



Origen de la bimodalidad de radios de los planetas Kepler desde una perspectiva de formación y evolución planetaria

O.M. Guilera^{1,2,3}

¹ Grupo de Astrofísica Planetaria, Instituto de Astrofísica de La Plata, CONICET-UNLP, Argentina

² Instituto de Astrofísica, Pontificia Universidad Católica de Chile

³ Núcleo Milenio de Formación Planetaria, Chile

Contacto / oguilera@fcaglp.unlp.edu.ar

Resumen / El estudio de la formación planetaria es uno de los tópicos principales de la astronomía moderna, especialmente desde el descubrimiento del primer exoplaneta alrededor de una estrella de tipo solar en 1995. Desde ese momento, y gracias principalmente a la misión *Kepler*, el número de exoplanetas descubiertos creció significativamente, y actualmente hay más de 4300 confirmados. Un análisis detallado sobre los planetas *Kepler* reveló que aquellos con períodos orbitales menores a 100 días presentan una distribución bimodal de tamaños, con máximos en $\sim 1.3 R_{\oplus}$ y $\sim 2.4 R_{\oplus}$. Estudios más recientes basados en observaciones mejor caracterizadas confirman esta bimodalidad, con el valle de radios en el rango $\sim 1.9 R_{\oplus} - 2 R_{\oplus}$. El valle puede explicarse por medio de mecanismos de pérdida de masa atmosférica, como la fotoevaporación o el calor latente del núcleo. Ambos modelos son capaces de reproducir la posición correcta del valle sólo si los núcleos desnudos resultantes de la pérdida de masa son de composición rocosa. Este resultado sugiere que la mayoría de los planetas *Kepler* con radios entre los de la Tierra y Neptuno acretaron solamente material seco y, por lo tanto, se formaron dentro de la posición de la línea de hielo. Sin embargo, este resultado está en contraposición con lo que obtienen los modelos de formación planetaria. Dichos modelos muestran que los embriones planetarios localizados inicialmente por detrás de la línea de hielo, con una composición de aproximadamente 50% rocas y 50% hielos, crecen y migran eficientemente hacia la zona interna del disco. La existencia de esta bimodalidad en la distribución de radios es actualmente una de las restricciones observacionales más importantes para comprender el origen y la composición de súper Tierras y mini Neptunos. En este artículo mostraremos cómo modelos globales de formación acoplados a modelos de evolución planetaria pueden darnos pistas sobre su origen y composición.

Abstract / The study of planet formation is one of the main topics of modern astronomy, especially since the discovery of the first exoplanet around a Solar-type star in 1995. From that moment, and thanks mainly to the *Kepler* mission, the number of discovered exoplanets has grown significantly and currently there are more than 4300 confirmed. A detailed analysis on the *Kepler* planets revealed that those with orbital periods lower than 100 days present a bimodal size distribution, with maximum values of $\sim 1.3 R_{\oplus}$ and $\sim 2.4 R_{\oplus}$. More recent studies based on better characterized observations confirm this bimodality, with the radius valley in the range of $\sim 1.9 R_{\oplus} - 2 R_{\oplus}$. The radius valley can be explained by means of atmospheric mass loss mechanisms, such as photoevaporation or core-powered. Both models are capable of reproducing the correct position of the valley only if the naked cores resulting from the mass loss mechanisms are rocky in composition. This result suggests that the majority of the *Kepler* planets with radii between those of the Earth and Neptune accreted only dry material and, therefore, formed inside the iceline. However, this is in contradiction with the results obtained from planet formation models. Such models show that planetary embryos initially located beyond the iceline, with a composition of about 50% silicates and 50% ices, efficiently grow and migrate towards the inner regions of the disk. The existence of this bimodality in the radii distribution is currently one of the principal observational constraints to understand the origin and composition of super-Earths and mini-Neptunes. In this manuscript we will show how global models of planet formation coupled with models of planetary evolution can give us insights about their origin and composition.

Keywords / planets and satellites: formation — planets and satellites: composition — planets and satellites: interiors

1. Introducción

La misión espacial *Kepler* reveló que uno de los tipos más comunes de exoplanetas, en torno a estrellas en la vecindad solar, son aquellos con un radio entre el de la Tierra y el de Neptuno (Batalha et al., 2013; Petigura et al., 2013) y con períodos orbitales menores a 100 días. Estos tipos de exoplanetas no existen en nuestro Sistema Solar y, en principio, podrían ser versiones más

grandes de nuestra Tierra, es decir planetas de tipo rocoso y usualmente llamados super Tierras, o versiones más pequeñas que los planetas gigantes helados (Urano y Neptuno) conocidos usualmente como mini Neptunos (ver Bean et al., 2021, para un reciente *review*).

Un segundo descubrimiento importante realizado por la misión *Kepler* fue el hallazgo de una distribución bimodal en tamaños para estos exoplanetas con períodos orbitales menores a los 100 días. Dicha distribución pre-

senta máximos en $\sim 1.3 R_{\oplus}$ y $\sim 2.4 R_{\oplus}$ y un valle en $\sim 2 R_{\oplus}$ (Fulton et al., 2017), siendo R_{\oplus} el radio de la Tierra. Es importante destacar que, originalmente, las propiedades fotométricas de las estrellas observadas por la misión *Kepler* poseían un error del $\sim 40\%$ en las estimaciones de los radios estelares (Brown et al., 2011). Sin embargo, análisis recientes de submuestras estelares mejor caracterizadas a partir de una combinación de espectroscopía, mejoras en las distancias estimadas utilizando la misión *Gaia* y modelos astrosismológicos, lograron mejorar las estimaciones de los radios estelares con errores de sólo un $\sim 5\%$ y lograron confirmar la distribución bimodal de tamaños, con máximos en $\sim 1.5 R_{\oplus}$ y $\sim 2.7 R_{\oplus}$ y el valle en $\sim 1.9 - 2 R_{\oplus}$ (Fulton & Petigura, 2018; Van Eylen et al., 2018; Martinez et al., 2019; Petigura, 2020). Más recientemente, Berger et al. (2020) mostraron que las posiciones de los máximos y del valle de la distribución dependen de la masa estelar, y que la razón entre el número de mini Neptunos y super Tierras depende de la edad estelar.

Los trabajos mencionados, todos observacionales, muestran que la distribución bimodal de tamaños de los planetas *Kepler* con períodos menores a 100 días es un resultado robusto. En este artículo discutiremos brevemente las diferentes propuestas que explican tal distribución de tamaños desde una perspectiva de formación y evolución planetaria.

2. La propuesta evolutiva

Las estimaciones mejoradas de los radios planetarios de los planetas *Kepler* confirmaron la distribución bimodal de tamaños de los planetas de corto período. Otro resultado observacional importante es que la posición en radios a la cual se encuentra el valle de la distribución depende del período orbital, disminuyendo a mayores períodos (usualmente se dice que dicha dependencia tiene una pendiente negativa, Van Eylen et al., 2018). Este resultado está relacionado con la irradiación estelar que reciben los planetas al estar cerca de las estrellas a las cuales orbitan; cuanto menor es el período orbital del planeta, mayor irradiación estelar recibe.

Actualmente existen dos modelos principales de pérdida de masa atmosférica capaces de reproducir el comportamiento bimodal de la distribución de tamaños. Por un lado tenemos los modelos de evolución planetaria que computan la evolución térmica del planeta una vez formado y que además incluyen la fotoevaporación debido a la estrella central (Owen & Wu, 2017; Jin & Morasini, 2018). Los otros modelos son los que computan la evolución térmica del planeta y que incluyen además el calor latente del núcleo (Ginzburg et al., 2018; Gupta & Schlichting, 2019).

En el caso de la fotoevaporación, si un planeta formado por un núcleo rocoso y una envoltura gaseosa de H y He de muy poca masa (menor a 1% de la masa total del planeta) está expuesto a la irradiación EUV y de rayos X de la estrella central, el H y He adquieren una velocidad térmica mayor que la velocidad de escape del planeta. Este proceso desencadena un escape hidrodinámico y, en una escala de tiempo de unos cientos de millones de años o giga años, el planeta pierde

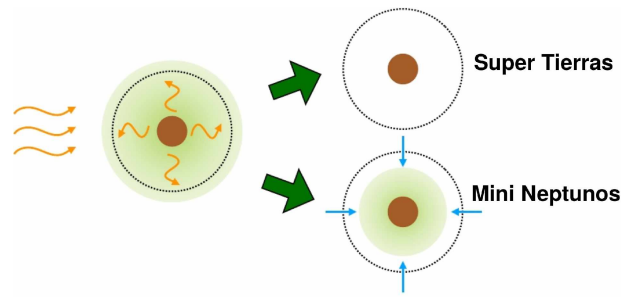


Figura 1: Esquema ilustrativo de los modelos evolutivos que explican la existencia de super Tierras y mini Neptunos. Aquellos planetas que a pesar del proceso de pérdida de masa atmosférica, ya sea por evaporación debido a la estrella central o por el calor latente en el núcleo, sean capaces de retener una pequeña fracción de sus envolturas, formarán el grupo de los mini Neptunos. Por otro lado, aquellos planetas que pierdan sus envolturas completamente formarán el grupo de las super Tierras. Figura cortesía de Julia Venturini.

toda su envoltura dejando únicamente un núcleo desnudo como remanente. Estos núcleos desnudos son los que formarían el grupo de las super Tierras y estarían ubicados cerca del primer máximo de la distribución bimodal. Owen & Wu (2017) mostraron que la escala de tiempo necesaria para perder la envoltura gaseosa debido a la fotoevaporación de la estrella central es mucho más larga si la envoltura representa $\sim 1 - 10\%$ de la masa total del planeta. Dado que la envoltura gaseosa aumenta considerablemente el radio del planeta, planetas con atmósferas más estables frente a la fotoevaporación constituirían el grupo de los mini Neptunos, y estarían ubicados cerca del segundo máximo de la distribución de tamaños. De manera análoga, en el caso de pérdida de la envoltura por el calor latente del núcleo, el calor del núcleo disipa las atmósferas de los planetas si éstas tienen menos masa que $M_{\text{atm}}/M_{\text{núcleo}} \sim 5\%$ (Ginzburg et al., 2018). Atmósferas con masas por encima de esta razón crítica tienden a contraerse, aumentando su energía de ligadura y haciendo que el proceso de pérdida de masa atmosférica sea más difícil. Por otro lado, las atmósferas con masa inicial por debajo del umbral se expanden, y cuanto menor es la energía de ligadura, más fácil resulta eliminar la atmósfera remanente. Es importante remarcar que se espera que ambos mecanismos ocurran simultáneamente (aunque posiblemente en escalas de tiempos distintas). Sin embargo, no existe actualmente un modelo que tenga en cuenta estos dos fenómenos al mismo tiempo. La Fig. 1 muestra un esquema ilustrativo para la formación de las super Tierras y los mini Neptunos.

Un resultado importante que comparten ambos modelos, es que para poder reproducir correctamente la posición del valle en la distribución de tamaños, los núcleos de los planetas tienen que tener una estructura interna similar a la de la Tierra, es decir, ser núcleos “rocosos” (Owen & Wu, 2017; Wu, 2019; Gupta & Schlichting, 2019). Los núcleos con contenidos más altos de volátiles (en general H_2O) generan que el valle de la distribución se corra a radios mayores (ver Fig. 2), lo cual está en contradicción con los datos observacionales. Además,

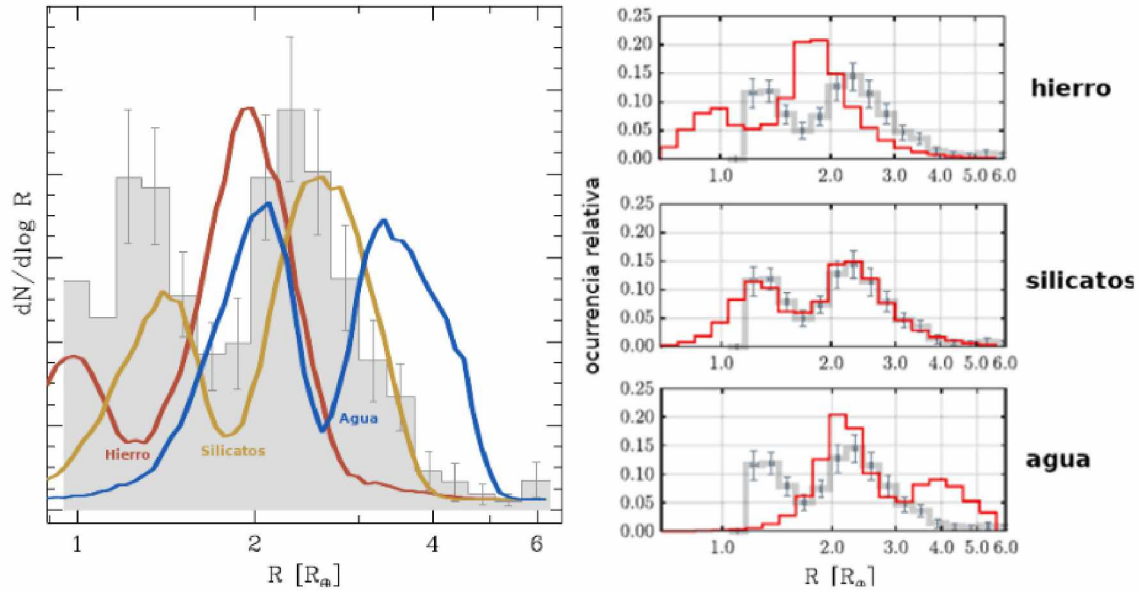


Figura 2: Panel izquierdo: las curvas de colores representan las distribuciones de radio predichas por los modelos evolutivos que incluyen fotoevaporación como función de las diferentes composiciones de núcleos. El histograma gris por detrás representa la distribución de radios observada (figura extraída y editada del trabajo de Owen & Wu, 2017). Panel derecho: las curvas rojas representan las distribuciones de radio predichas por los modelos evolutivos que incluyen el calor latente del núcleo para núcleos con diferentes composiciones. Los histogramas por detrás representan la distribución de radios observada (figura extraída y editada del trabajo de Gupta & Schlichting, 2019).

dado que el valle es una característica bien definida de la distribución, esto implica que no hay una gran dispersión en las composiciones de los núcleos, si no el valle debería rellenarse y perderse la naturaleza bimodal de la distribución de tamaños. Este resultado llevó a la comunidad a interpretar los resultados de los modelos evolutivos como un fuerte indicio de que los planetas de corto período se tuvieron que formar dentro de la línea de hielo* para que los mismos sean de composición similar a la terrestre.

Más recientemente, Rogers & Owen (2021) mostraron, a partir de un modelo estadístico, que si se asume que los planetas siguen una sola distribución de masas y composiciones, los modelos estadísticos que mejor reproducen las observaciones predicen una distribución de masa para los planetas con un máximo bien marcado en $\sim 4 M_{\oplus}$, con composiciones similares a la de la Tierra. Finalmente, dichos modelos también predicen que para poder reproducir las observaciones, la mayoría de los planetas debieron acretar una fracción muy pequeña de H y He, más precisamente tener una atmósfera con solamente el $\sim 4\%$ de la masa total del planeta.

A pesar de que, como mencionamos anteriormente, los modelos de fotoevaporación y del calor latente del núcleo son actualmente los más aceptados como los responsables de la distribución bimodal de tamaños de los planetas de corto período, algunas propuestas alternativas no deben perderse de vista. A partir de las relaciones masa – radio y de modelos de estructura interna, Zeng et al. (2019) mostraron que mientras los planetas

pertenecientes al primer pico de la distribución serían efectivamente planetas rocosos, el segundo máximo de la distribución podría asociarse a objetos ricos en agua. Sin embargo, el principal problema de asociar el segundo máximo con planetas ricos en agua es que no se puede explicar por qué tales planetas no rellenan el valle observado. Los modelos de estructura interna predicen que los núcleos que contienen una composición de 50% de roca y 50% de hielo deberían caer en el valle de la distribución si tuvieran una masa de entre $\sim 3 - 6 M_{\oplus}$ (Zeng et al., 2019; Haldemann et al., 2020). Zeng et al. (2019) mostraron que la distribución de tamaños de los planetas de corto período podría explicarse si se considera que los planetas ricos en agua siguen una distribución de masa similar a la sugerida por las mediciones obtenidas con el método de velocidades radiales, es decir, una distribución con masas entre $\sim 6 - 15 M_{\oplus}$, con un máximo en $\sim 9 M_{\oplus}$ (ver Fig. 2 de Zeng et al., 2019). Sin embargo, es importante mencionar que Zeng et al. (2019) no proponen ningún mecanismo por el cual los planetas ricos en agua podrían tener una distribución de masas diferente a la de los planetas rocosos.

3. Implicancias para los modelos de formación planetaria

Si efectivamente la mayoría de los exoplanetas de corto período tienen núcleos rocosos, como sugieren los modelos evolutivos, esto plantea un serio problema para los modelos de formación planetaria. Recordemos que actualmente existen dos modelos principales para la formación planetaria en el marco de la teoría con mayor consenso en la comunidad, que es la teoría de acreción del núcleo (ver Venturini et al., 2020a, para un *review*

*La línea de hielo es la posición en el disco protoplanetario a partir de la cual condensa el H_2O . Suele definirse como la posición en el disco en donde la temperatura del mismo comienza a ser menor que ~ 170 K.

reciente). El primer modelo propone que los núcleos de los planetas se forman por la acreción de planetesimales (Safronov, 1969; Pollack et al., 1996), objetos kilométricos cuya dinámica está prácticamente desacoplada de la del gas, mientras que el segundo propone que los núcleos se forman directamente por la acreción de *pebbles* (Ormel & Klahr, 2010; Lambrechts & Johansen, 2012), partículas con tamaños del orden del milímetro-centímetro cuya dinámica está fuertemente acoplada a la del disco de gas**.

En el caso de los modelos que consideran la formación planetaria por acreción de planetesimales, los trabajos muestran que la formación de super Tierras secas dentro de la línea de hielo es difícil (Ikoma & Hori, 2012; Bodenheimer & Lissauer, 2014), dado que usualmente no hay suficiente material sólido dentro de la misma para formar núcleos con suficiente masa como para acretar una envoltura significativa de H y He. De hecho, para poder formar super Tierras o mini Neptunos carentes de volátiles a cortos períodos orbitales por la acreción de planetesimales de 100 km de radio se necesitan discos de mucha masa (Bodenheimer et al., 2018). Por otro lado, modelos recientes de síntesis poblacional de formación planetaria son capaces de lograr la formación de super Tierras secas a partir de la acreción de planetesimales subkilométricos. Sin embargo, estos modelos encuentran que los planetas ricos en agua que comienzan su formación por detrás de la línea de hielo crecen y migran eficientemente, y finalizan su formación en la zona interna del disco con períodos orbitales menores a 100 días (Mordasini, 2018; Emsenhuber et al., 2020).

En el caso de los modelos que computan la formación planetaria a través de la acreción de *pebbles* (actualmente la gran mayoría), el problema es que sin la presencia de un planeta gigante en una órbita externa, o algún otro fenómeno que genere un máximo de presión y detenga la migración interna de las *pebbles*, las *pebbles* ricas en hielos pueden llegar a las regiones internas del disco contaminando con agua a los planetas ya formados. Incluso si la línea de hielo no alcanza las regiones internas del disco con períodos orbitales inferiores a los 100 días, los planetas ricos en hielos con masas menores a las $\sim 15 M_{\oplus}$ tienden a migrar de manera eficiente a las regiones internas del disco. Por lo tanto, al igual que en el caso de los modelos por acreción de planetesimales, estos planetas ricos en agua podrían formarse más allá de la línea de hielo, acretar cantidades considerables de agua y migrar hacia la región interna del disco (e.g. Izidoro et al., 2019; Bitsch et al., 2019). La principal diferencia del modelo de acreción de *pebbles* respecto al modelo de acreción de planetesimales, es que el primero predice la formación de super Tierras y mini Neptunos de manera más eficiente.

Alternativamente, las simulaciones de N cuerpos muestran que las super Tierras y los mini Neptunos, puede formarse como resultado de impactos gigantes entre los embriones rocosos en formación o ya formados (Raymond et al., 2018; Ogihara et al., 2018). Independientemente del mecanismo de formación de las super

Tierras y los mini Neptunos, hay dos problemas principales desde la perspectiva de la formación de los mismos. El primero es como evitar que los planetas ricos en hielos con masas entre $\sim 3 - 6 M_{\oplus}$ alcancen las regiones internas del disco y rellenen el valle observado en la distribución de tamaños. El segundo problema es como evitar que los núcleos con más masa acreten cantidades significativas de gas y entren en el régimen de crecimiento en fuga, y se transformen en planetas de tipo gigantes gaseosos (como Júpiter o Saturno).

3.1. Formación de super Tierras y mini Neptunos a partir de modelos globales de formación y evolución planetaria.

Recientemente, Lambrechts et al. (2019) y Ogihara & Hori (2020) estudiaron la formación de super Tierras y mini Neptunos dentro de la línea de hielo por acreción de *pebbles* e impactos gigantes entre embriones. Lambrechts et al. (2019) encontró que si el flujo de *pebbles* desde la zona externa del disco es bajo (menor a $\sim 190 M_{\oplus}$ en unos 3×10^6 años), los embriones crecen lento hasta alcanzar típicamente la masa de Marte y tienen una migración pequeña antes de la disipación del disco de gas. Una vez disipado el disco, las colisiones entre embriones producen super Tierras de a lo sumo unas $5 M_{\oplus}$. Por otro lado, si el flujo de *pebbles* es mayor al umbral antes mencionado, los embriones iniciales dentro de la línea de hielo crecen rápidamente y migran eficientemente acumulándose en el borde interno del disco de gas. Esto hace que el crecimiento de los mismos se acelere debido a las colisiones mutuas entre ellos. De esta manera se logra una formación eficiente de super Tierras en el rango de masas de entre $\sim 5-20 M_{\oplus}$, en donde la masa máxima esta delimitada por la masa de aislación de *pebbles* (Lambrechts et al., 2014). Sin embargo, este estudio no tiene en cuenta la acreción de gas por parte de los planetas. Por lo tanto, la viabilidad de formar planetas rocosos con masas mayores a $\sim 10M_{\oplus}$, con envolturas gaseosas de poca masa que podrían explicar el segundo máximo de la distribución de tamaños no es analizada en este trabajo.

A partir de un modelo similar al de Lambrechts et al. (2019), Ogihara & Hori (2020) computaron la formación de super Tierras y mini Neptunos pero teniendo en cuenta la acreción de gas y la pérdida de masa atmosférica por colisiones entre los embriones y la fotoevaporación debido a la estrella central después de la disipación del disco. Ellos también encontraron que las super Tierras con núcleos mayores a $5 M_{\oplus}$ se forman sólo en sistemas con un alto flujo de *pebbles* ($> 100 M_{\oplus}/10^6$ años). Sin embargo, encuentran que estos planetas tienden a tener envolturas con masas mayores al 10% de la masa total del planeta, y después de calcular la pérdida de masa atmosférica debido a la fotoevaporación, aun retienen envolturas con demasiada masa. De esta manera, obtienen planetas con radios demasiado grandes como para poder explicar el segundo máximo de la distribución de tamaño. Más recientemente, Ogihara et al. (2020) mostraron que la acreción de gas por parte de los planetas puede disminuir si se tiene en cuenta un modelo más

**Actualmente, algunos autores proponen una teoría híbrida entre ambos modelos (Alibert et al., 2018; Venturini & Helled, 2020; Guilera et al., 2020).

realista para la evolución del disco de gas. Por ende, el mecanismo de acreción de gas de los planetas rocosos que retienen algo de H y He para poder explicar el segundo máximo de la distribución de tamaños es también una cuestión muy importante a incluir en los modelos. Es importante remarcar que tanto el trabajo de Lambrechts et al. (2019) como los de Ogihara & Hori (2020) y Ogihara et al. (2020) consideran dos simplificaciones importantes: utilizan el mismo número de Stokes fijo para las *pebbles* a lo largo del disco (el cual está relacionado con el tamaño de las mismas) y toman el flujo de *pebbles* al inicio de las simulaciones como un parámetro libre. Además, en vez de resolver la evolución de las *pebbles* en el disco, consideran por simplicidad que el flujo de las mismas decae exponencialmente en el tiempo. Por lo tanto, no está claro si los altos valores del flujo necesarios para producir super Tierras de $\sim 10 M_{\oplus}$ podrán ocurrir cuando se compute de manera más realista la evolución conjunta del disco de gas y polvo.

A partir de esta necesidad, realizamos un serie de trabajos (Venturini et al., 2020b,c) en donde incorporamos la evolución y el crecimiento del polvo en PLANETALP, nuestro modelo global de formación planetaria (Ronco et al., 2017; Guilera et al., 2019), y la formación de los planetas a partir de la acreción de *pebbles*. Es decir, ahora nuestro modelo computa la formación de un planeta inmerso en un disco de gas por la acreción simultánea de sólidos (*pebbles*) y gas. Los planetas migran dentro del disco teniendo en cuenta los torques clásicos de Lindblad y corrotación para discos no isotermos y los torques térmicos debido al calor liberado por el planeta. El disco de gas evoluciona como un disco de acreción sujeto a la fotoevaporación de la estrella central. El polvo en el disco evoluciona por el decaimiento radial debido a la fricción y difusión del gas, y su crecimiento está limitado por la fragmentación y la migración radial del mismo. De esta manera, la evolución temporal del flujo de *pebbles* y los tamaños de las mismas (o los números de Stokes, importantes para computar la acreción de los planetas) se computan de manera autoconsistente. Una propiedad importante incluida en nuestros trabajos es que consideramos que las *pebbles* ricas en hielo (que se encuentran por detrás de la línea de hielo) y las *pebbles* de silicatos (que se encuentran por dentro) tienen propiedades distintas de coagulación. Siguiendo los experimentos de laboratorio de Gundlach & Blum (2015), adoptamos que las *pebbles* ricas en hielo fragmentan a velocidades de 10 m s^{-1} , mientras que las *pebbles* de silicatos lo hacen a velocidades de 1 m s^{-1} . Adicionalmente, consideramos que las *pebbles* que cruzan la línea de hielo subliman sus volátiles, que en este trabajo representan el 50% de su masa, es decir, detrás de la línea de hielo el sólido está compuesto por 50% de material rocoso y 50% de hielo de agua. Finalmente, también incluimos la pérdida de masa atmosférica por fotoevaporación debido a la estrella central una vez disipado el disco de gas durante 5×10^9 años utilizando el modelo desarrollado por Mordasini (2020).

En nuestro primer trabajo (Venturini et al., 2020b), realizamos un estudio similar a los de Lambrechts et al. (2019) y Ogihara & Hori (2020), computando la formación de super Tierras y mini Neptunos dentro de la

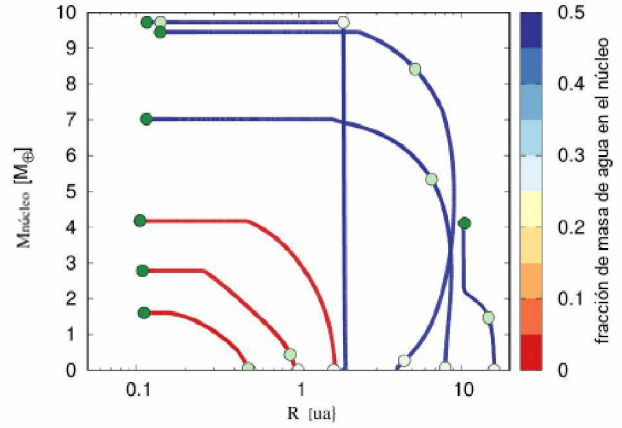


Figura 3: Caminos evolutivos para la formación de planetas a distintas posiciones iniciales. Los núcleos de los planetas dentro de línea de hielo (curvas rojas) crecen menos eficientemente y su crecimiento se detiene a bajas masas de aislación de *pebbles*. Los planetas por detrás crecen más eficientemente y alcanzan masas mayores de aislación de *pebbles* antes de cruzar la línea de hielo (figura extraída y editada del trabajo de Venturini et al., 2020c).

línea de hielo con el objetivo de estudiar la distribución de masas y radios de los planetas sintéticos. En este trabajo, encontramos que la acreción de *pebbles* es extremadamente sensible a la turbulencia del disco, la cual limita el crecimiento del polvo debido a las bajas velocidades de fragmentación del mismo en esta región del disco. Para valores de turbulencia moderados o altos, los planetas prácticamente no crecen más allá de la masa de la Luna. Para valores bajos de turbulencia, los planetas tienden a tener núcleos con masas $\lesssim 5 M_{\oplus}$. Este límite en la masa de los núcleos de los planetas se debe a dos factores principales: primero, debido a la evolución del disco, la masa de aislación de *pebbles* decae por debajo de las $\sim 5 M_{\oplus}$ en el primer millón de años; segundo, entre $\sim 1 - 3$ millones de años, la fotoevaporación abre una brecha en el disco de gas, cortando el flujo de *pebbles* desde la parte externa del disco y limitando el crecimiento de los planetas. Además, encontramos que todos los planetas con masas $\lesssim 4 M_{\oplus}$ pierden completamente sus envolturas gaseosas debido a la fotoevaporación de la estrella central, y caen dentro del primer máximo de la distribución de tamaños. Los planetas con núcleos entre $4 - 5 M_{\oplus}$ retienen solamente el $\sim 1\%$ de sus atmósferas y tienen radios de entre 2 y $2.3 R_{\oplus}$, cayendo en la parte inferior del segundo máximo. Prácticamente, no encontramos planetas con radios que caigan cerca del segundo máximo de la distribución de tamaños.

En nuestro segundo trabajo (Venturini et al., 2020c), ampliamos el estudio anterior computando la formación de planetas con semiejes iniciales a lo largo de todo el disco, es decir, tanto dentro como por detrás de la línea de hielo. Realizamos un extenso estudio de parámetros barriendo un amplio espectro de las propiedades de los discos (basado en las observaciones de los mismos) y las posiciones iniciales de los planetas. El resultado principal de este trabajo es que encontramos que las distintas propiedades del polvo, por dentro y detrás de la línea de

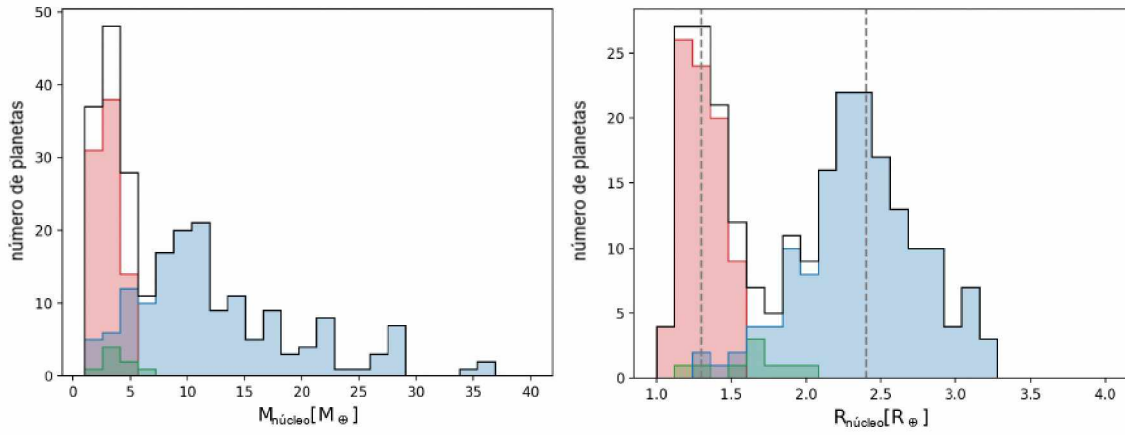


Figura 4: Histograma de las masas (izquierda) y radios (derecha) de los núcleos de los planetas de nuestras simulaciones con períodos < a 100 días. El color rojo indica contenidos fracción de masa de agua < 5% , el verde entre 5% y 45% y el azul, > 45%. Las curvas negras indican los histogramas totales, mientras que las líneas verticales en el histograma de la derecha indican la posición de los máximos de la distribución observada (Fulton et al., 2017) (figura extraída y editada del trabajo de Venturini et al., 2020c).

hielo, produce que los los núcleos de los planetas ricos en agua y los planetas secos, que terminan con períodos orbitales menores a los 100 días, tengan dos distribuciones de masas muy diferentes. Debido a la disminución en la velocidad de fragmentación del polvo dentro de la línea de hielo, los planetas secos tienen típicamente masas de $\sim 3 M_{\oplus}$, y rara vez superan las $5 M_{\oplus}$. Por otro lado, dado que el polvo puede crecer a mayores tamaños detrás de la línea de hielo y tener mayores números de Stokes, la formación planetaria es más eficiente y los planetas alcanzan masas mayores antes de alcanzar la masa de aislación de *pebbles* (ver Fig. 3). Encontramos que los planetas ricos en agua que comienzan su formación por detrás de la línea de hielo tienen una distribución amplia en masas con un máximo bien marcado en $\sim 10 M_{\oplus}$, y sólo unos pocos planetas ricos en agua tienen masas menores a $5 M_{\oplus}$. Es más, si sólo tenemos en cuenta los radios de los núcleos de los planetas, podemos reproducir de manera natural y con excelente acuerdo la distribución bimodal de tamaños (ver Fig. 4), en donde el primer máximo de la distribución esta constituido principalmente por planetas secos, mientras el segundo máximo esta constituido casi en su totalidad por planetas ricos en agua. Cuando las envolturas de los planetas son tenidas en cuenta, mostramos que la fotoevaporación debido a la estrella central moldea existosamente la distribución bimodal de tamaños (ver Fig. 4 de Venturini et al., 2020c). Sin embargo, dado que los planetas de mayor masa acretan más gas, la fotoevaporación no es eficiente en remover sus envolturas gaseosas y encontramos un exceso de planetas con radios de $\sim 8 R_{\oplus}$ que no se condice con las observaciones. Esto indicaría que debe existir otro mecanismo que limite o bien la acreción de gas de los planetas de mayor masa o bien la pérdida de masa atmosférica. A partir de esto, incluimos también en el modelo la pérdida de masa atmosférica debido a las colisiones entre los planetas que se forman en un mismo disco. Las Figs. 5 y 6 muestran que cuando se incluye la pérdida de masa atmosférica debido a las colisiones mutuas entre los planetas, junto

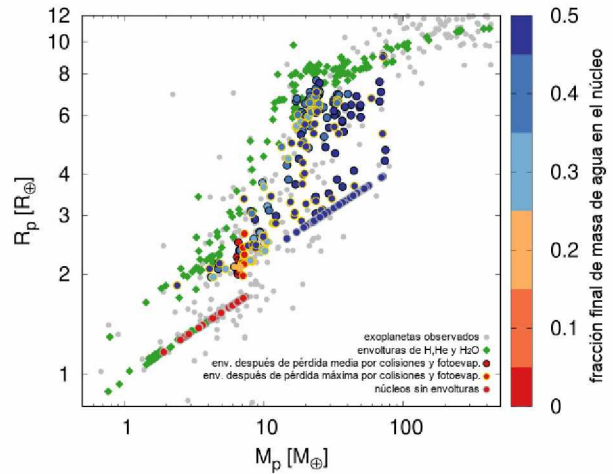


Figura 5: Diagrama masa – radio para los exoplanetas observados con $P < 100$ días (puntos grises). Los rombos verdes son los resultados de nuestras simulaciones que incluyen sólo la fotoevaporación, mientras los círculos incluyen además la pérdida de masa atmosférica debido a las colisiones (figura extraída y editada del trabajo de Venturini et al., 2020c).

a la fotoevaporación, nuestro modelo es capaz de reproducir con muy buena exactitud tanto el diagrama masa – radio como así también la distribución bimodal de tamaños de los exoplanetas observados de corto período, respectivamente.

4. Conclusiones

Si bien los modelos de evolución planetaria que incluyen la pérdida de masa atmosférica, ya sea debido a la fotoevaporación de la estrella central o al calor latente del núcleo, son capaces de reproducir la distribución bimodal de tamaños observada de los planetas de corto período, necesitan que los núcleos de los planetas sean rocosos para poder reproducir correctamente la posición

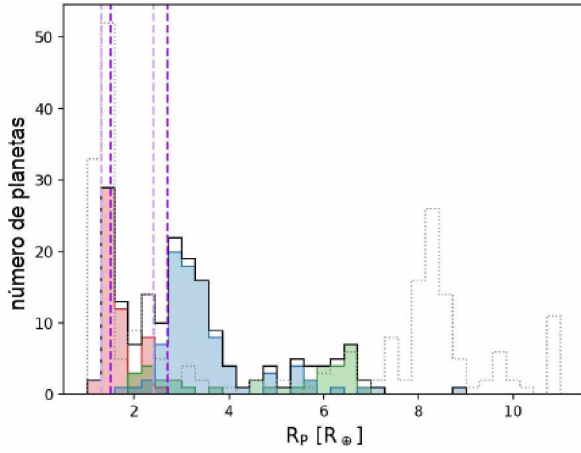


Figura 6: Histograma de la distribución de tamaños de los planetas sintéticos después de considerar la pérdida atmosférica por colisiones y fotoevaporación. Los colores representan el mismo porcentaje de agua que en la Fig. 4. Las curvas negras representan el histograma total, mientras que la curva gris a trazos representa el histograma sin tener en cuenta las colisiones mutuas entre los planetas. Las líneas verticales a trazos representan los máximos de la distribución de tamaños inferidos por Fulton et al. (2017, violeta claro) y Martínez et al. (2019, violeta oscuro) (figura extraída y editada del trabajo de Venturini et al., 2020c).

del valle de la distribución. Esto último es difícil de reconciliar con los modelos de formación planetaria que muestran que los planetas que comienzan su formación por detrás de la línea de hielo crecen y migran eficientemente hacia las regiones internas del disco pudiendo rellenar el valle de la distribución.

Sin embargo, nuestros trabajos muestran que el cambio en las propiedades del polvo en la línea del hielo, junto al aumento de la masa de aislación de *pebbles* con la distancia orbital genera dos poblaciones distintas de núcleos planetarios: una rocosa con un máximo de $\sim 3 M_{\oplus}$ y con masas generalmente $\lesssim 5 M_{\oplus}$, y otra con núcleos ricos en agua, más extendida en el rango de masas, pero con un máximo bien marcado en $\sim 10 M_{\oplus}$. Sorprendentemente, si se desprecian las envolturas de los planetas, los radios de estas dos poblaciones de núcleos reproducen de manera natural la distribución bimodal de tamaños de los planetas *Kepler*, en donde el primer máximo corresponde a la población de núcleos secos mientras el segundo, a la población de núcleos ricos en agua. Al considerar los planetas con sus envolturas, también encontramos que cuando se incluyen la fotoevaporación y la pérdida de masa atmosférica debido a las colisiones entre planetas, la distribución bimodal obtenida está en muy buen acuerdo con la observada. Sin embargo, contrariamente a los estudios evolutivos puros, encontramos que el valle de la distribución separa típicamente los planetas secos de los planetas ricos en agua. Futuras observaciones y caracterizaciones atmosféricas, con las misiones *JWST* y *ARIEL*, por ejemplo, serán cruciales para determinar la composición de los planetas pertenecientes al segundo máximo de la distribución de tamaños y proporcionarán valiosas restricciones para los modelos de formación y evolución planetaria.

Agradecimientos: OMG agradece a las Dras. Julia Venturini y María Paula Ronco por las discusiones y sugerencias para la realización de este documento. OMG esta parcialmente financiado a través de los PICT 2016-005 y PICT 2018-0934 de la ANPCyT de Argentina. OMG agradece el apoyo financiero de la Iniciativa Científica Milenio (ICM) a través del Núcleo Milenio de Formación Planetaria. OMG agradece el hospedaje del IA-PUC como Investigador Invitado.

Referencias

- Alibert Y., et al., 2018, *Nat. Astron.*, 2, 873
 Batalha N.M., et al., 2013, *ApJS*, 204, 24
 Bean J.L., Raymond S.N., Owen J.E., 2021, *J. Geophys. Res.*, 126, e06639
 Berger T.A., et al., 2020, *AJ*, 160, 108
 Bitsch B., Raymond S.N., Izidoro A., 2019, *A&A*, 624, A109
 Bodenheimer P., Lissauer J.J., 2014, *ApJ*, 791, 103
 Bodenheimer P., et al., 2018, *ApJ*, 868, 138
 Brown T.M., et al., 2011, *AJ*, 142, 112
 Emsenhuber A., et al., 2020, *arXiv e-prints*, arXiv:2007.05562
 Fulton B.J., Petigura E.A., 2018, *AJ*, 156, 264
 Fulton B.J., et al., 2017, *AJ*, 154, 109
 Ginzburg S., Schlichting H.E., Sari R., 2018, *MNRAS*, 476, 759
 Guilera O.M., et al., 2019, *MNRAS*, 486, 5690
 Guilera O.M., et al., 2020, *A&A*, 642, A140
 Gundlach B., Blum J., 2015, *ApJ*, 798, 34
 Gupta A., Schlichting H.E., 2019, *MNRAS*, 487, 24
 Haldemann J., et al., 2020, *A&A*, 643, A105
 Ikoma M., Hori Y., 2012, *ApJ*, 753, 66
 Izidoro A., et al., 2019, *arXiv e-prints*, arXiv:1902.08772
 Jin S., Mordasini C., 2018, *ApJ*, 853, 163
 Lambrechts M., Johansen A., 2012, *A&A*, 544, A32
 Lambrechts M., Johansen A., Morbidelli A., 2014, *A&A*, 572, A35
 Lambrechts M., et al., 2019, *A&A*, 627, A83
 Martínez C.F., et al., 2019, *ApJ*, 875, 29
 Mordasini C., 2018, *Planetary Population Synthesis*, 143, Springer International Publishing
 Mordasini C., 2020, *A&A*, 638, A52
 Ogihara M., Hori Y., 2020, *arXiv e-prints*, arXiv:2003.05934
 Ogihara M., Kunitomo M., Hori Y., 2020, *ApJ*, 899, 91
 Ogihara M., et al., 2018, *A&A*, 615, A63
 Ormel C.W., Klahr H.H., 2010, *A&A*, 520, A43
 Owen J.E., Wu Y., 2017, *ApJ*, 847, 29
 Petigura E.A., 2020, *arXiv e-prints*, arXiv:2006.15649
 Petigura E.A., Marcy G.W., Howard A.W., 2013, *ApJ*, 770, 69
 Pollack J.B., et al., 1996, *Icarus*, 124, 62
 Raymond S.N., et al., 2018, *MNRAS*, 479, L81
 Rogers J.G., Owen J.E., 2021, *MNRAS*
 Ronco M.P., Guilera O.M., de Elía G.C., 2017, *MNRAS*, 471, 2753
 Safronov V.S., 1969, *Evolutsiia doplanetnogo oblaka.*, Moskva: Nauka
 Van Eylen V., et al., 2018, *MNRAS*, 479, 4786
 Venturini J., Helled R., 2020, *A&A*, 634, A31
 Venturini J., Ronco M.P., Guilera O.M., 2020a, *SSRv*, 216, 86
 Venturini J., et al., 2020b, *A&A*, 644, A174
 Venturini J., et al., 2020c, *A&A*, 643, L1
 Wu Y., 2019, *ApJ*, 874, 91
 Zeng L., et al., 2019, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 116, 9723