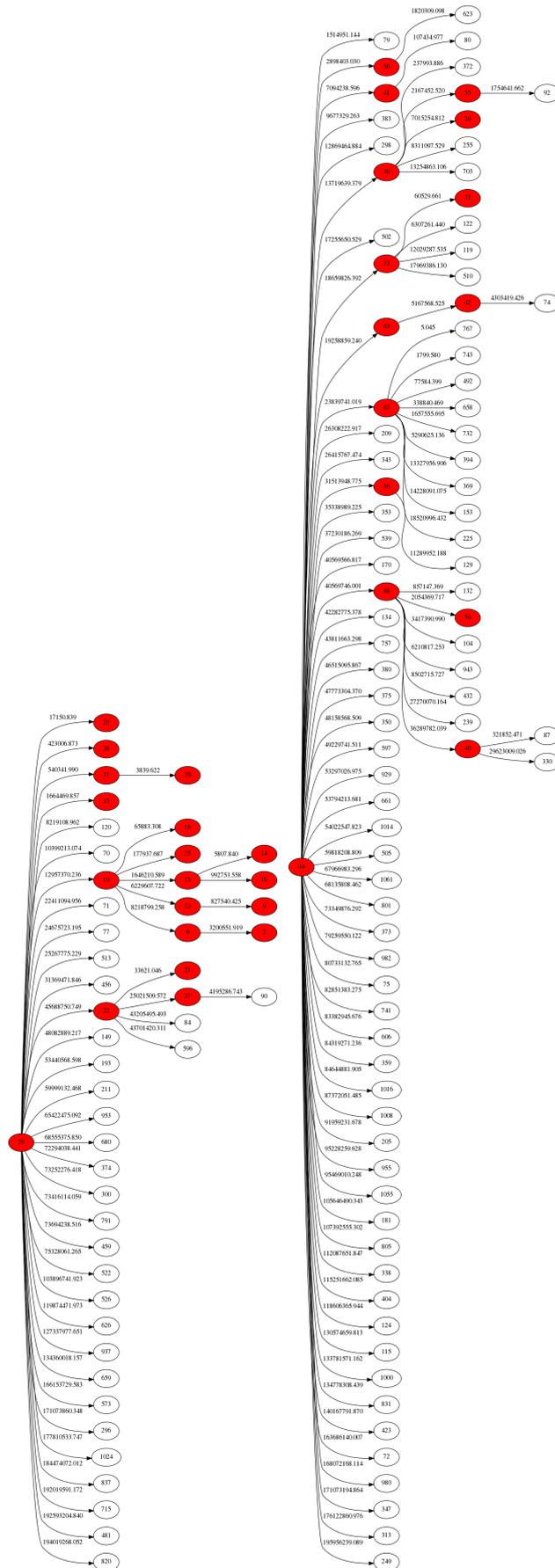


Figura 5.5. Historia colisional de los planetas N°29 y N°44 que se encuentran en la Zona Habitable de la Simulación N°1 del disco de 0.05 M_⊙. Cada número es identificador de un cuerpo, los coloreados en rojo son embriones y los blancos planetesimales

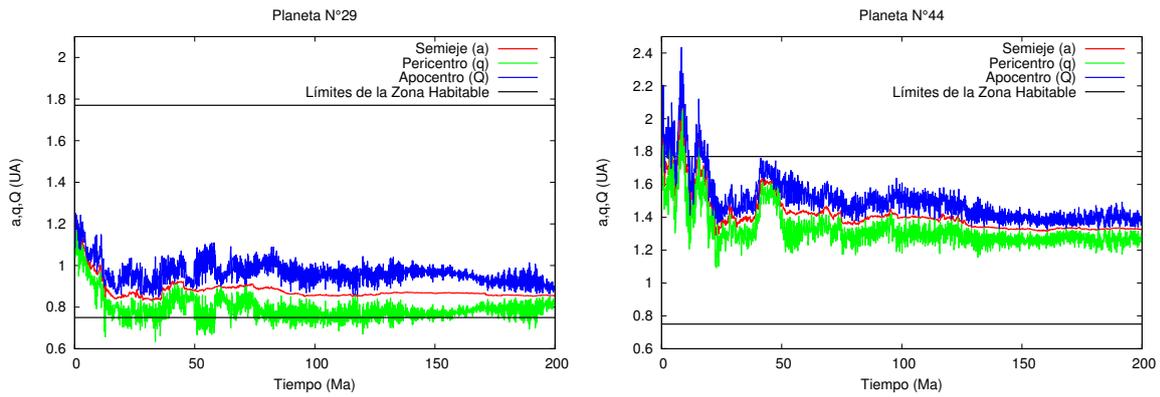


Figura 5.6. Evolución en el tiempo del Semieje Mayor (a), apocentro (Q) y pericentro (q) para los planetas que se encuentran en la zona de habitabilidad (N°29 y N°44) correspondiente a la Simulación N°1 del disco de $0.05 M_{\odot}$.

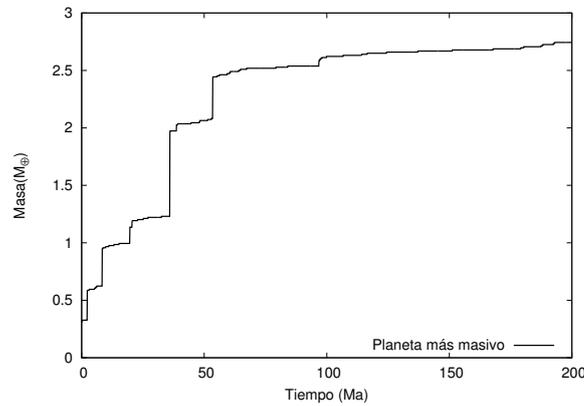


Figura 5.7. Evolución temporal de la masa del planeta más masivo (N°61) de la Simulación N°1 del disco de $0.05 M_{\odot}$

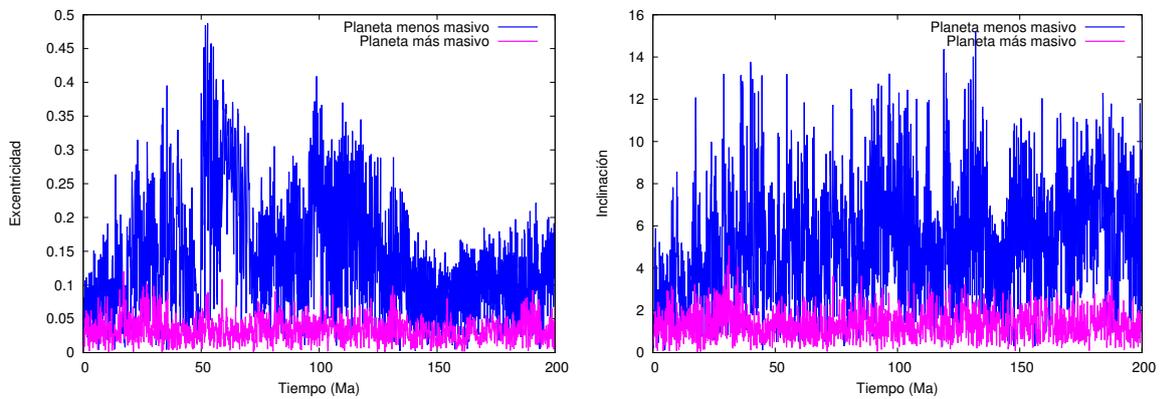


Figura 5.8. Evolución en el tiempo de las excentricidades e inclinaciones de los planetas más y menos masivos, N°61 y N°12 respectivamente, de la Simulación N°1 del disco de $0.05 M_{\odot}$.

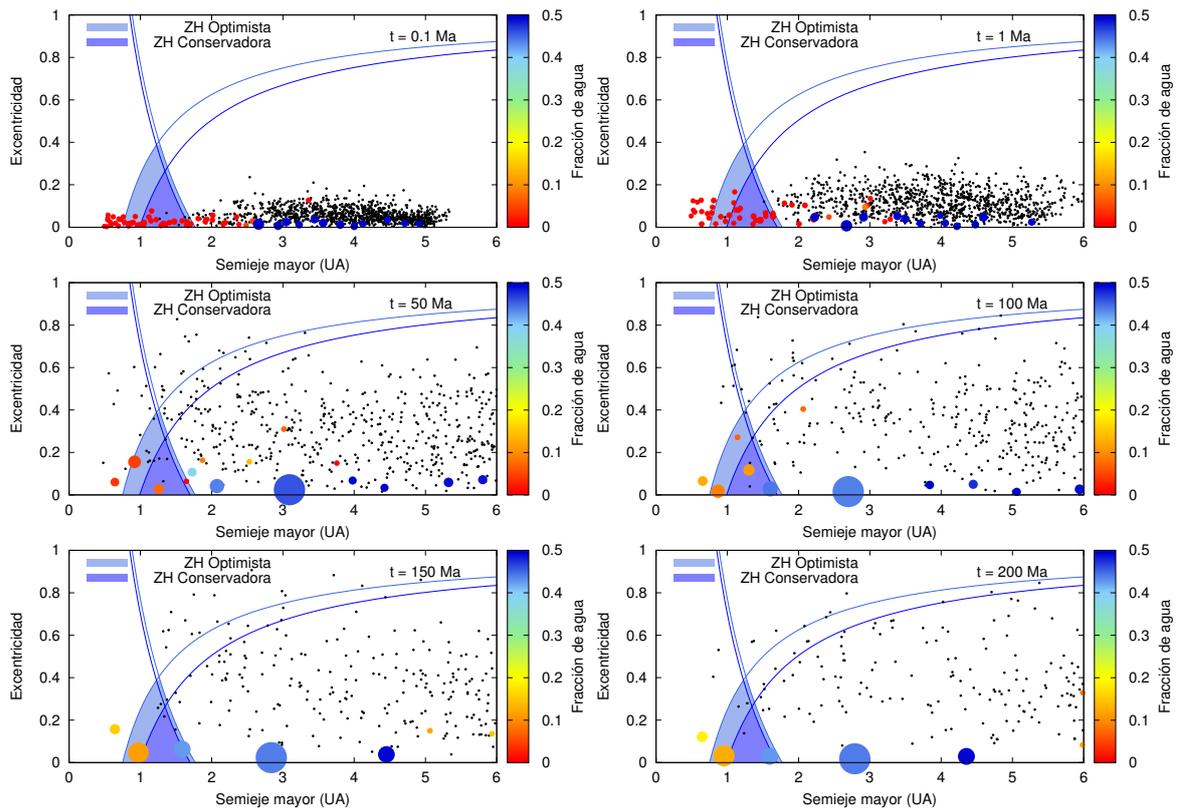


Figura 5.9. Evolución temporal de la Simulación N°2 del disco de $0.05 M_{\odot}$. Los puntos negros representan a los planetesimales, los círculos llenos representan a los embriones, y las variaciones de colores indican el porcentaje de agua de los mismos. Las regiones coloreadas son las Zonas de Habitabilidad, donde definimos una Conservadora y una Optimista. Las curvas de afelio y perihelio constantes son graficadas con colores azul y celeste y están asociadas a los límites internos y externos de las Zonas Habitables, Conservadora y Optimista. En el estado final del Sistema se encuentran dos planetas en la Zona de Habitabilidad. El más interno (N°40) ubicado a 0.95UA tiene una masa de $1.52M_{\oplus}$ con 12.30 % de agua. El planeta más externo (N°60) resulta ser un mundo de agua ubicado a 1.43UA con una masa de $1.15M_{\oplus}$ y un 42.65 % de agua

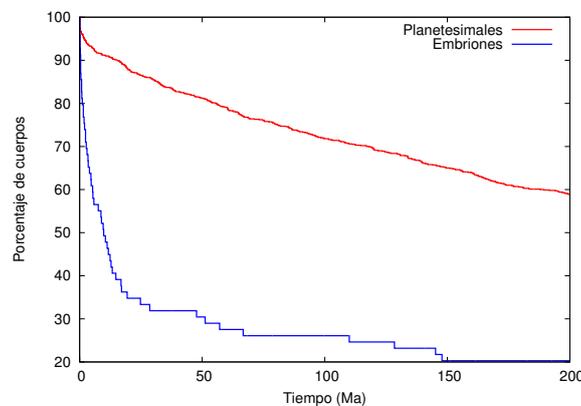


Figura 5.10. Porcentajes de planetesimales y embriones a medida que el sistema evoluciona para la Simulación N°2 del disco de $0.05 M_{\odot}$.

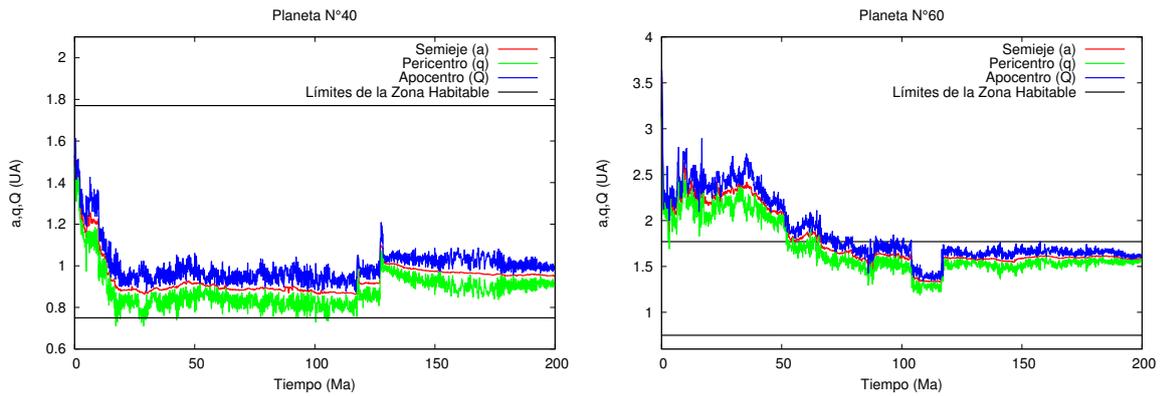


Figura 5.11. Evolución en el tiempo del Semieje Mayor (a), apocentro (Q) y pericentro (q) para los planetas que se encuentran en la zona de habitabilidad (N°40 y N°60) correspondiente a la Simulación N°2 del disco de $0.05 M_{\odot}$

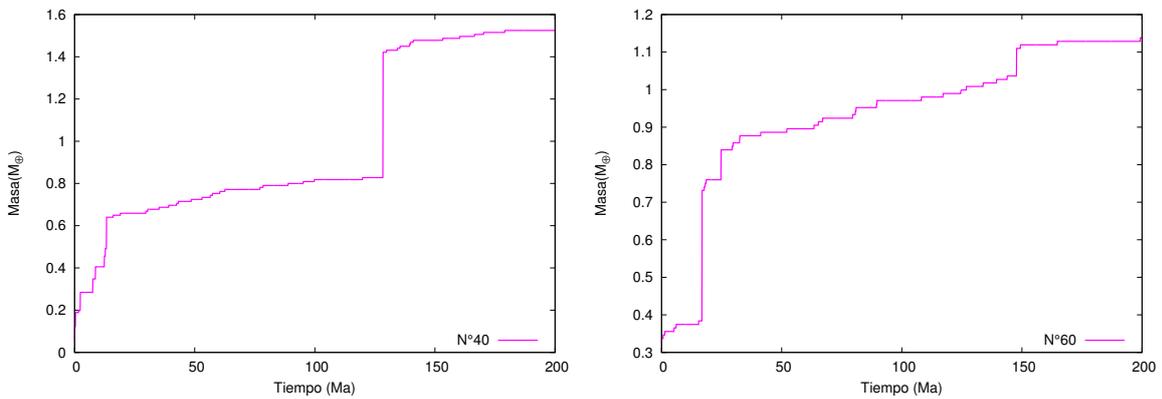


Figura 5.12. Evolución en el tiempo de las de las masas de los planetas que se encuentran en la zona de habitabilidad (N°40 y N°60) para la Simulación N°2 del disco de $0.05 M_{\odot}$

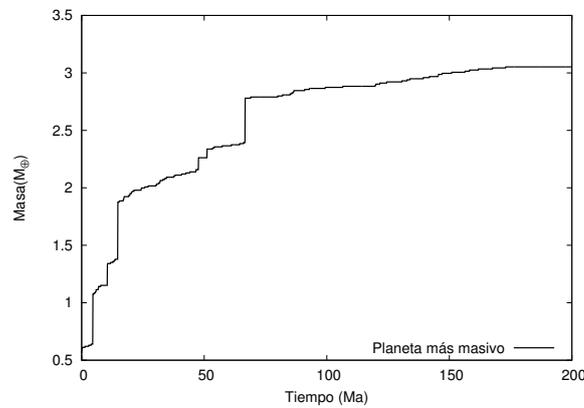


Figura 5.13. Evolución temporal de la masa del planeta más masivo (N°58) de la Simulación N°2 del disco de $0.05 M_{\odot}$

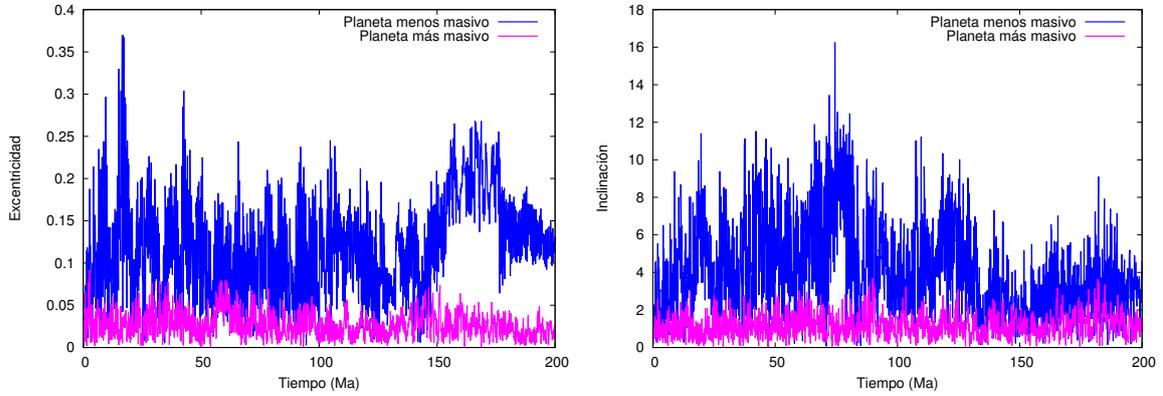


Figura 5.14. Evolución en el tiempo de las excentricidades e inclinaciones de los planetas más y menos masivos, N°58 y N°4 respectivamente, de la Simulación N°2 del disco de $0.05 M_{\odot}$.

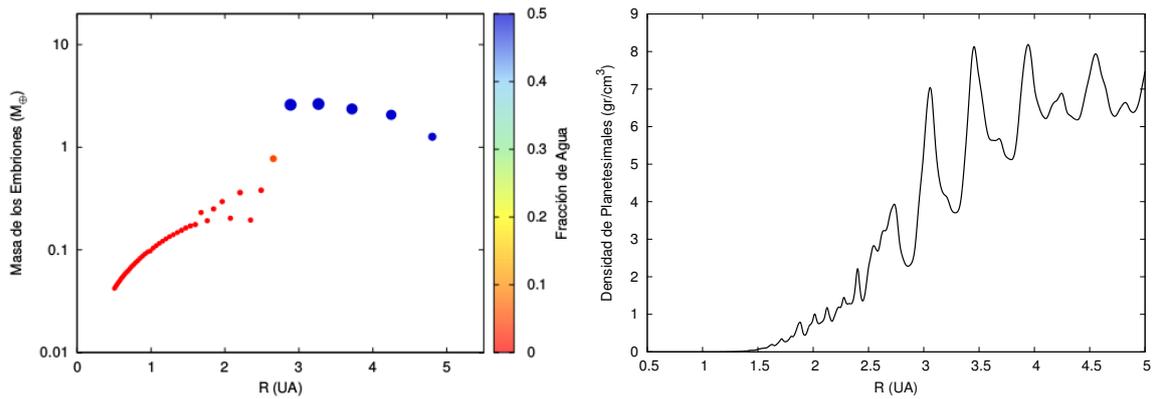


Figura 5.15. Distribuciones de embriones y planetesimales al final de la etapa gaseosa asumiendo un disco de $0.1M_{\odot}$ y un tiempo de disipación de 2.5Ma utilizando el modelo semianalítico. Serán las condiciones iniciales para el modelo de N-cuerpos.

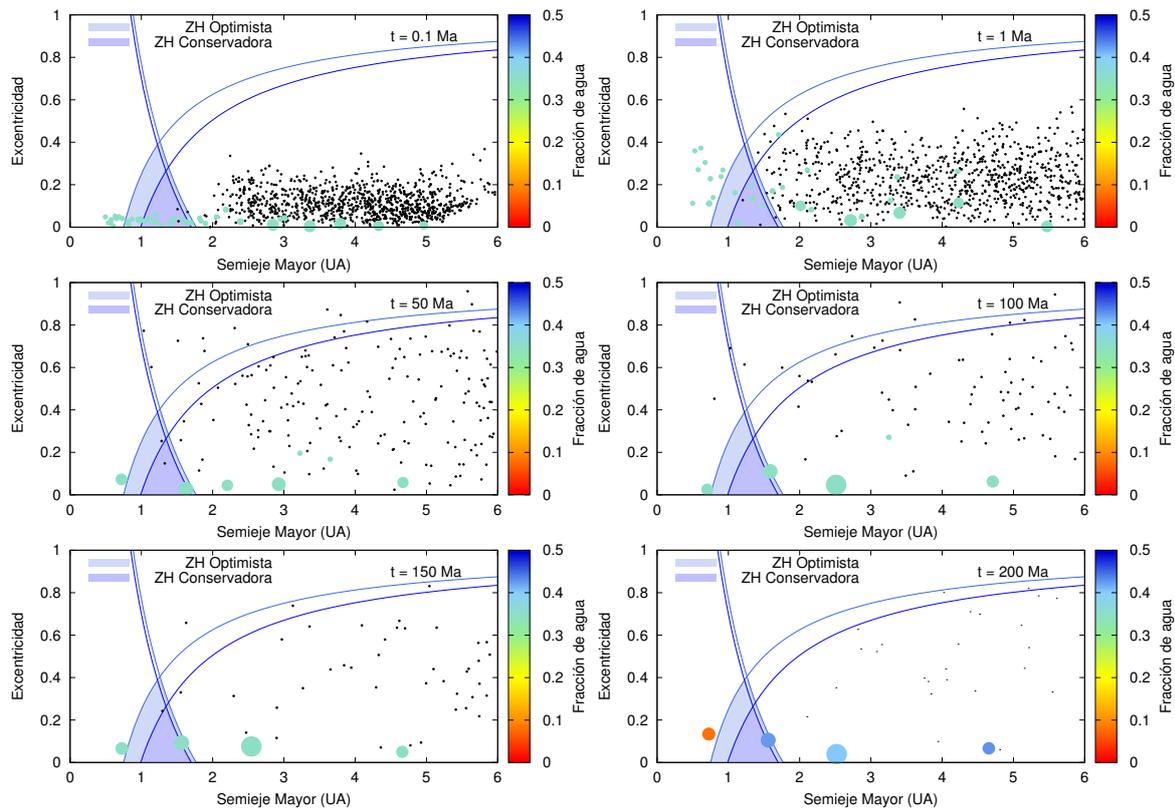


Figura 5.16. Evolución temporal de la Simulación N°3. Los puntos negros representan a los planetesimales, los círculos llenos representan a los embriones, y las variaciones de colores indican el porcentaje de agua de los mismos. Las regiones coloreadas son las Zonas de Habitabilidad, donde definimos una Conservadora y una Optimista. Las curvas de afelio y perihelio constantes son graficadas con colores azul y celeste y están asociadas a los límites internos y externos de las Zonas Habitables, Conservadora y Optimista. En el estado final del Sistema se encuentra un mundo de agua (N°42) en la Zona de Habitabilidad ubicado a 1.56UA. Dicho planeta tiene una masa de $3.75M_{\oplus}$ con un 42.6% de agua.

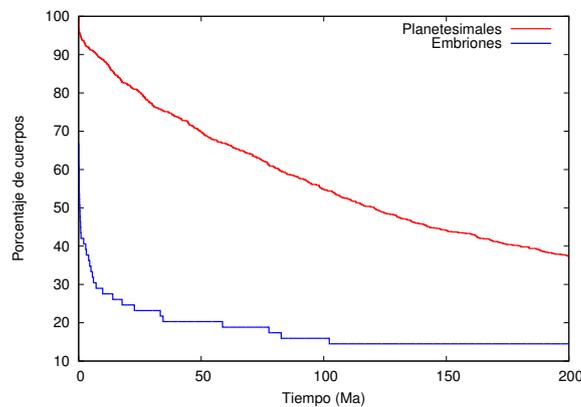


Figura 5.17. Porcentajes de planetesimales y embriones a medida que el sistema evoluciona para la Simulación N°3 del disco de $0.1M_{\odot}$

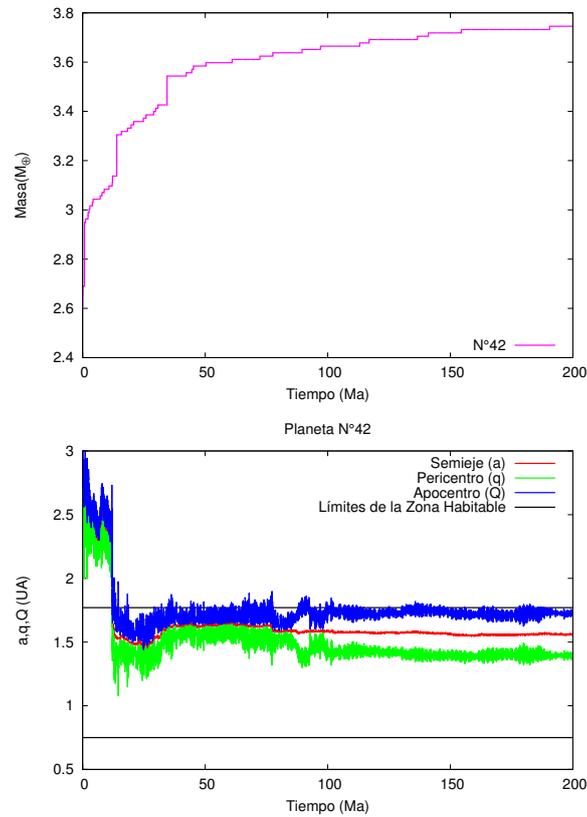


Figura 5.18. Evolución temporal de la masa y la órbita del mundo de agua (N°42) ubicado en la zona de habitabilidad de la Simulación N°3 del disco de $0.1M_{\odot}$

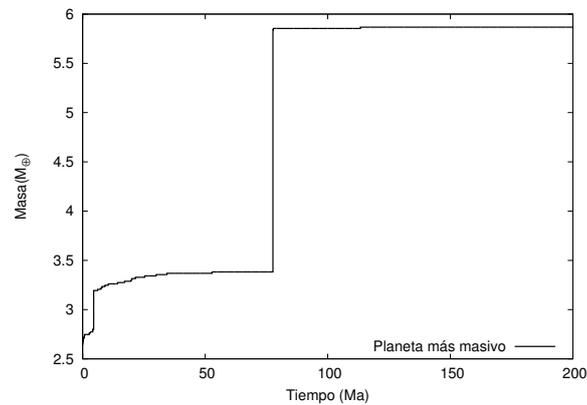


Figura 5.19. Evolución temporal de la masa del planeta más masivo (N°43) de la Simulación N°3 del disco de $0.1M_{\odot}$

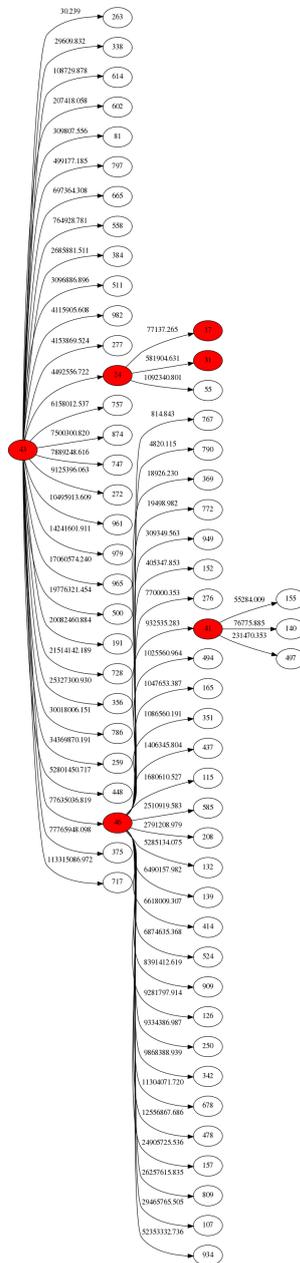


Figura 5.20. Esquema que representa la historia colisional del planeta más masivo (N°43) de la Simulación N°3 del disco de $0.1M_{\odot}$. Los círculos en rojo representan a los embriones, mientras que los círculos en blanco a los planetesimales.

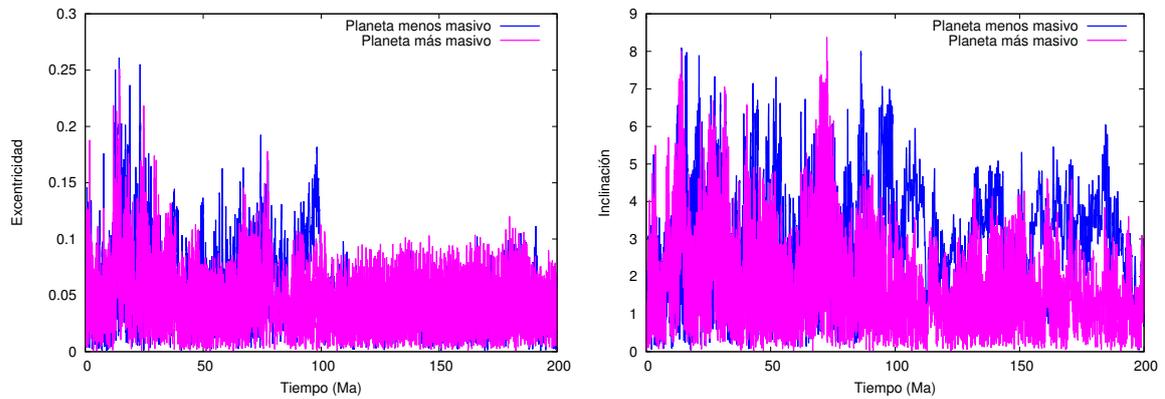


Figura 5.21. Evolución en el tiempo de las excentricidades e inclinaciones de los planetas más y menos masivos, N°43 y N°45 respectivamente, de la Simulación N°3 del disco de $0.1M_{\odot}$.

Capítulo 6

Simulaciones para Tiempo de Disipación del Gas 5Ma

Durante este capítulo mostraremos los resultados obtenidos de la formación de sistemas planetarios sin gigantes gaseosos asumiendo un tiempo de disipación de 5Ma asociado a la componente gaseosa del disco. De manera análoga a lo realizado en los capítulos anteriores, decidimos tomar dos disco protoplanetarios de trabajo, con masas de $0.05M_{\odot}$ y $0.1M_{\odot}$.

6.1. Disco $0.05M_{\odot}$

En esta sección presentaremos los resultados concernientes a la formación de sistemas planetarios a partir de un disco de $0.05M_{\odot}$, asumiendo un tiempo de disipación para la componente gaseosa de 1.5Ma. Primero aplicaremos un modelo semianalítico para encontrar las distribuciones de embriones y planetesimales al finalizar la etapa gaseosa. Dichas distribuciones serán nuestras condiciones iniciales para las simulaciones de N-cuerpos. Por último utilizaremos el código MERCURY para realizar nuestras simulaciones de N-cuerpos y analizaremos las características principales de los sistemas planetarios simulados.

6.1.1. Aplicación del Modelo Semianalítico

El modelo semianalítico nos proporciona la evolución del disco protoplanetario durante la etapa gaseosa. En este caso asumimos un tiempo de disipación de 5Ma. La Figura 6.1 presenta la distribución de embriones y planetesimales al final la integración durante la fase gaseosa. La masa total en sólidos entre 0.5UA y 5UA es de aproximadamente $14.55M_{\oplus}$, donde el 55.33% se distribuye en embriones planetarios y el 47.67% en planetesimales. Nuevamente destacamos que, teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la secciones 4.1.1 y 5.1.1, un mayor tiempo de disipación asociado a la componente gaseosa del disco, conduce a un incremento en la masa de los embriones planetarios y a un decrecimiento en la masa asociada a la población de planetesimales.

6.1.2. Modelo de N-cuerpos: Condiciones Iniciales

Las condiciones iniciales para el modelo de N-cuerpos se calculan de manera análoga a lo explicado en la sección 4.1.2. En particular para el disco de $0.05M_{\oplus}$, asumiendo un tiempo de disipación de 5Ma, la distribución de planetesimales en la región de estudio está dada por la Tabla 6.1.

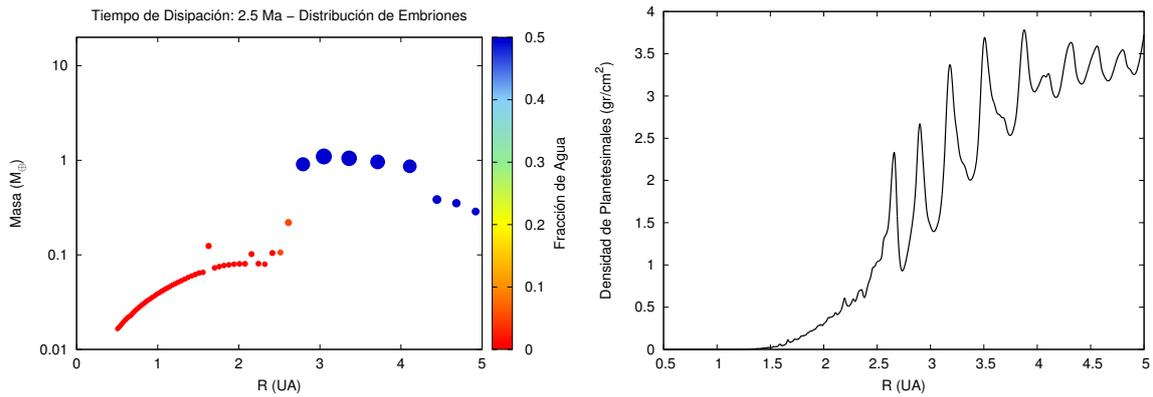


Figura 6.1. Distribuciones finales de embriones y planetesimales asumiendo un tiempo de disipación de la componente gaseosa de 5Ma para un disco de $0.05M_{\odot}$ utilizando el modelo semianalítico. Serán las condiciones iniciales del modelo de N-cuerpos.

Región del disco	Número de Planetesimales
0.5-1UA	0
1-1.5UA	0
1.5-2UA	5
2-2.5UA	24
2.5-3UA	80
3-3.5UA	138
3.5-4UA	208
4-4.5UA	252
4.5-5UA	293

Tabla 6.1. Condiciones iniciales para la población de planetesimales asumiendo un tiempo de disipación de la componente gaseosa de 5Ma para un disco de $0.05M_{\odot}$.

Realizamos 3 simulaciones con el código de N-cuerpos, debido a la naturaleza estocástica del proceso de acreción.

6.1.3. Resultados del Modelo de N-cuerpos

Las simulaciones de N-cuerpos presentadas en esta sección han evolucionado por más de 150Ma. Destacamos que las 3 simulaciones desarrolladas conservan la energía mejor que una parte en 10^3 . Todas las simulaciones realizadas forman al menos un planeta en la zona habitable del sistema. En la Tabla 6.2 se muestran las principales características de dichos planetas. En la Tabla 6.3 también presentamos las características más relevantes de los planetas hallados entre 2UA y 4UA para las tres simulaciones.

Podemos diferenciar dos escenarios distintos, el de las Simulaciones N°1 y N°3, y el correspondiente a la Simulación N°2:

1. Sistemas planetarios configurados por un mundo de agua con una masa media de $1.45M_{\oplus}$ ubicado en la zona habitable y tierras/súper tierras entre 2UA y 4UA
2. Sistema planetario con dos tierras y un mundo de agua dentro de los límites de la zona de habitabilidad, y tierras entre 2UA y 4UA

Proseguiremos a describir en detalle los dos escenarios antes nombrados:

Simulación	Planeta	Semieje inicial	Semieje final	Masa final	Porcentaje de agua final
N° 1	N°60	4.11UA	1.28UA	$1.08M_{\oplus}$	49.7%
N° 2	N°11	0.65UA	0.78UA	$0.62M_{\oplus}$	9.37%
	N°35	1.29UA	1.27UA	$0.32M_{\oplus}$	8.21%
	N°58	3.36UA	1.65UA	$2.93M_{\oplus}$	41.92%
N° 3	N°57	3.05UA	1.31UA	$1.82M_{\oplus}$	39.20%

Tabla 6.2. Características principales de los planetas formados dentro de la Zona Habitable para las 3 Simulaciones con tiempo de disipación de la componente gaseosa de 5Ma y una masa de disco protoplanetario inicial de $0.05 M_{\odot}$

Simulación	Planeta	Semieje inicial	Semieje final	Masa final
N° 1	N°57	3.05UA	2.15UA	$3.15M_{\oplus}$
	N°59	3.71UA	3.28UA	$1.27M_{\oplus}$
N° 2	N°60	4.11UA	2.75UA	$2.28M_{\oplus}$
	N°37	1.37UA	2.92UA	$0.17M_{\oplus}$
N° 3	N°58	3.36UA	2.14UA	$2.73M_{\oplus}$
	N°56	2.79UA	3.72UA	$2.06M_{\oplus}$

Tabla 6.3. Planetas formados entre 2UA y 4UA para las 3 Simulaciones con tiempo de disipación 5Ma y una masa de disco protoplanetario inicial de $0.05 M_{\odot}$

Simulación	Acreciones		Eyecciones		Colisiones Centrales	
	P	E	P	E	P	E
N°1	23.3%	69.84%	4.5%	0%	7.5%	0%
N° 2	23.8%	69.84%	5.7%	0%	4.7%	1.59%
N° 3	23.5%	68.25%	7.2%	0%	5.7%	0%

Tabla 6.4. Esta tabla muestra los porcentajes de planetesimales (P) y embriones (E) que a lo largo de la integración fueron removidos debido a acreciones, eyecciones y colisiones con la estrella central. Asumimos un tiempo de disipación de 5Ma y un disco de $0.05M_{\odot}$

Primer escenario

En la Figura 6.2 presentamos el mosaico de evolución de la Simulación N°1 que elegimos como representativa de este escenario. Vemos que al comienzo que los planetesimales se encuentran en su mayoría ubicados detrás de la línea de hielo, debido a la distribución dada por el modelo semianáltico. Cuando los cuerpos comienzan a interactuar gravitatoriamente generan colisiones y encuentros que se traducen en cambios en sus posiciones, aumentos de las excentricidades y la remoción de cuerpos en el disco. Se puede observar la remoción de planetesimales y embriones a medida que pasa el tiempo, representado en la Figura 6.3 donde sobreviven el 30.16 % de embriones y el 64.7 % de planetesimales. El mecanismo de remoción más importante tanto para planetesimales como para embriones es la acreción como muestra la Tabla 6.4. Un 7.5 % de los planetesimales colisionaron con la estrella central y un 4.5 % fueron eyectados. Los embriones no sufieron estos procesos de remoción.

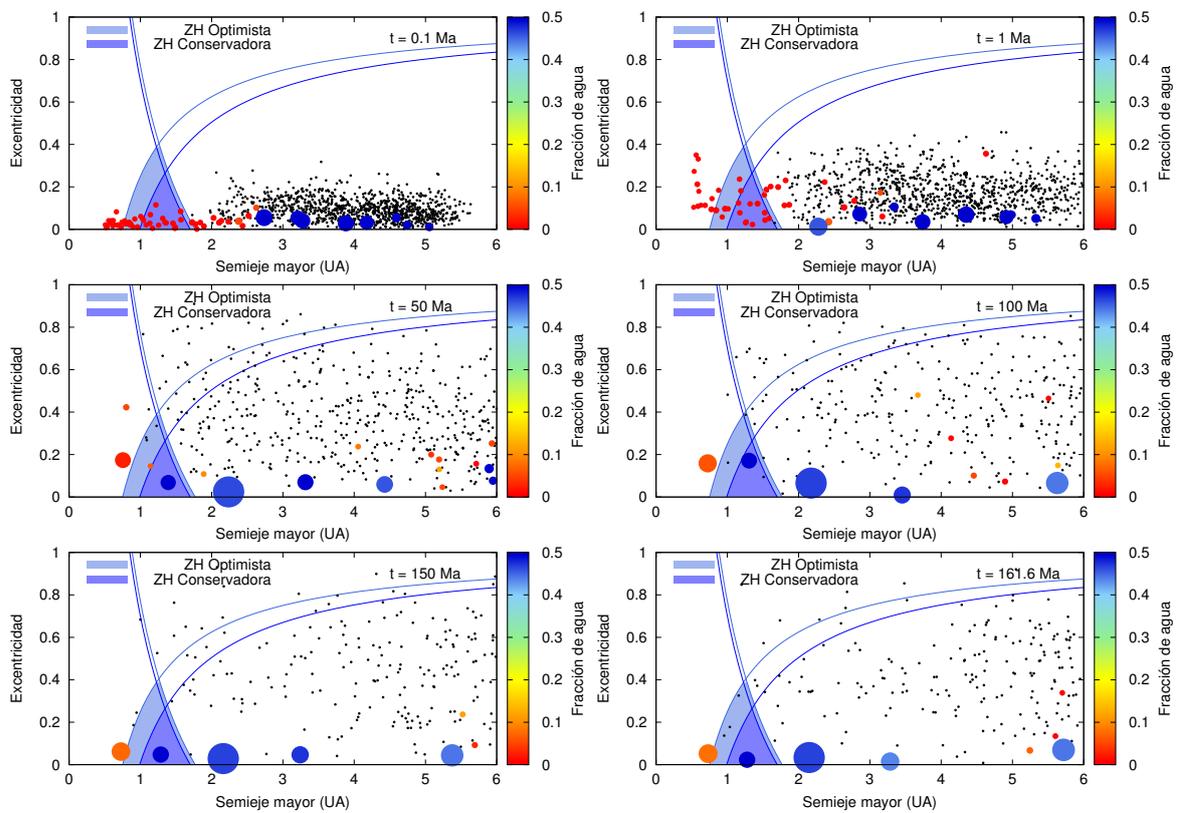


Figura 6.2. Evolución temporal de la Simulación N°1 correspondiente al disco de $0.05M_{\odot}$. Los puntos negros representan a los planetesimales, los círculos llenos representan a los embriones, y las variaciones de colores indican el porcentaje de agua de los mismos. Las regiones coloreadas son las Zonas de Habitabilidad, donde definimos una Conservadora y una Optimista. Las curvas de afelio y perihelio constantes son graficadas con colores celeste y azul, y están asociadas a los límites internos y externos de las Zonas Habitables Conservadora y Optimista. En el estado final del Sistema se encuentran un mundo de agua (N°60) en la Zona de Habitabilidad ubicado a 1.28UA. Su masa es de $1.08M_{\oplus}$ con un contenido de agua del 49.7 %.

A los 161.4Ma el sistema se encuentra conformado por:

- Un planeta interno en 0.73UA con una masa de $1.3M_{\oplus}$ y 7.98 % de agua.
- Un mundo de agua dentro de la zona habitable en 1.28UA con una masa de $1.08M_{\oplus}$ y

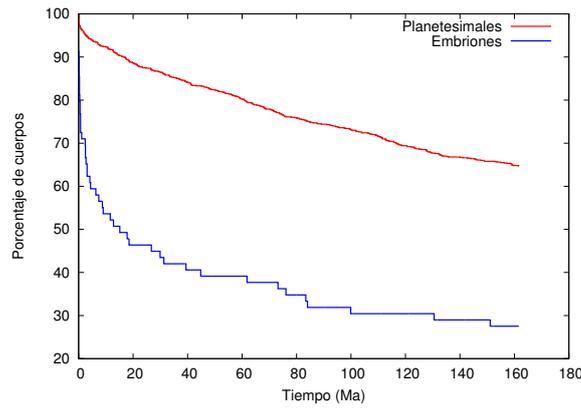


Figura 6.3. Porcentajes de planetesimales y embriones en función del tiempo. Gráfico correspondiente a la Simulación N°1 del disco de $0.05M_{\odot}$

casi un 50% de agua.

- Una súper tierra ubicada a 2.15UA de la estrella central, con una masa de $3.15M_{\oplus}$ y una tierra en 3.28UA con una masa de $1.27M_{\oplus}$.

En la Figura 6.4 observamos tanto la evolución orbital del mundo de agua (N°60) como el crecimiento de su masa en el tiempo. El planeta inició su evolución detrás de la línea de hielo y fue migrando hacia regiones más internas en el disco debido a las interacciones gravitatorias con otros cuerpos. Luego de 20Ma ingresa en la zona habitable y permanece allí hasta los 161.4Ma. Se observa un crecimiento paulatino de la masa del cuerpo en función del tiempo. De la Figura 6.5 podemos ver que estos aumentos son debidos únicamente a la acreción de planetesimales ya que este planeta nunca colisionó con embriones. En cuanto al origen de agua entonces los planetesimales aportaron el total de la masa que fue acretada durante su evolución, y sólo el agua primordial se debe al embrión semilla de este planeta.

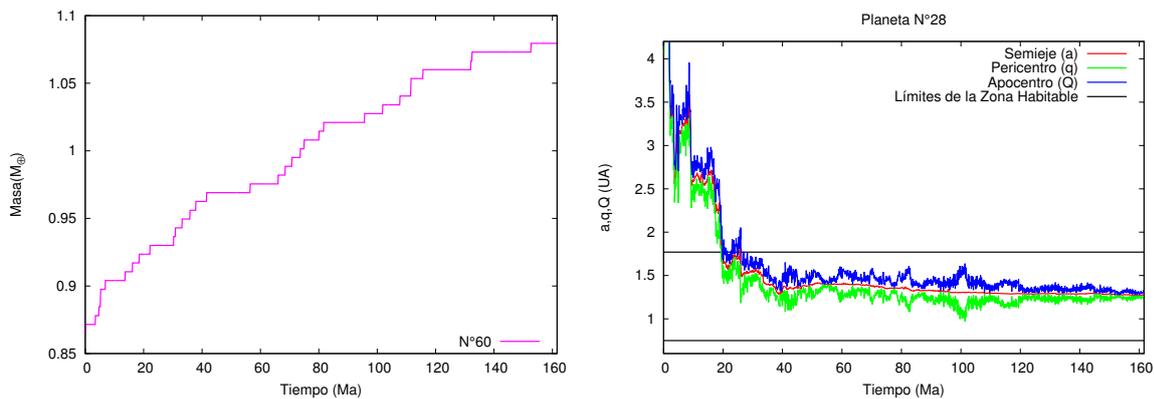


Figura 6.4. Evolución de la masa y la órbita en función del tiempo para el mundo de agua (N°60) ubicado en la zona habitable de la Simulación N°1 del disco de $0.05M_{\odot}$

El planeta más masivo del sistema (N°57) se encuentra entre 2UA y 4UA con un semieje de 2.15UA. De la Figura 6.6 podemos ver que el planeta sufrió dos grandes colisiones una a los 44.8Ma y otra a los 83.3Ma que le aportaron más del 50% de su masa final.

En la Figura 6.7 se muestran las evoluciones de la inclinación y excentricidad en función del tiempo de los planetas más y menos masivos (N°57 y N°60), y podemos observar que estos valores se encuentran más amortiguados para el planeta más masivo. Mostramos los

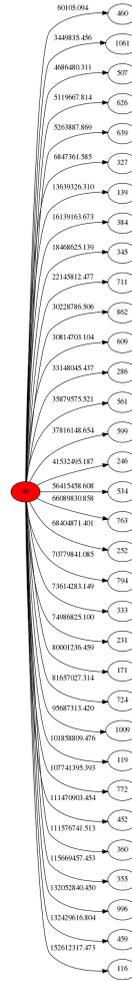


Figura 6.5. Esquema representativo de la historia colisional del planeta ubicado en la zona habitable de la Simulación N°1 del disco de $0.05M_{\odot}$. Los círculos rojos representan los embriones y los círculos blancos los planetesimales.

valores medios de excentricidad e inclinación para ambos cuerpos en la Tabla 6.5. Para el planeta más masivo los valores medios de la excentricidad e inclinación son de 0.11 y 4.15° respectivamente, mientras que para el planeta menos masivo estos valores aumentan a 0.17 y 7.02° .

Segundo escenario

En la Figura 6.8 presentamos los mosaicos de evolución del sistema de la Simulación N°2. A los 174.5Ma 34.2% de planetesimales y 71.43% de embriones planetarios fueron removidos. Los embriones no sufrieron eyecciones y sólo uno de ellos colisionó con la estrella central como muestra la Tabla 6.4. El 4.7% de los planetesimales colisionaron con la estrella central y el 5.7% fueron eyectados.

A los 174.5Ma el sistema se encuentra compuesto por:

- Un planeta interno ubicado en 0.6UA con una masa de $0.44M_{\oplus}$ y 13.36% de agua.
- Un mundo de agua con una masa de $2.93M_{\oplus}$ (planeta más masivo del sistema), dos tierras con una masa media de $0.47M_{\oplus}$ y un porcentaje de agua menor al 10% , los tres planetas ubicados en la zona habitable.

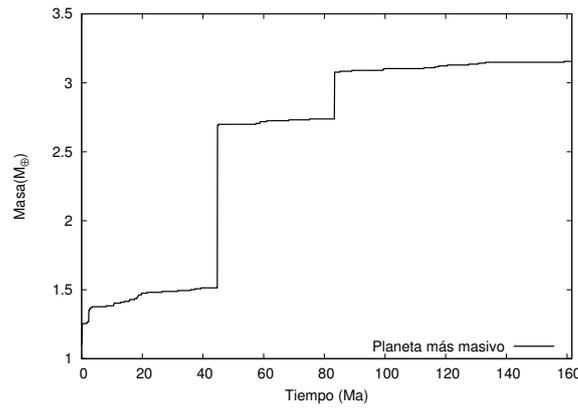


Figura 6.6. Evolución temporal de la masa del planeta más masivo (N°57) de la Simulación N°1 del disco de $0.05M_{\odot}$

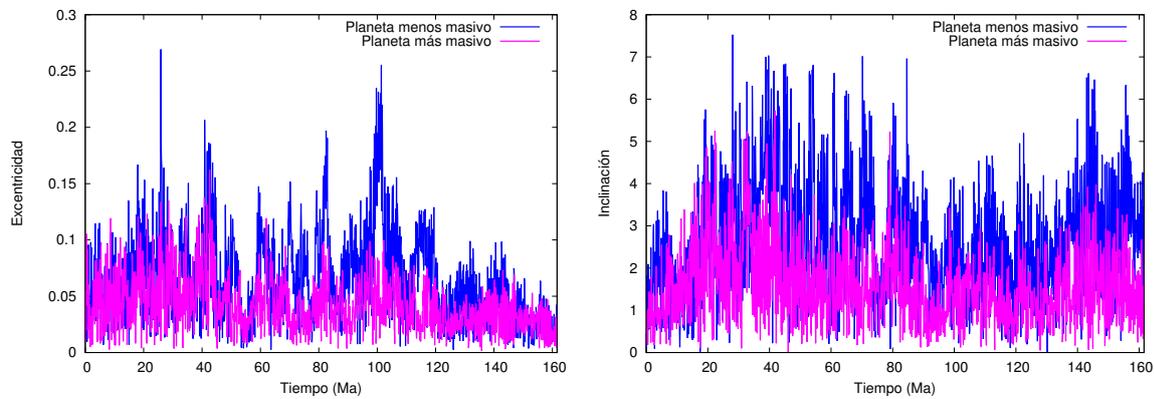


Figura 6.7. Evolución en el tiempo de las excentricidades e inclinaciones de los planetas más y menos masivos, N°57 y N°60 respectivamente, de la Simulación N°1 del disco de $0.05M_{\odot}$.

- Dos planetas entre 2 y 4UA: una tierra en 2.75UA con una masa de $2.28M_{\oplus}$ y un 46.94% de agua, y un planeta de $0.17M_{\oplus}$ ubicado en 2.92UA con menos del 2% de agua.

Es interesante estudiar cómo fue la evolución de los planetas de la zona habitable. En la Figura 6.9 podemos ver las evoluciones orbitales de los 3 planetas en función del tiempo. A su vez podríamos compararlo con sus historias de acreción, es decir la evolución de la masa en función del tiempo, como indica la Figura 6.10.

Podemos ver que el planeta N°11 proviene de la región más interna del disco, con un semieje inicial de 0.65UA. Los primeros millones de años fue alternando su posición dentro y fuera de los límites de la zona habitable. A partir de los 30Ma su semieje se mantuvo

	Planeta	Masa inicial	Semieje final	Semieje excentricidad	Promedio inclinación	Promedio
Planeta más masivo	N°57	$3.15M_{\oplus}$	3.05UA	2.14UA	0.11	4.15°
Planeta menos masivo	N°60	$1.08M_{\oplus}$	4.11UA	1.29UA	0.17	7.02°

Tabla 6.5. Promedios de las excentricidades e inclinaciones para los planetas más y menos masivos del sistema de la Simulación N°1 del disco de $0.05M_{\odot}$

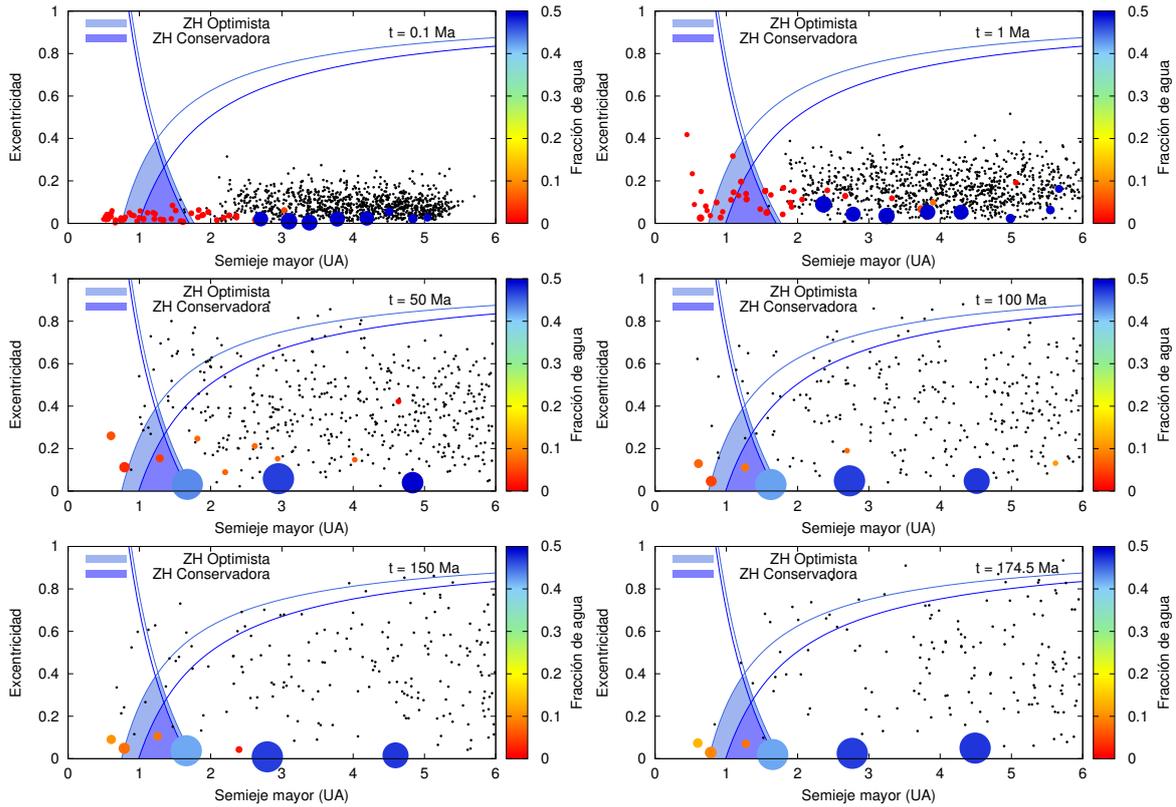


Figura 6.8. Evolución temporal de la Simulación N°2 del disco de $0.05M_{\odot}$. Los puntos negros representan a los planetesimales, los círculos llenos representan a los embriones, y las variaciones de colores indican el porcentaje de agua de los mismos. Las regiones coloreadas son las Zonas de Habitabilidad, donde definimos una Conservadora y una Optimista. Las curvas de afelio y perihelio constantes son graficadas con colores celeste y azul, y están asociadas a los límites internos y externos de las Zonas Habitables Conservadora y Optimista. En el estado final del Sistema se encuentran 3 planetas en la Zona de Habitabilidad. El más interno (N°11) ubicado a 0.78UA con una masa de $0.62M_{\oplus}$ y un porcentaje de agua del 9.37%. El siguiente (N°35) ubicado a 1.27UA con una masa de $0.32M_{\oplus}$ y un 8.21% de agua. Por último, planeta más externo (N°58) ubicado en 1.65UA resulta ser un mundo de agua, con una masa de $2.93M_{\oplus}$ y casi 42% de agua.

dentro de estos límites al igual que su apocentro, pero observamos que su pericentro sigue oscilando hacia la región más interna del disco. Este planeta sufrió una última gran colisión a los 22.9Ma la cual le aportó casi el 25% de su masa final. Este dato es de sumo interés ya que es una medida de su tiempo de formación.

El planeta N°35 sufrió 4 grandes colisiones con embriones planetarios antes de los 10Ma, los cuales aportaron el $\sim 15\%$ de su masa total. La última acreción del planeta se produjo a los 84.8Ma.

En cuanto al mundo de agua (planeta N°58) podemos observar que comenzó su evolución detrás de la línea de hielo donde durante los primeros millones de años acreció más del 50% de su masa debido a grandes colisiones con embriones planetarios. Las interacciones gravitatorias con otros cuerpos produjeron que el planeta migre hacia regiones más internas del disco hasta ubicarse a los 40Ma dentro de la zona de habitabilidad. A partir de los 60Ma el planeta se mantuvo dentro de estos límites manteniendo aproximadamente constante su semieje mayor.

A partir de estos análisis podemos inferir que el planeta N°35 y el mundo de agua presentan

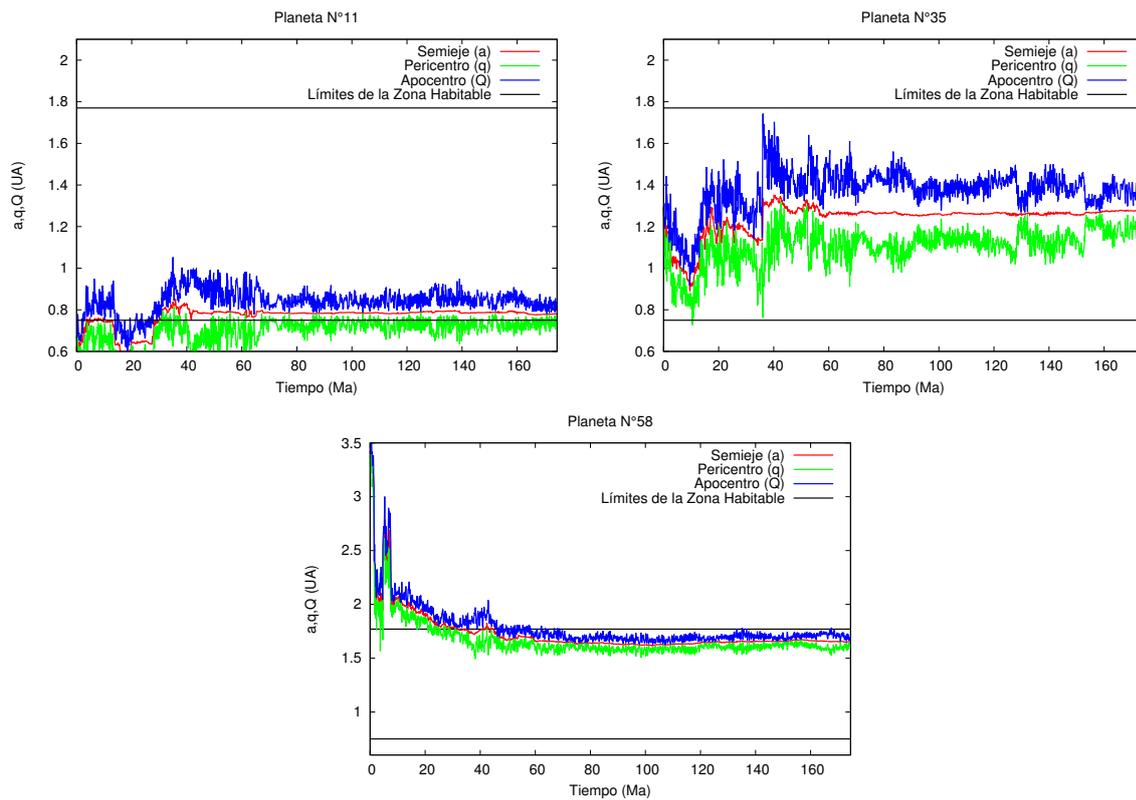


Figura 6.9. Evolución de las órbitas en función del tiempo para los planetas ubicados en la zona habitable (N°11, N°35 y N°58) de la Simulación N°2 del disco de $0.05M_{\odot}$

condiciones propicias para mantener agua en estado líquido sobre su superficie. Sin embargo el escenario presentado por el planeta N°11 no garantiza la sustentabilidad del agua en estado líquido sobre su superficie.

Analizamos de dónde proviene el contenido de agua para cada uno de estos tres planetas, teniendo en cuenta la cantidad de embriones y planetesimales con los que colisionaron y su contenido inicial de agua. Debido a las posiciones iniciales en el disco protoplanetario de los planetas N°11 y N°35, sus porcentaje de agua iniciales son despreciables. Obtuvimos que para los planetas N°11 y N°35 casi la totalidad del agua proviene de planetesimales de la región externa del disco. Mientras que para el mundo de agua encontramos que el 19 % fue aportado por planetesimales de la región externa del disco y el 81 % por embriones, teniendo en cuenta el contenido de agua que tenía inicialmente el embrión original. Recordemos que para un mundos de agua su contenido de agua inicial es del 50 % de su masa inicial.

En la Figura 6.11 comparamos las excentricidades e inclinaciones durante la evolución de los planetas más y menos masivos del sistema, N°58 y N°37 respectivamente. En el caso del planeta más masivo se puede observar que se amortiguan estos valores, como muestra la Tabla 6.6. El valor medio de la excentricidad del planeta más masivo es de 0.08 mientras que para el menos masivo aumenta a 0.27. El promedio de la inclinación es de 3.49° y 13.7° para el planeta más y menos masivo respectivamente.

6.2. Disco $0.1M_{\odot}$

En esta sección realizamos un análisis análogo al anterior concerniente a la formación de sistemas planetarios, considerando un disco de $0.1M_{\odot}$ y asumiendo el mismo tiempo de

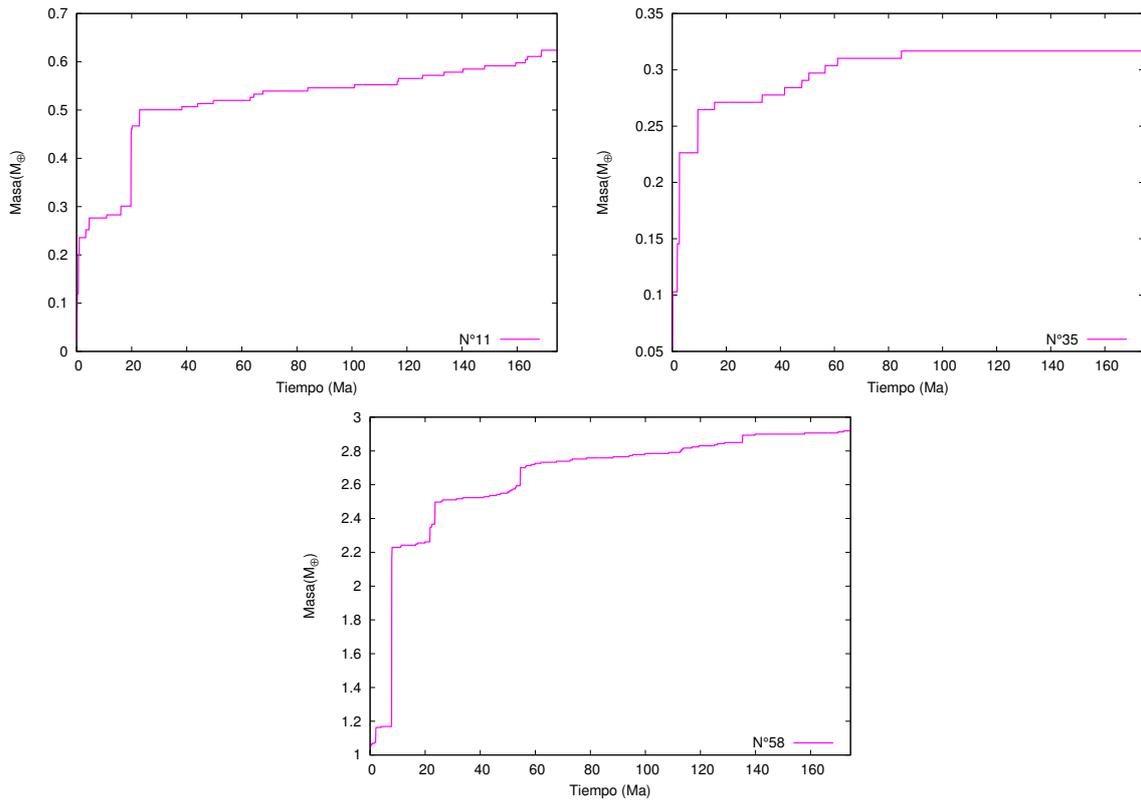


Figura 6.10. Evolución de la masa de los planetas de la zona habitable (N°11, N°35 y N°58) en función del tiempo para la Simulación N°2 del disco de $0.05M_{\odot}$

	Planeta	Masa	Semieje inicial	Semieje final	Promedio excentricidad	Promedio inclinación
Planeta más masivo	N°58	$2.93M_{\oplus}$	3.36UA	1.66UA	0.08	3.49°
Planeta menos masivo	N°37	$0.17M_{\oplus}$	1.37UA	2.39UA	0.27	13.7°

Tabla 6.6. Promedios de las excentricidades e inclinaciones para los planetas más y menos masivos del sistema correspondientes a la Simulación N°2 del disco de $0.05M_{\odot}$

disipación de 5Ma para la componente gaseosa.

6.2.1. Aplicación del Modelo Semianalítico

El modelo semianalítico nos proporciona la evolución del disco protoplanetario durante la etapa gaseosa. En este caso asumimos un tiempo de disipación de 5Ma. La Figura 6.12 presenta la distribución de embriones y planetesimales al final la integración durante la fase gaseosa. La masa total en sólidos entre 0.5UA y 5UA es de aproximadamente $29.1M_{\oplus}$, donde el 76 % se distribuye en embriones y el 24 % en planetesimales.

Nuevamente destacamos que, teniendo en cuenta los resultados obtenidos en las secciones 4.2.1 y 5.2.1, un mayor tiempo asociado a la componente gaseosa del disco, conduce a un incremento en la masa de los embriones planetarios y a un decrecimiento en la masa asociada a la población de planetesimales.

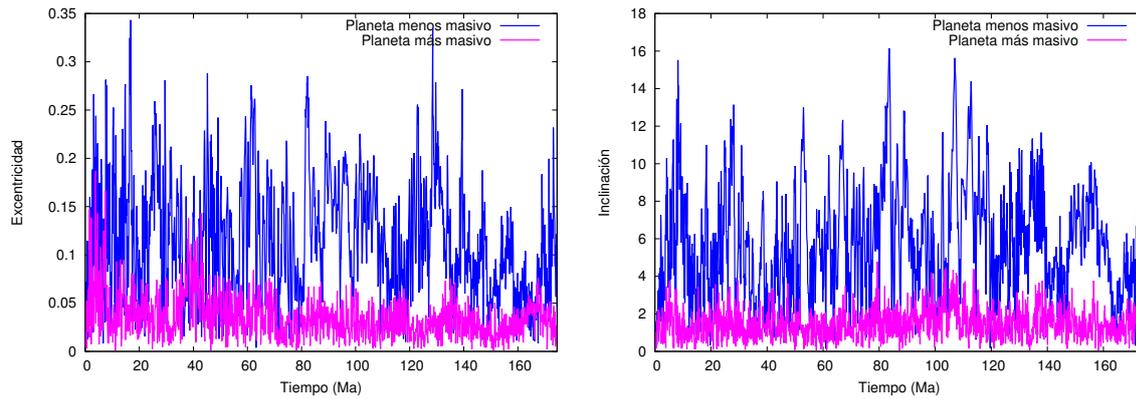


Figura 6.11. Evolución en el tiempo de las excentricidades e inclinaciones de los planetas más y menos masivos (N°58 y N°37) de la Simulación N°2 del disco de $0.05M_{\odot}$.

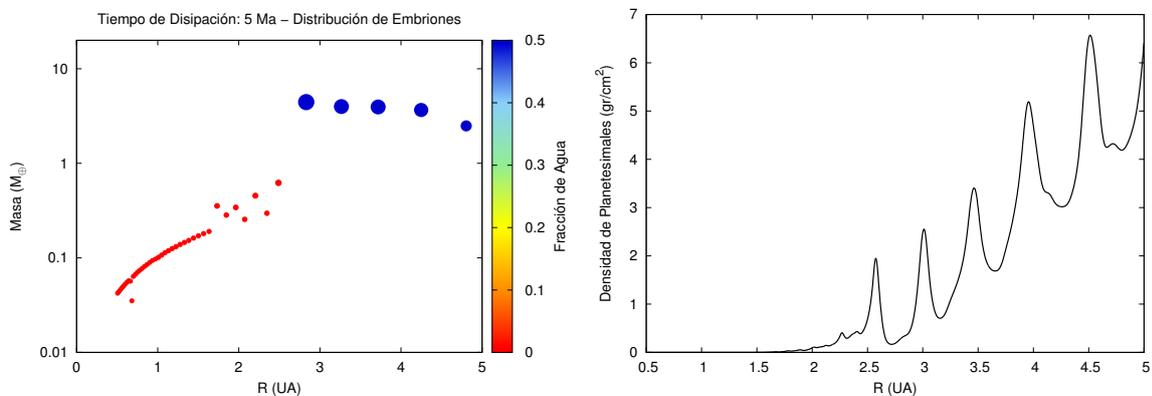


Figura 6.12. Distribuciones finales de embriones y planetesimales asumiendo un tiempo de disipación de la componente gaseosa de 5Ma para un disco de $0.1M_{\odot}$ utilizando el modelo semianalítico. Serán condiciones iniciales para el modelo de N-cuerpos.

6.2.2. Condiciones Iniciales para el Modelo de N-cuerpos

Calculamos las condiciones iniciales del modelo de N-cuerpos de manera análoga a lo explicado en la sección 4.1.2. En particular la distribución de planetesimales en la región de estudio está dada por la Tabla 6.7.

Debido a la naturaleza estocástica de estos procesos realizamos 3 simulaciones de N-cuerpos que analizaremos a continuación.

6.2.3. Resultados del Modelo de N-cuerpos

Estas simulaciones fueron integradas hasta 250Ma, ya que a los 200Ma observamos que la configuración final del sistema variaba rápidamente.

Dos de los sistemas planetarios formados en las simulaciones presentan un planeta en la zona habitable, mientras que uno de ellos carece de planetas en esa región. En la Tabla 6.8 mostramos las características fundamentales de los planetas formados en la zona de habitabilidad para las primeras dos simulaciones. La Tabla 6.9 muestra las características más relevantes de los planetas ubicados entre 2UA y 4UA, podemos notar que la Simulación N°2 carece de planetas en la zona. Analizando las tablas nombradas antes, vemos que cada simulación presenta un escenario particular, por lo que procederemos a describirlas en detalle.

Región del disco	Número de Planetesimales
0.5-1UA	0
1-1.5UA	0
1.5-2UA	1
2-2.5UA	11
2.5-3UA	37
3-3.5UA	97
3.5-4UA	185
4-4.5UA	274
4.5-5UA	395

Tabla 6.7. Condiciones iniciales para la población de planetesimales en un disco de $0.1M_{\odot}$ asumiendo un tiempo de disipación de la componente gaseosa de 5Ma

Simulación	Planeta	Semieje inicial	Semieje final	Masa final	Porcentaje de agua final
N° 1	N°42	3.26 UA	1.2 UA	$5.85 M_{\oplus}$	36.4 %
N° 2	N°41	2.83 UA	1.46UA	$9.74M_{\oplus}$	44.64 %
N° 3	-	-	-	-	-

Tabla 6.8. Características principales de los planetas formados dentro de la Zona Habitable para las 3 Simulaciones con tiempo de disipación 5Ma y una masa de disco protoplanetario inicial de $0.1 M_{\odot}$

Simulación	Planeta	Semieje inicial	Semieje final	Masa final
N° 1	N°41	2.83UA	2.8 UA	$5.63M_{\oplus}$
N° 2	-	-	-	-
N° 3	N°44	4.25UA	3.49 UA	$6.51 M_{\oplus}$

Tabla 6.9. Planetas formados entre 2UA y 4UA para las 3 Simulaciones con tiempo de disipación 5Ma y una masa de disco protoplanetario inicial de $0.1 M_{\odot}$

Primer escenario

El sistema comienza a evolucionar rápidamente, los cuerpos interactúan gravitatoriamente aumentando sus excentricidades como muestra la Figura 6.13. A los 250Ma el sistema se encuentra compuesto por un mundo de agua ($N^{\circ}42$) de $5.85M_{\oplus}$ con un 36.4% de agua ubicado en la zona habitable a 1.2UA. Entre 2UA y 4UA sobrevive una super tierra de $5.63M_{\oplus}$.

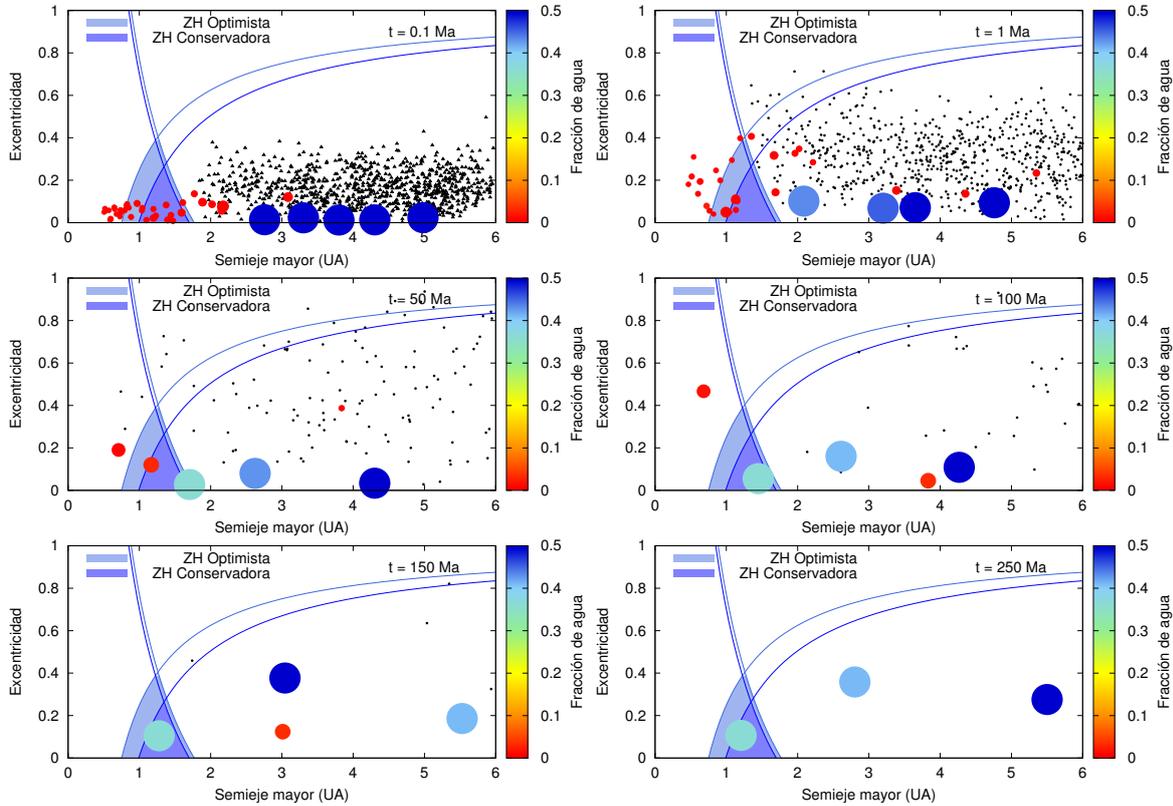


Figura 6.13. Evolución temporal de la Simulación N°1 del disco de $0.1M_{\odot}$. Los puntos negros representan a los planetesimales, los círculos llenos representan a los embriones, y las variaciones de colores indican el porcentaje de agua de los mismos. Las regiones coloreadas son las Zonas de Habitabilidad, donde definimos una Conservadora y una Optimista. Las curvas de afelio y perihelio constantes son graficadas con colores celeste y azul, y están asociadas a los límites internos y externos de las Zonas Habitables Conservadora y Optimista. A los 250Ma se encuentra un mundo de agua ($N^{\circ}42$) en la Zona Habitable ubicado a 1.2UA con una masa de $5.85M_{\oplus}$ y 36.4% de agua.

De la Figura 6.14 observamos la remoción de cuerpos en función del tiempo. Al finalizar la integración permanece en el disco un 9.5% de los planetesimales que había en el comienzo, y sólo un 17.78% de los embriones que se encontraban inicialmente.

De la Tabla 6.10 podemos ver que el 28.1% de los planetesimales colisionaron con la estrella central, 49.6% fueron eyectados y el 12.8% fueron acretados. Por lo tanto el mecanismo más eficiente para la remoción de planetesimales resulta ser la eyección. En el caso de los embriones, las remociones son debidas mayormente a las acreciones de estos cuerpos, dando como resultado 28 embriones acretados. No se producen eyecciones y 9 embriones colisionan con la estrella.

El planeta más masivo en este escenario es el mundo de agua que se encuentra en la zona habitable ($N^{\circ}42$), es de nuestro interés analizar en detalle su evolución y sus características más importantes. En la Figura 6.15 observamos la evolución temporal de la órbita y la masa

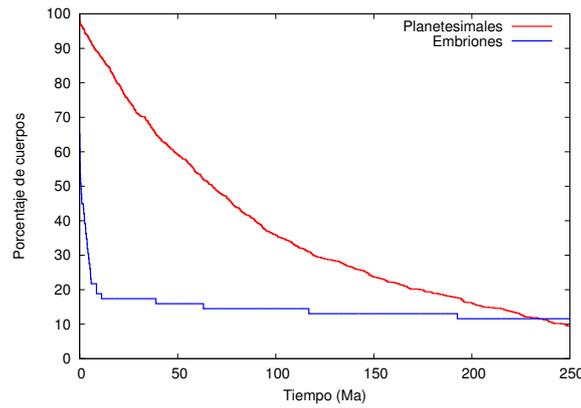


Figura 6.14. Porcentajes de planetesimales y embriones en función del tiempo. Gráfico correspondiente a la Simulación N°1 del disco de $0.1M_{\odot}$

Simulación	Acreciones		Eyecciones		Colisiones Centrales	
	P	E	P	E	P	E
N°1	12.8 %	62.22 %	49.6 %	0 %	28.1 %	20 %
N° 2	9.3 %	35.55 %	30.1 %	4.44 %	48.5 %	40 %
N° 3	14.3 %	62.22 %	50.6 %	11.11 %	18.9 %	2.22 %

Tabla 6.10. Porcentaje de planetesimales (P) y embriones (E) que a lo largo de la integración fueron removidos debido a acreciones, eyecciones y colisiones con la estrella central asumiendo un tiempo de disipación de 5Ma para un disco de $0.1M_{\oplus}$

de este planeta. En un principio planeta se encontraba detrás de la línea de hielo y debido a la interacción gravitatoria con otros cuerpos fue migrando hacia regiones más internas en el disco. La colisión que sufrió a los 55Ma produjo que el planeta ingresara en la zona habitable. A partir de ese momento su semieje mayor se mantuvo dentro de los límites de la región habitable, mientras que su apocentro y pericentro varían por fuera y dentro de la zona habitable. Las excursiones periódicas del pericentro y apocentro fuera de la zona de habitabilidad nos obliga a poner en duda el interés astrobiológico de este planeta. En efecto, este escenario no garantiza la sustentabilidad del agua en estado líquido sobre su superficie.

Si bien el último impacto con un embrión se produce a los 56Ma, la última gran colisión que sufrió este planeta se produjo aproximadamente a los 7Ma, donde fue aportado el 11 % de su masa. La Figura 6.16 muestra esquemáticamente la cantidad de embriones y planetesimales que fueron acretados durante su evolución, podemos ver que sólo colisionó con 5 embriones.

La cantidad de agua que posee este planeta proviene en un 6.5 % de planetesimales de la zona externa del disco que fueron acretados y un 93.5 % de embriones, tanto de la semilla originaria como de las colisiones con otros embriones a lo largo de su evolución. Debido a su posición inicial en el disco protoplanetario podemos decir que la cantidad de agua primordial de este planeta era del 50 % de su masa inicial.

Segundo escenario

El esquema evolutivo para esta simulación es análogo al anterior, como indica la Figura 6.17. Cuando los cuerpos comienzan a interactuar generan colisiones y encuentros, que se traducen en cambios en sus posiciones y en la remoción de cuerpos en el disco.

En la Figura 6.18 presentamos cómo varía el porcentaje de cuerpos en función del tiempo.

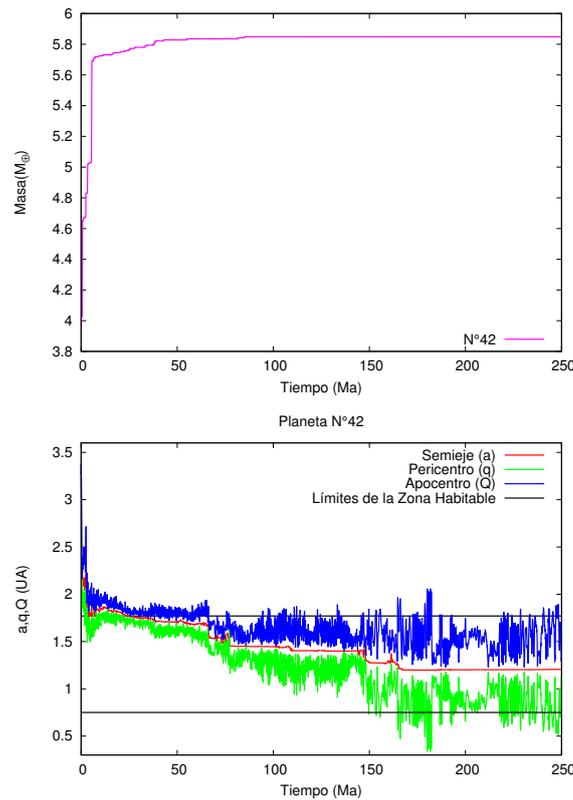


Figura 6.15. Evolución en el tiempo de la órbita y la masa del planeta que se ubica dentro de la zona de habitabilidad (N°42) para la Simulación N°1 del disco de $0.1M_{\odot}$

Observamos que al finalizar la integración sólo sobrevive un 12.1 % de planetesimales y 17.78 % de embriones.

De la Tabla 6.10 se puede ver la cantidad de cuerpos que fueron removidos debido a cada mecanismo. Para los planetesimales el mecanismo más eficiente de remoción fueron las colisiones con la estrella central donde el 48.5 % de los pequeños cuerpos sufrieron este fenómeno. El 30.1 % de los planetesimales fueron eyectados y sólo el 9.5 % fueron acretados. Al igual que los planetesimales, el mecanismo que predominó para los embriones fueron las colisiones con la estrella central donde 18 cuerpos sufrieron este fenómeno, de los restantes sólo 2 fueron eyectados y 16 fueron acretados.

A los 250Ma podemos observar que sólo se encuentra un mundo de agua en 1.46UA dentro de la zona habitable, con una masa de $9.74M_{\oplus}$. El disco en la zona interna y externa a la región de habitabilidad se encuentra despoblado.

El único planeta que sobrevive a los 250Ma en nuestra región de estudio se ubica en la zona habitable (N°41). Es un mundo de agua con una masa de $9.74M_{\oplus}$ y una cantidad de agua del 44.64 %, de dónde sólo el 3.1 % fue aportado por planetesimales de la zona externa del disco y el 96.9 % proviene de embriones. Destacamos que este planeta comienza la simulación en la región externa del disco, luego de la línea de hielo. Debido a esto, su contenido primordial de agua es del 50 % de su masa inicial. Analizando la historia colisional, Figura 6.20, podemos ver que la última gran colisión que sufrió este planeta se produjo aproximadamente a los 117Ma. A su vez de la Figura 6.19 observamos que durante esta colisión acretó el 48.25 % de su masa final. Este último impacto ubicó al mundo de agua dentro de los límites de la zona habitable. Si bien a partir de ese momento su semieje mayor se mantuvo siempre dentro de los límites de la zona habitable, su pericentro y apocentro no lo hicieron. Por lo tanto el

	Planeta	Masa	Semieje inicial	Semieje final	Promedio excentricidad	Promedio inclinación
Planeta más masivo	N°41	$9.74M_{\oplus}$	2.83UA	1.78UA	0.15	4.89°
Planeta menos masivo	N°22	$1.57M_{\oplus}$	1.05UA	0.57UA	0.52	20.47°

Tabla 6.11. Promedios de las excentricidades e inclinaciones para los planetas más y menos masivos (N°41 y N°22) del sistema de la Simulación N°3 del disco de $0.1M_{\odot}$

escenario que presenta el mundo de agua no garantiza la sustentabilidad del agua en estado líquido en su superficie.

Tercer escenario

En la Figura 6.21 presentamos la evolución temporal del sistema de la Simulación N°3. Análogamente a lo descrito en los escenarios anteriores llegamos a la configuración final del sistema. A los 250Ma la zona habitable se encuentra despoblada. En la región más interna del disco se ubica, a 0.57UA, un planeta con una masa de $1.57M_{\oplus}$ con un 2% de agua que al comienzo de la integración se encontraba en la zona habitable con un semieje de 1.05UA.

Podemos distinguir otros dos planetas en nuestra región de estudio:

- Una mega Tierra con una masa de $9.74M_{\oplus}$ ubicado a 1.78UA.
- Una súpertierra que se ubica entre 2UA y 4UA con una masa de $6.51M_{\oplus}$.

En la Figura 6.22 observamos la remoción de cuerpos en función del tiempo. A los 250Ma sólo sobrevive el 16.2% de los planetesimales y el 24.44% de los embriones que se encontraban al iniciar la simulación. Los cuerpos pequeños fueron eyectados en un 50.6%, el 18.9% colisionaron con la estrella central y el 14.3% fueron acretados. Para los embriones el mecanismo de remoción más efectivo fue la acreción donde 28 cuerpos fueron acretados. Un embrión colisionó con la estrella central y 5 fueron eyectados fuera del sistema.

En el esquema de la Figura 6.23 podemos apreciar la historia colisional del cuerpo más masivo, en el que se puede ver que la última colisión con un embrión se produjo aproximadamente a los 60Ma. Sin embargo si comparamos con el gráfico de evolución temporal de la masa de este cuerpo, Figura 6.24, observamos que la última gran colisión donde se aportó el 41% de su masa sucedió al comienzo de su evolución, a los 0.57Ma.

El planeta más masivo del sistema se encuentra inmediatamente después de la zona de habitabilidad, si lo comparamos con el planeta más interno podemos observar en la Figura 6.25 que las excentricidades e inclinaciones del planeta más masivo se ven amortiguadas mientras que las del planeta menos masivo varían ampliamente. Como mostramos en la Tabla 6.11 las excentricidades medias e inclinaciones para el planeta más masivo (N°41) son 0.15 y 4.89° respectivamente, mientras que para el planeta menos masivo (N°22) son de 0.52 y 20.47° .

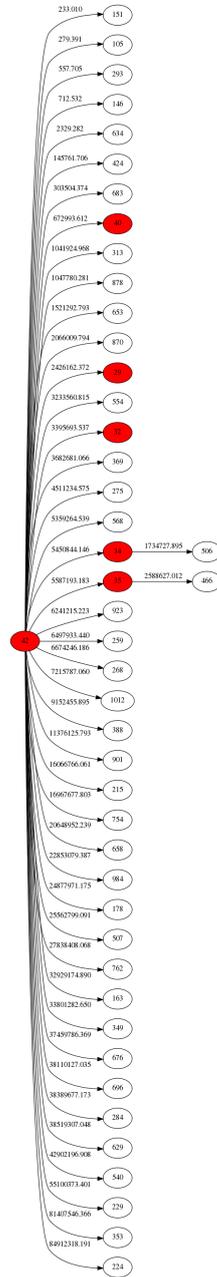


Figura 6.16. Esquema de la historia colisional del planeta ubicado en la zona habitable de la Simulación N°1 del disco de $0.1M_{\odot}$. Los círculos rojos representan los embriones y los círculos blancos los planetesimales.

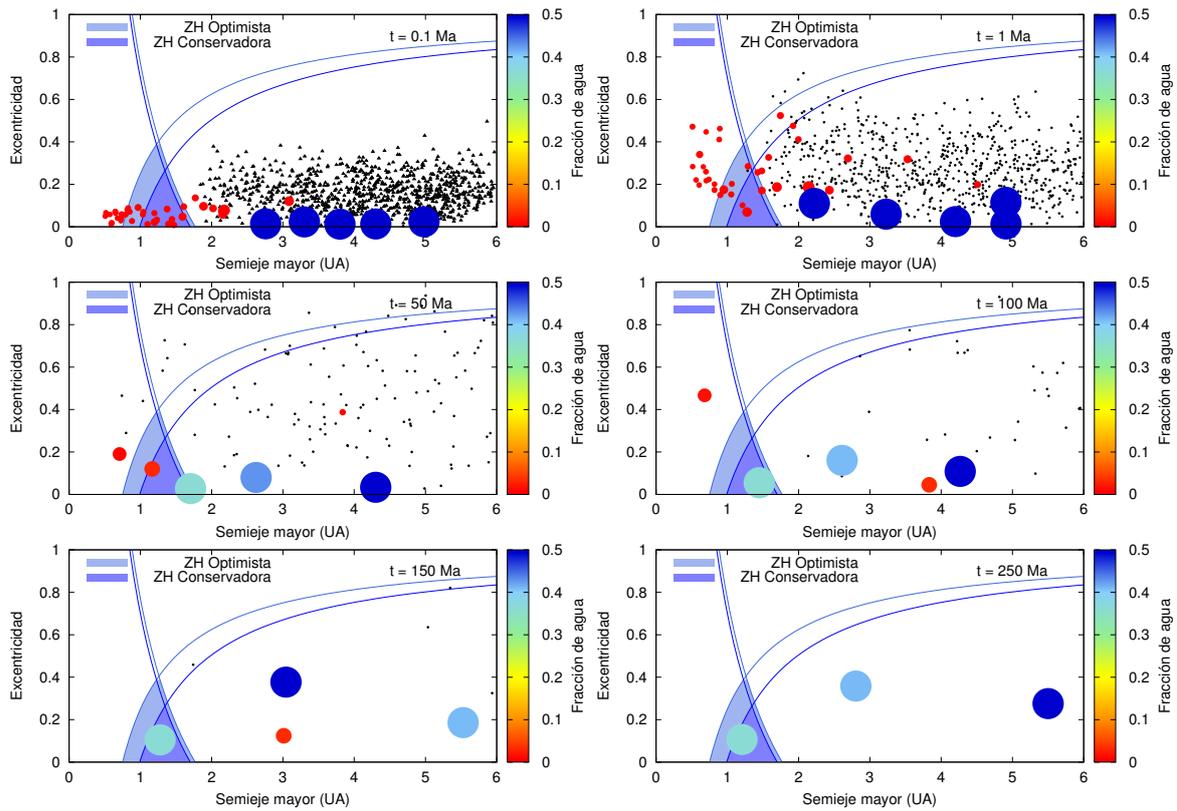


Figura 6.17. Evolución temporal de la Simulación N°2 del disco de $0.1M_{\odot}$. Los puntos negros representan a los planetesimales, los círculos llenos representan a los embriones, y las variaciones de colores indican el porcentaje de agua de los mismos. Las regiones coloreadas son las Zonas de Habitabilidad, donde definimos una Conservadora y una Optimista. Las curvas de afelio y perihelio constantes son graficadas con colores celeste y azul, y están asociadas a los límites internos y externos de las Zonas Habitables Conservadora y Optimista. A los 250Ma se encuentra un mundo de agua en la Zona Habitable (N°41) ubicado a 1.46UA con una masa de $9.74M_{\oplus}$ y 44.64% de agua.

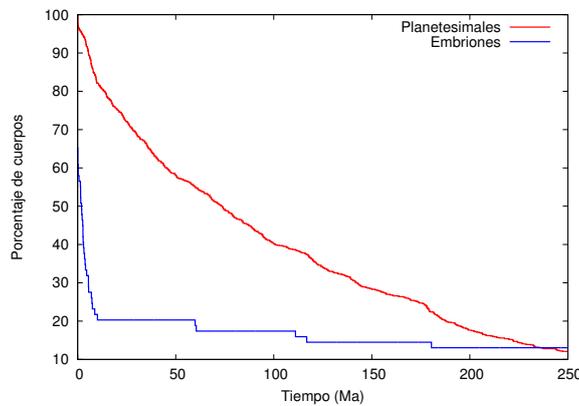


Figura 6.18. Porcentajes de planetesimales y embriones en función del tiempo. Gráfico correspondiente a la Simulación N°2 del disco de $0.1M_{\odot}$

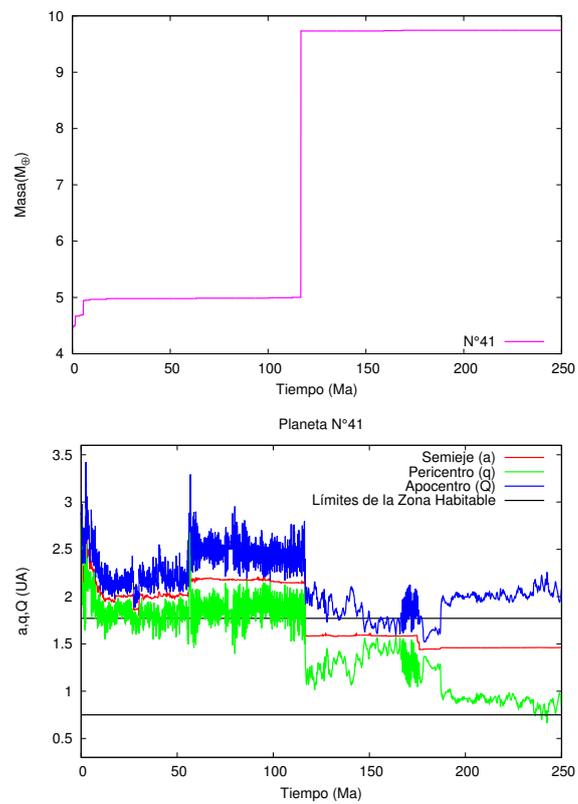


Figura 6.19. Evolución en el tiempo de la órbita y la masa del planeta que se ubica dentro de la zona de habitabilidad (N°41) para la Simulación N°2 del disco de $0.1M_{\odot}$

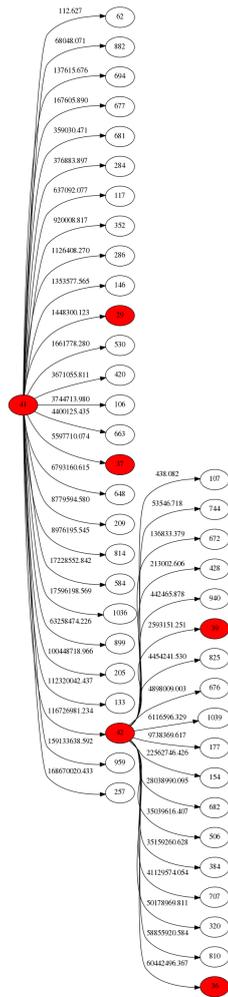


Figura 6.20. Esquema de la historia colisional del planeta ubicado en la zona habitable (Nº41) de la Simulación Nº2 del disco de $0.1M_{\odot}$. Los círculos rojos representan los embriones y los círculos blancos los planetesimales.

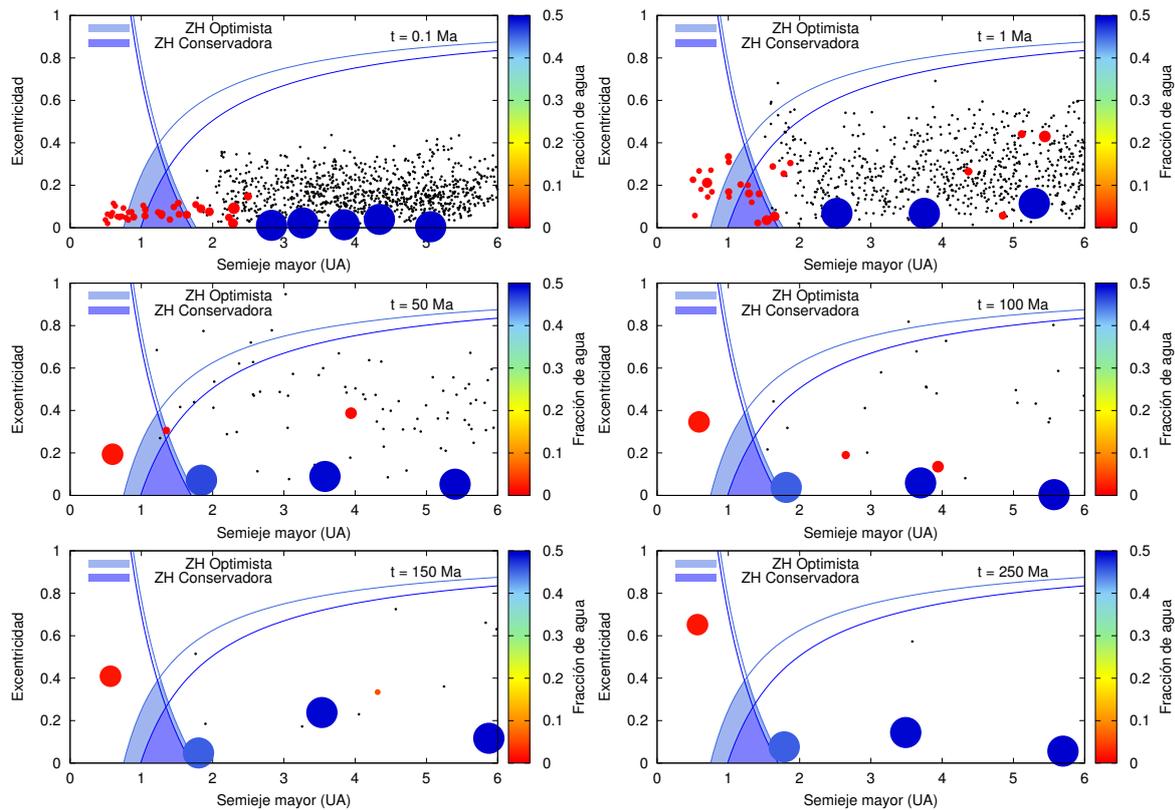


Figura 6.21. Evolución temporal de la Simulación N°2 del disco de $0.1M_{\odot}$. Los puntos negros representan a los planetesimales, los círculos llenos representan a los embriones, y las variaciones de colores indican el porcentaje de agua de los mismos. Las regiones coloreadas son las Zonas de Habitabilidad, donde definimos una Conservadora y una Optimista. Las curvas de afelio y perihelio constantes son graficadas con colores celeste y azul, y están asociadas a los límites internos y externos de las Zonas Habitables Conservadora y Optimista. La Zona Habitable se encuentra despoblada.

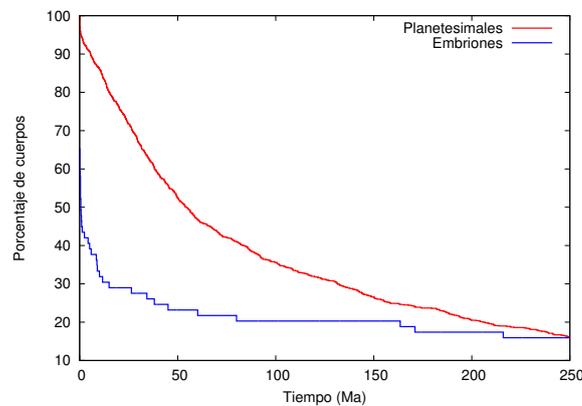


Figura 6.22. Porcentajes de planetesimales y embriones a medida que el sistema evoluciona para la Simulación N°3 del disco de $0.1M_{\odot}$

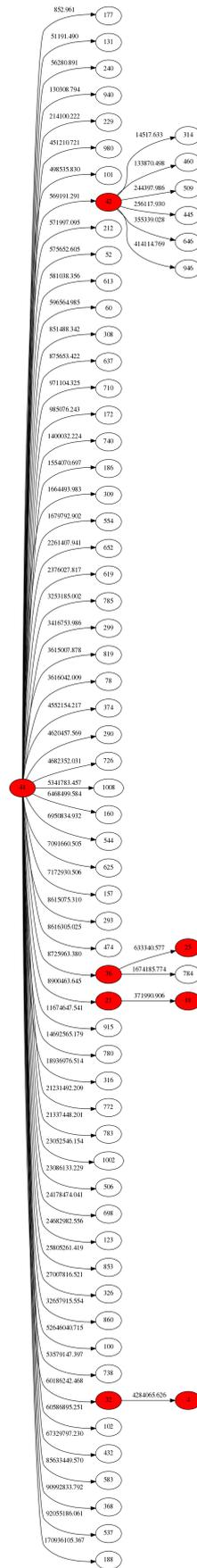


Figura 6.23. Esquema de la historia colisional del planeta más masivo (N°41) de la Simulación N°3 del disco de $0.1M_{\odot}$. Los círculos rojos representan los embriones y los círculos blancos los planetesimales.

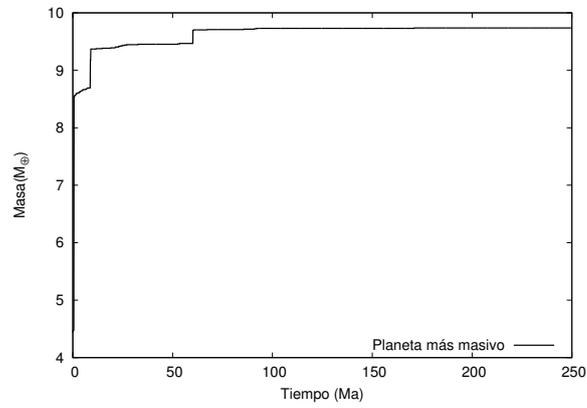


Figura 6.24. Evolución temporal de la masa del planeta más masivo (N°41) de la Simulación N°3 del disco de $0.1M_{\odot}$

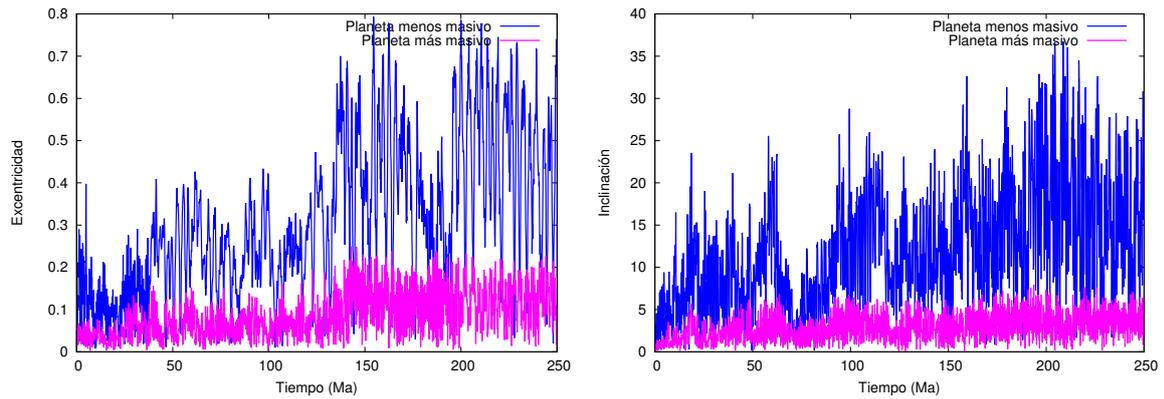


Figura 6.25. Evolución en el tiempo de las excentricidades e inclinaciones de los planetas más y menos masivos (N°41 y N°22) de la Simulación N°3 del disco de $0.1M_{\odot}$.

Capítulo 7

Conclusiones

Durante este trabajo estudiamos la formación de sistemas planetarios sin gigantes gaseosos alrededor de estrellas tipo solar, asumiendo diferentes escalas de tiempo para la disipación de la componente gaseosa. Para desarrollar un análisis detallado de estos escenarios, realizamos nuestra investigación asumiendo tres diferentes escalas de tiempo τ asociadas a la disipación de la componente gaseosa del disco. Los valores seleccionados para τ fueron de 1.5Ma, 2.5Ma y 5Ma; lo cual es consistente con estudios observacionales de discos protoplanetarios (Mamajek 2009). Para seleccionar la masa de los discos de trabajo, realizamos un estudio minucioso con el fin de determinar la masa de los discos que llevan a la formación de Tierras, súper Tierras o mega Tierras, pero no gigantes gaseosos, para cada valor de τ seleccionado. Nuestra investigación indica que, con nuestros parámetros de trabajo, discos de $0.05M_{\odot}$ y $0.1M_{\odot}$ son adecuados para cualquiera de los valores de τ propuestos.

Una vez definida la masa de los discos de este trabajo cada uno de los mismos fue evolucionando durante la fase gaseosa utilizando un modelo semianalítico desarrollado por Brunini & Benvenuto (2008) con modificaciones de Guilera et al. (2010). Este modelo nos permitió calcular las distribuciones de embriones y planetesimales, para cada disco, al momento que el gas se disipó por completo para cada uno de los valores de disipación τ propuestos.

Una vez determinadas estas distribuciones para cada masa de disco y cada valor de τ , las mismas fueron usadas como condiciones iniciales para el desarrollo de simulaciones de N-cuerpos, para lo cual se utilizó el código MERCURY (Chambers 1999). En particular, debido a la naturaleza estocástica del proceso de acreción, para cada masa de disco y cada valor propuesto para el tiempo de disipación del gas, realizamos tres simulaciones de N-cuerpos.

En principio podemos ver una correlación entre el tiempo de disipación de la componente gaseosa y la distribución de sólidos al finalizar la etapa gaseosa. Efectivamente cuanto mayor es el valor de τ , mayor es la masa distribuída en embriones y menos masiva es la población de planetesimales al momento que el gas se disipa por completo.

Encontramos una correlación entre el tiempo de disipación de la componente gaseosa y la masa de los planetas formados en las simulaciones. Observamos que para un mismo tiempo de disipación, los planetas formados al finalizar las simulaciones de N-cuerpos son más masivos para discos de mayor masa. A su vez, si fijamos la masa del disco, la masa de los planetas que se forman aumenta para tiempos de disipación mayores.

Para el disco de $0.05M_{\odot}$ con un tiempo de disipación de 1.5Ma, se formaron sistemas que presentaron tierras entre $1.04M_{\oplus}$ y $1.69M_{\oplus}$ con porcentajes de agua entre 19% y 25.29% coexistiendo con mundos de agua entre $0.69M_{\oplus}$ y $1.15M_{\oplus}$ con más del 30% de agua dentro de la zona de habitabilidad. El contenido de agua final de estos planetas se debe a la acreción de planetesimales originarios de la región externa del disco. Además entre 2UA y 4UA se encontraron planetas con masas entre $0.3M_{\oplus}$ y $1.61M_{\oplus}$.

Aumentando el tiempo de disipación a 2.5Ma, observamos que para la misma masa de disco, los sistemas presentan, en la zona habitable, tierras con masas entre $0.92M_{\oplus}$ y $1.52M_{\oplus}$, y sus porcentajes de agua varían entre 11.67% y 23.78%. También encontramos mundos de agua con masas entre 1.15 y $1.43M_{\oplus}$. En forma general el contenido de agua final de estos planetas fue aportado por planetesimales de la región externa del disco, excepto en el caso de uno de los mundos de agua formados en las simulaciones en el que el aporte de agua de embriones es igual de importante que el de planetesimales porcentualmente. En la región más externa del disco hallamos tierras y súper tierras con masas variando entre 0.8 y $3.05M_{\oplus}$.

Si volvemos a aumentar el tiempo de disipación a 5Ma vemos que en la zona habitable de los sistemas formados para este disco se encuentran planetas con masas entre 0.32 y $0.62M_{\oplus}$ con porcentajes de agua menores al 10%, coexistiendo con mundos de agua de masas menores a $3M_{\oplus}$. El contenido de agua de estos planetas proviene en general de planetesimales de la región externa del disco. Los planetas que se ubican entre 2 y 4UA tienen masas que llegan hasta $3.15M_{\oplus}$.

Notamos una correlación entre el tiempo de disipación de la componente gaseosa y el porcentaje de agua del planeta más interno de la zona de habitabilidad. Efectivamente a mayor tiempo de disipación τ menor es el porcentaje de agua contenido en estos planetas. Notamos que, para este disco de $0.05M_{\odot}$, al aumentar el tiempo de disipación del gas el planeta más interno que se ubica en la zona de habitabilidad disminuye su porcentaje de agua.

Los resultados para el disco de $0.1M_{\odot}$ se describen a continuación.

Para el menor tiempo de disipación adoptado, se encontraron en la zona habitable tanto mundo de agua con masas entre 3.1 y $4.49M_{\oplus}$ como una tierra de $2.23M_{\oplus}$ con un 13.25% de agua. La cantidad de agua que posee este último planeta se debe en su mayor parte a la acreción de planetesimales. Mientras que para los mundos de agua es el aporte de agua de embriones es tan importante como el de planetesimales. En la región externa se encuentran tierras y súper tierras con masas desde $0.15M_{\oplus}$ hasta $4.42M_{\oplus}$.

Para un tiempo de disipación mayor de 2.5Ma ya no se forman planetas con bajos porcentajes de agua en la zona habitable sino mundos de agua con masas entre 3.7 y $4.2M_{\oplus}$. El contenido de agua de los mundos de agua proviene en su mayoría de embriones planetarios. Además en la región externa se encuentran súper tierras con masas de entre 2.96 y $5.87M_{\oplus}$.

El último escenario, con un tiempo de disipación de 5Ma presentó en cada simulación una configuración final distinta. En la primera simulación observamos un escenario parecido a los que se presentaban para un tiempo de disipación menor, con un mundo de agua en la zona de habitabilidad y una súper tierra entre 2 y 4UA. En la segunda simulación el sistema presenta un solo planeta que se ubica en la zona habitable al que llamamos mega Tierra ya que posee una masa cercana a $10M_{\oplus}$. En el último escenario encontramos una mega Tierra ubicada entre el límite superior de la zona de habitabilidad y 2UA, que impidió la formación de planetas dentro de la región habitable.

En resumen para este disco la probabilidad de encontrar planetas con bajos porcentajes de agua en la zona habitable disminuye con el aumento del tiempo de disipación, al contrario de lo que sucedía para el disco de $0.05M_{\odot}$.

Nuestras simulaciones forman dos clases diferentes de planetas en la zona habitable de los sistemas bajo consideración. Por un lado, planetas que se formaron “in situ” y acrecieron sus contenidos finales de agua a partir de impactos de embriones y planetesimales provenientes del disco externo. Por otro lado, mundos de agua, los cuales se formaron más allá de la línea de hielo y luego de sucesivas migraciones culminaron en la zona habitable. Los mundos de agua también sufrieron impactos por parte de embriones y planetesimales ricos en volátiles, pero a diferencia de los formados “in situ”, muestran un contenido de agua primordial significativo.

En términos porcentuales, los planetas formados "in situ" muestran entre un 8 % y un 25 % de su masa en agua al final de las simulaciones, mientras que los mundos de agua poseen entre un 21 % y un 50 %. Vale la pena destacar que nuestras simulaciones son desarrolladas asumiendo colisiones perfectamente inelásticas las cuales conservan la masa y el contenido de agua de los cuerpos interactuantes. Como en consecuencia de esto, los porcentajes de agua obtenidos en nuestra investigación deben ser considerados como límites superiores.

Entre estas dos clases de planetas formados en la zona habitable del sistema, aquellos formados "in situ" resultan ser de mayor interés según nuestra consideración. En efecto, en términos generales, el proceso de formación de estos planetas resulta ser similar a "nuestra Tierra", la cual se estima que posee un contenido de agua de aproximadamente entre 0.1 % y 0.2 % (Lécuyer y Gillet, 1998; Marty, 2012). Teniendo en cuenta este contenido porcentual de agua asociado a nuestro planeta, estamos particularmente interesados en aquellos planetas formados "in situ" en la zona habitable de nuestros sistemas, con los menores porcentajes de agua, los cuales llegan al 8 %. Nuestras simulaciones indican que estos planetas de particular interés coexisten con súper tierras de 2 a 3 M_{\oplus} ubicadas en las regiones externas del disco alrededor de la línea de hielo. Creemos que este resultado tiene un interés significativo y puede brindar un aporte enriquecedor en lo que respecta a la búsqueda de exoplanetas. De acuerdo con esto, aquellas estrellas de masa solar que alberguen super tierras de 2 a 3 M_{\oplus} ubicadas entre 2UA y 4UA deberían ser tomadas como blancos potenciales de interés astrobiológico.

7.1. Comparación con las observaciones

La técnica de tránsitos para detectar planetas extrasolares consiste en observar el brillo proveniente de una estrella para medir sus variaciones debido al paso de un planeta frente a ella, como muestra el esquema de la Figura 7.1. Vemos que el brillo disminuye cuando el planeta pasa frente a su estrella anfitriona. Para detectar un planeta se deben observar estas variaciones en períodos regulares.

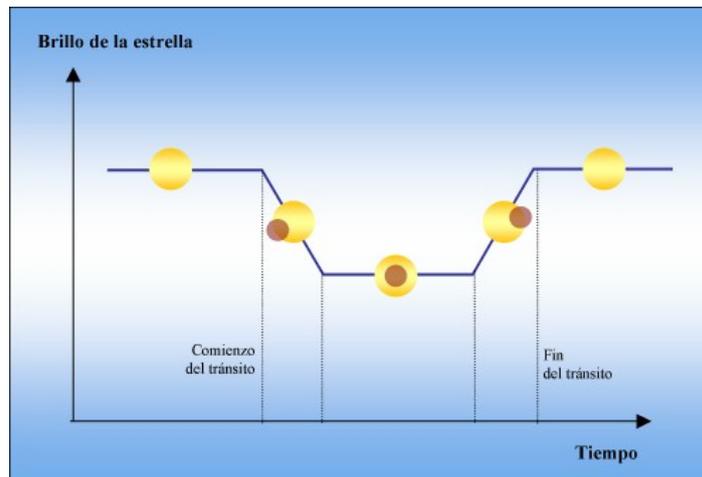


Figura 7.1. Esquema representativo de la técnica de tránsito de un planeta.

En la Figura 7.2 presentamos los planetas confirmados y los que aún son candidatos detectados por la Misión Kepler mediante la técnica de tránsitos. Los recuadros de color amarillo y rojo corresponden a los planetas formados en nuestras simulaciones ubicados en la zona de habitabilidad para los discos de $0.05M_{\odot}$ y $0.1M_{\odot}$ respectivamente.

Podemos observar que se encuentran planetas dentro de los rangos de los planetas que hemos simulado para el disco más masivo. El candidato posee un tamaño de 2 veces el terrestre

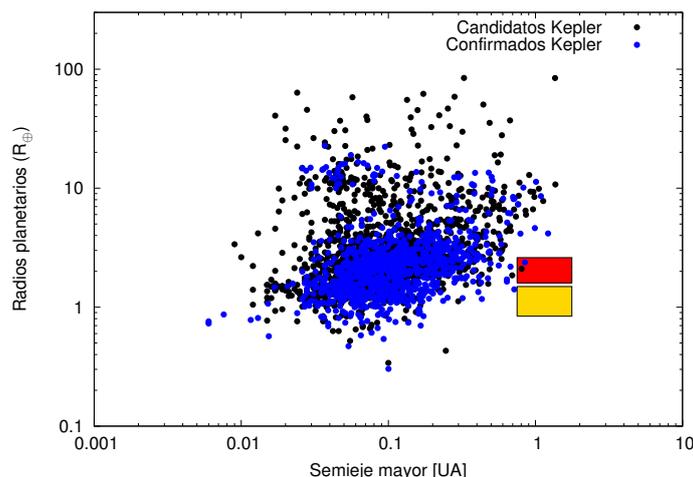


Figura 7.2. Planetas confirmados y candidatos de la Misión Kepler. Los recuadros de color amarillo y rojo corresponden a los planetas formados en nuestras simulaciones ubicados en la zona de habitabilidad para los discos de $0.05M_{\odot}$ y $0.1M_{\odot}$ respectivamente.

y un semieje de 0.805UA con una estrella similar al Sol, mientras que el planeta confirmado llamado Kepler-22b es 2.4 veces más grande que la Tierra, con una estrella tipo solar y un semieje de 0.849UA pero no hay pruebas suficientes como para afirmar que este planeta sea rocoso.

La técnica de Microlente Gravitatorio se utiliza para detectar planetas con órbitas extendidas, a través de la perturbación que generan sobre la luz emitida por una estrella fuente como indica la Figura 7.3.

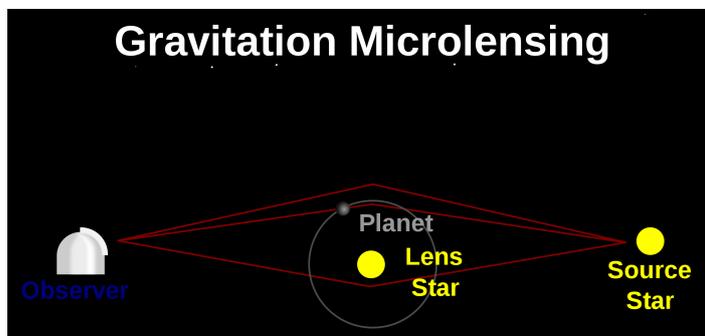


Figura 7.3. Esquema representativo de la Técnica de Microlente Gravitatorio.

En la actualidad esta técnica ha permitido descubrir 34 planetas, presentamos su distribución en el gráfico semieje vs. masa de la Figura 7.4. El recuadro de color verde corresponde a los planetas formados entre 2 y 4UA que se formaron en nuestras simulaciones.

Podemos observar que se ha detectado un planeta con la técnica de microlentes con características similares, en cuanto a semieje y masa, a los planetas de nuestras simulaciones. Sin embargo estas comparaciones deben realizarse con sumo cuidado ya que este planeta OGLE-05-390L b, orbita alrededor de una estrella de tipo espectral M con una masa de $0.22M_{\odot}$, a diferencia de los encontrados en nuestras simulaciones los cuales orbitan alrededor de una estrella tipo solar.

En un futuro la técnica de microlentes permitirá detectar planetas con masas del orden de $0.01M_{\oplus}$ cerca de la línea de hielo como se puede apreciar en la Figura 7.5. Esto será llevado a cabo por el Korean Microlensing Telescope Network (KMTNet; Poteet et al., 2012) y la

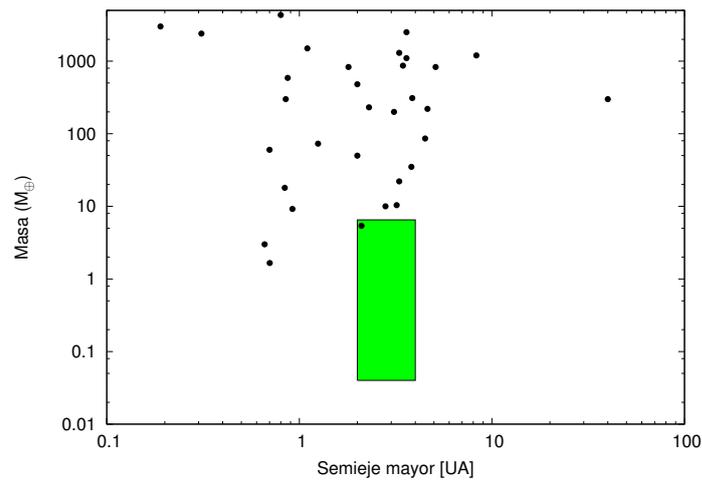


Figura 7.4. Distribución de los 32 planetas detectados con la técnica de Micro lente Gravitatorio. La región en verde representa los planetas formados entre 2UA y 4UA en nuestras simulaciones.

Wide-Field InfraRed Survey Telescope (WFIRST; Green et al., 2011) y esperamos que se encuentren planetas en los rangos encontrados en nuestras simulaciones.

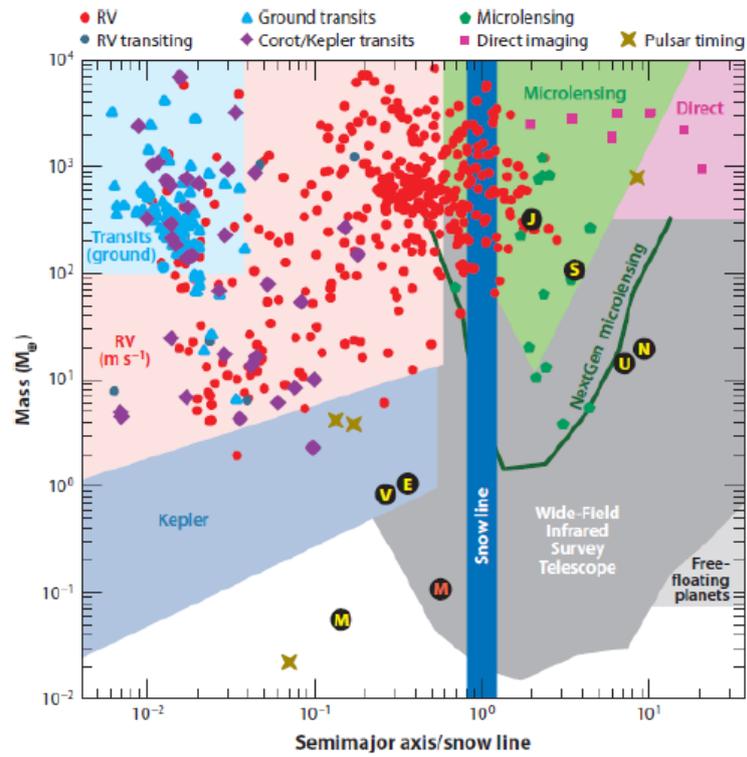


Figura 7.5. Figura extraída del trabajo del review realizado por Gaudi (2012), con la distribución actual de detección de exoplanetas donde se muestran los avances en la técnica de microlentes.

Bibliografía

- Y. Abe, E. Ohtani, T. Okuchi, K. Righter, y M. Drake. *Water in the Early Earth*, pages 413–433. 2000.
- S. M. Andrews, D. J. Wilner, A. M. Hughes, C. Qi, y C. P. Dullemond. Protoplanetary Disk Structures in Ophiuchus. , 700:1502–1523, August 2009. doi: 10.1088/0004-637X/700/2/1502.
- S. M. Andrews, D. J. Wilner, A. M. Hughes, C. Qi, y C. P. Dullemond. Protoplanetary Disk Structures in Ophiuchus. II. Extension to Fainter Sources. , 723:1241–1254, November 2010a. doi: 10.1088/0004-637X/723/2/1241.
- S. M. Andrews, D. J. Wilner, A. M. Hughes, C. Qi, y C. P. Dullemond. Protoplanetary Disk Structures in Ophiuchus. II. Extension to Fainter Sources. , 723:1241–1254, November 2010b. doi: 10.1088/0004-637X/723/2/1241.
- A. Brunini y O. G. Benvenuto. On oligarchic growth of planets in protoplanetary disks. , 194:800–810, April 2008. doi: 10.1016/j.icarus.2007.11.013.
- J. E. Chambers. A hybrid symplectic integrator that permits close encounters between massive bodies. , 304:793–799, April 1999. doi: 10.1046/j.1365-8711.1999.02379.x.
- J. E. Chambers. Making More Terrestrial Planets. , 152:205–224, August 2001. doi: 10.1006/icar.2001.6639.
- A. Cumming, R. P. Butler, G. W. Marcy, S. S. Vogt, J. T. Wright, y D. A. Fischer. The Keck Planet Search: Detectability and the Minimum Mass and Orbital Period Distribution of Extrasolar Planets. , 120:531–554, May 2008. doi: 10.1086/588487.
- N. Dauphas y A. Pourmand. Hf-W-Th evidence for rapid growth of Mars and its status as a planetary embryo. , 473:489–492, May 2011. doi: 10.1038/nature10077.
- G. C. de Elía, O. M. Guilera, y A. Brunini. Terrestrial planets in high-mass disks without gas giants. , 557:A42, September 2013. doi: 10.1051/0004-6361/201321304.
- J. Green, P. Schechter, C. Baltay, R. Bean, D. Bennett, R. Brown, C. Conselice, M. Donahue, S. Gaudi, T. Lauer, S. Perlmutter, B. Rauscher, J. Rhodes, T. Roellig, D. Stern, T. Sumi, A. Tanner, Y. Wang, E. Wright, N. Gehrels, R. Sambruna, y W. Traub. Wide-Field InfraRed Survey Telescope (WFIRST) Interim Report. *ArXiv e-prints*, August 2011.
- O. M. Guilera, A. Brunini, y O. G. Benvenuto. Consequences of the simultaneous formation of giant planets by the core accretion mechanism. , 521:A50, October 2010. doi: 10.1051/0004-6361/201014365.

- M. Hasegawa y K. Nakazawa. Distant encounter between Keplerian particles. , 227:619–627, January 1990.
- C. Hayashi. Structure of the Solar Nebula, Growth and Decay of Magnetic Fields and Effects of Magnetic and Turbulent Viscosities on the Nebula. *Progress of Theoretical Physics Supplement*, 70:35–53, 1981. doi: 10.1143/PTPS.70.35.
- S. Inaba, H. Tanaka, K. Nakazawa, G. W. Wetherill, y E. Kokubo. High-Accuracy Statistical Simulation of Planetary Accretion: II. Comparison with N-Body Simulation. , 149:235–250, January 2001. doi: 10.1006/icar.2000.6533.
- J. F. Kasting, D. P. Whitmire, y R. T. Reynolds. Habitable Zones around Main Sequence Stars. , 101:108–128, January 1993. doi: 10.1006/icar.1993.1010.
- E. Kokubo y S. Ida. On Runaway Growth of Planetesimals. , 123:180–191, September 1996. doi: 10.1006/icar.1996.0148.
- E. Kokubo y S. Ida. Oligarchic Growth of Protoplanets. , 131:171–178, January 1998. doi: 10.1006/icar.1997.5840.
- E. Kokubo y S. Ida. Formation of Protoplanets from Planetesimals in the Solar Nebula. , 143:15–27, January 2000. doi: 10.1006/icar.1999.6237.
- R. K. Kopparapu, R. Ramirez, J. F. Kasting, V. Eymet, T. D. Robinson, S. Mahadevan, R. C. Terrien, S. Domagal-Goldman, V. Meadows, y R. Deshpande. Habitable Zones around Main-sequence Stars: New Estimates. , 765:131, March 2013. doi: 10.1088/0004-637X/765/2/131.
- D. Lynden-Bell y J. E. Pringle. The evolution of viscous discs and the origin of the nebular variables. , 168:603–637, September 1974.
- C. Lécuyer y F. Gillet, P. and Robert. The hydrogen isotope composition of seawater and the global water cycle. *Chem. Geol.*, 145:249–261, April 1998.
- E. E. Mamajek. Initial Conditions of Planet Formation: Lifetimes of Primordial Disks. In T. Usuda, M. Tamura, y M. Ishii, editors, *American Institute of Physics Conference Series*, volume 1158 of *American Institute of Physics Conference Series*, pages 3–10, August 2009. doi: 10.1063/1.3215910.
- B. Marty. The origins and concentrations of water, carbon, nitrogen and noble gases on Earth. *Earth and Planetary Science Letters*, 313:56–66, January 2012. doi: 10.1016/j.epsl.2011.10.040.
- M. Mayor y D. Queloz. From 51 Peg to Earth-type planets. , 56:19–24, January 2012. doi: 10.1016/j.newar.2011.06.005.
- Y. Miguel, O. M. Guilera, y A. Brunini. The diversity of planetary system architectures: contrasting theory with observations. , 417:314–332, October 2011. doi: 10.1111/j.1365-2966.2011.19264.x.
- C. Mordasini, Y. Alibert, W. Benz, y D. Naef. Extrasolar planet population synthesis. II. Statistical comparison with observations. , 501:1161–1184, July 2009. doi: 10.1051/0004-6361/200810697.

- W. M. Poteet, H. K. Cauthen, N. Kappler, L. G. Kappler, B.-G. Park, C.-U. Lee, S.-L. Kim, y S.-M. Cha. Design and fabrication of three 1.6-meter telescopes for the Korea Microlensing Telescope Network (KMTNet). In *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, volume 8444 of *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, September 2012. doi: 10.1117/12.925849.
- S. N. Raymond, T. Quinn, y J. I. Lunine. High-resolution simulations of the final assembly of Earth-like planets I. Terrestrial accretion and dynamics. , 183:265–282, August 2006. doi: 10.1016/j.icarus.2006.03.011.
- M. Touboul, T. Kleine, B. Bourdon, H. Palme, y R. Wieler. Late formation and prolonged differentiation of the Moon inferred from W isotopes in lunar metals. , 450:1206–1209, December 2007. doi: 10.1038/nature06428.