



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

Formación de minilunetas en el anillo F de Saturno

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
FÍSICO

PRESENTA:
RODOLFO ARTURO GONZÁLEZ TRILLO

DIRECTOR DE TESIS:
DRA. MARÍA DOLORES MARAVILLA MEZA



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2017



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Hoja de datos del jurado

1. Datos del alumno

González

Trillo

Rodolfo

Arturo

411005337

Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ciencias

Física

2. Datos del tutor

Dra.

Maravilla

Meza

María Dolores

3. Datos del sinodal 1

Mtra.

Marquina

Fábrega

María Luisa

4. Datos del sinodal 2

Dra.

Pichardo

Silva

Bárbara Selén

5. Datos del sinodal 3

Dr.

Benet

Fernández

Luis

6. Datos del sinodal 4

Dr.

Velasco

Herrera

Víctor Manuel

7. Datos del trabajo escrito

Formación de minilunetas en el anillo F de Saturno

2017

Agradecimientos

Agradezco a mi tutora la Dra. María Dolores Maravilla Meza por todo el tiempo que me dedicó durante mi servicio social y la elaboración de esta tesis.

Le doy gracias a mis sinodales que revisaron y contribuyeron a la versión final de esta tesis: la Mtra. María Luisa Marquina Fábrega, la Dra. Bárbara Selén Pichardo Silva, el Dr. Luis Benet Fernández y el Dr. Víctor Manuel Velasco Herrera.

Correspondo al Instituto de Geofísica-UNAM, por el apoyo que me brindó mediante el programa de becas tesis-licenciatura y a la Universidad Nacional Autónoma de México por los conocimientos que me proporcionó durante mis años de estudio.

Dedico esta tesis a mi madre Edith, a quien le debo el logro de mi carrera y a Miguel Ángel, quien me enseñó tantas cosas durante la elaboración de esta tesis.

Agradezco también a Carlos y Enrique por el apoyo que me brindaron para terminar esta tesis.

Resumen

Saturno es quizá uno de los planetas más bellos y enigmáticos del Sistema Solar debido principalmente a su gran sistema de anillos.

Los anillos de Saturno no siempre fueron conocidos, porque no pueden ser vistos a simple vista, se requiere un telescopio para observarlos. El primero en hacerlo fue Galileo en 1610, quien los confundió con dos satélites muy grandes y más tarde con un par de asas fijas unidas a los costados de Saturno. En años venideros Saturno se convirtió en un enigma debido al incremento en la variedad de formas que se presentaban alrededor del planeta con el paso del tiempo; se postulaban toda clase de estructuras para explicar el fenómeno observado, hasta que, en 1659 Huygens postuló que se trataba de estructuras planas en el ecuador de Saturno. Esto sólo acrecentaría el misterio, debido a que ahora había que explicar cómo era posible que tales estructuras existieran (capítulo I).

Cassini, la sonda espacial enviada a Saturno por las Agencias Espacial Estadounidense (NASA), la europea (ESA) y la italiana (ASI), llegó al planeta en el año 2004 y ha sido la cúspide en el estudio de Saturno, proporcionando una cantidad de datos y observaciones del planeta como nunca antes había tenido la humanidad. Esta misión espacial terminó su periodo operativo en la madrugada del 15 de septiembre de 2017 cuando ingreso a la atmósfera saturnina y más tarde fue destruida por la presión de la misma. El resumen de todo lo que se sabe sobre Saturno, debido a los datos de sonda Cassini está en el capítulo II.

En el capítulo III se describe la complicada estructura de los anillos y algunas de sus propiedades físicas, así como sus características más notorias y se habla de las diversas hipótesis acerca de la estabilidad de los anillos y de su edad, enfocándose en cómo las lunas llamadas pastoras, son las principales modeladoras de sus brechas y de sus partes más densas.

El anillo F, es el anillo más enigmático debido a la gran variedad de estructuras dinámicas que presenta. Este anillo está por cuerpos de hielo de agua que no superan los milímetros de radio y que se agrupan en torno a dos estructuras, un núcleo en el centro del anillo, de corte elíptico más o menos estable y menos dinámica, y una envoltura que es altamente dinámica

y que rodea al núcleo formando espirales. Dentro del anillo F se han observado estructuras llamadas grumos que son regiones de mayor densidad donde se cree que se pueden formar lunetas. La existencia de estos cuerpos podría explicar la riqueza de la dinámica del anillo F (capítulo IV).

En el capítulo V se describe el modelo matemático utilizado para estudiar la formación de minilunetas en el anillo F a partir del proceso de coagulación. La coagulación se analiza suponiendo la formación de partículas grandes a partir de partículas diminutas utilizando la ecuación de Smoluchowski que describe este proceso mediante el uso de parámetros probabilísticos.

En el capítulo VI se presentan las simulaciones realizadas así como los resultados obtenidos y la discusión de los mismos. A partir de los resultados se deduce que la coagulación es dependiente de la densidad y no ocurre cuando sólo se tienen cuerpos muy pequeños. Los resultados también indican que, a medida que el material que forma las partículas es más denso, la coagulación ocurre más rápido.

A partir del modelo utilizado, no se concluye la formación de minilunetas aunque el modelo no descarta la formación de grumos a partir de cuerpos de tamaño micrométrico. Los grumos, por otro lado, han sido detectados en el anillo F por la misión Cassini.

Finalmente se presentan las conclusiones de este trabajo.

Índice

Agradecimientos.....	iv
Resumen	v
Índice	vii
Índice de figuras	x
Índice de tablas	xiii
1 Historia breve de Saturno	1
2 El sistema de Saturno	9
2.1 Atmósfera y nubes	10
2.2 Campo magnético	12
2.3 Magnetósfera	13
2.4 Satélites de Saturno.....	15
2.4.1 Lunetas entre los anillos	16
2.4.2 Pastoras de los anillos.....	18
2.4.3 Coorbitales.....	19
2.4.4 Grandes lunas interiores	19
2.4.5 Alquiónides.....	21
2.4.6 Grandes lunas exteriores.....	21
2.4.7 Lunas irregulares	24
3 Anillos	27
3.1.1 Clasificación de los anillos.....	28
3.1.2 Estructura de los anillos.....	29
3.2 Anillos principales	32

3.2.1	Anillo A	32
3.2.2	Anillo B	33
3.2.3	División de Cassini.....	36
3.2.4	Anillo C	36
3.2.5	Anillo F.....	38
3.3	Anillos tenues	38
3.3.1	Anillo D	38
3.3.2	División de Roche	39
3.3.3	Anilletes entre las brechas	40
3.3.4	Anillo G	41
3.3.5	Otros anillos y arcos finos	42
3.3.6	Anillo E	43
3.3.7	Anillo de Febe	46
3.4	Formación de los anillos principales	46
3.4.1	Estabilidad de los anillos	47
4	Anillo F.....	49
4.1.1	Características.....	50
4.2	Dinámica.....	51
4.2.1	Perturbaciones causadas por Prometeo	51
4.2.2	Jets y espirales	52
4.2.3	Lunetas entre el anillo.....	53
4.3	Estabilidad	54
4.4	Origen	55
5	Coagulación en el anillo F	57
5.1	Descripción del modelo	57

5.1.1	Coagulación y acreción	58
5.1.2	Ecuación de coagulación de Smoluchowski.....	59
5.1.3	Cadena de Markov	60
5.1.4	Determinación de la frecuencia de colisión.....	63
5.1.5	Criterio de acreción	65
	Resultados y discusión	73
	Conclusiones.....	81
	Referencias	83

Índice de figuras

1.1. Dibujos de Saturno de Galileo de 1610 a 1623.....	1
1.2. Diagrama de Huygens de 1659 para explicar los anillos de Saturno.....	2
2.1. Esquema de la estructura interna de Saturno de (Fortney, et al., 2010).....	9
2.2. Diagrama de los la atmósfera de Saturno (McFadden, et al., 2007).....	10
2.3. Regiones de la magnetósfera de Saturno (NASA, 2004).....	14
2.4. Fotografías de estructuras en los anillos A y F (NASA, 2009-2016).....	16
2.5. Fotografías de la luna Atlas (NASA, 2009-2016).....	18
2.6. Collage de las lunas de Saturno Mimas, Encelado, Tetis y Dione. (NASA, 2009- 2016).....	20
2.7. Distintas imágenes de la superficie de Titán (NASA, 2009-2016).....	22
2.8. Fotografía de Hiperión. (NASA, 2009-2016).....	22
2.9. Fotografías de los dos hemisferios de Jápeto. (NASA, 2009-2016).....	23
2.10. Fotografía de la superficie de Febe (NASA, 2009-2016).....	25
3.1. Fotografía de los anillos principales de Saturno con nombres. (NASA, 2009- 2016).....	28
3.2. Fotografía de las ondas de densidad en el anillo A (NASA, 2009-2016).....	29
3.3. Fotografía de la Brecha de Encke con anotaciones sobre resonancias.....	30
3.4. Gráfico de profundidad óptica del anillo A de los aparatos UVIS y RSS de la sonda Cassini y un mosaico de imágenes. (NASA, 2009-2016).....	32

3.5. Gráfico de profundidad óptica del anillo B y la rampa del anillo C de los aparatos UVIS y RSS de la sonda Cassini y un mosaico de imágenes. (NASA, 2009-2016).....	33
3.6. Fotografía de la luneta S/2009 S1 en el anillo B. (NASA, 2009-2016).....	34
3.7. Fotografía de las manchas oscuras en el anillo B. (NASA, 2009-2016).....	35
3.8. Gráfico de profundidad óptica de la división de Cassini de los aparatos UVIS y RSS de la sonda Cassini y un mosaico de imágenes. (NASA, 2009-2016).....	36
3.9. Gráfico de profundidad óptica de la división de Cassini de los aparatos UVIS y RSS de la sonda Cassini y un mosaico de imágenes. (NASA, 2009-2016).....	37
3.10. Fotografías de los anilletes encontrados en el anillo D. (NASA, 2009-2016).....	39
3.11. Fotografías de los anilletes en distintas brechas de los anillos principales. (NASA, 2009-2016).....	40
3.12. Fotografías del arco de la luneta Egeón en el anillo G (NASA, 2009-2016)	42
3.13. Imagen de los arcos de Anthe Metone y Palene (NASA, 2009-2016).....	43
3.14. Fotografías del anillo F y de los criovolcanes de Encelado. (NASA, 2009-2016).....	44
4.1. Mosaico de fotografías de los canales producidos por Prometeo en el anillo F (NASA, 2009-2016).....	50
4.2. Mosaico de fotografías de las diversas estructuras del anillo F. (NASA, 2009-2016).....	52
4.3. Fotografía del núcleo del anillo F con estructuras de tipo “ventilador”. (NASA, 2009-2016).....	53

5.1. Coagulación y acreción.....	57
5.2. Esquema del cambio de coordenadas de la aproximación de Hill.....	65
5.3. Potencial de Hill en el plano $z=0$ (Canup & Esposito, 1995).....	67
6.1. Gráfica de simulación de coagulación para condiciones del anillo F.....	74
6.2. Gráfica de la simulación para partículas con radios micrométricos.....	75
6.3. Gráfica de la simulación con distintos materiales y densidades.....	76
6.4. Estimación lineal del tiempo de coagulación.....	77

Índice de tablas

2.1. Diversos parámetros de Saturno (Harland, 2007).....	12
2.2. Características físicas de las principales lunas de Saturno (Thomas, 2010).....	17
2.3. Tamaños de los anillos y brechas de Saturno.....	45
6.1. Parámetros del anillo F.....	73
6.2. Tabla de las constantes encontradas en la estimación lineal del tiempo contra el radio en el que las partículas comienzan a coagular.	77

Capítulo I

1 Historia breve de Saturno

Saturno es el sexto planeta conocido desde la antigüedad siendo los romanos quienes le dieron este nombre en honor al dios homónimo de la agricultura y figura central de la ciudad de Roma (Mueller, 2010).

La característica principal de este planeta son sus anillos que fueron observados por primera vez por Galileo Galilei en 1610, aunque él nunca dedujo que los anillos eran estructuras anulares en torno al planeta y propuso que la estructura que rodeaba a Saturno estaba formada por dos satélites (Figura 1.1).

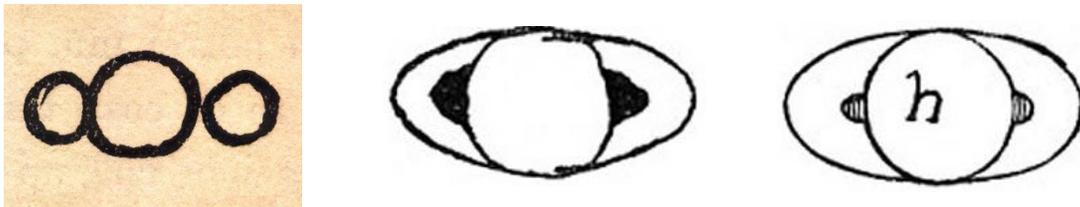


Figura 1.1 Dibujos de Galileo basados en sus observaciones. **Izquierda**, el primer dibujo de 1610, en el que Saturno aparece con sus dos acompañantes (Galilei, 1610). **Al centro**, el bosquejo que hizo del planeta con sus “asas” en 1616. **Derecha**, la ilustración de la publicación de 1623 (Galilei, 1623).

Dos años después de su descubrimiento, Galileo inició una nueva etapa de observaciones planetarias detectando que las estructuras alrededor de Saturno habían desaparecido, hecho que se debe a que los anillos están de canto a la Tierra pero que en tiempos de Galileo no se sabía porque se desconocía la existencia de los anillos. En 1616 y usando un telescopio más moderno, Galileo observó de nuevo el planeta y en lugar de dos satélites, lo que observó fueron unas protuberancias a las que se les dio el nombre de “asas” (Figura 1.1).

En las décadas siguientes diversos astrónomos continuaron con la observación de Saturno aportando diagramas y nuevas hipótesis sobre la forma de las “asas” del planeta, sin embargo, no sería hasta 1656 cuando Christiaan Huygens publicó en su libro: *De Saturni luna observatio nova*, los resultados de sus observaciones realizadas con un gran telescopio aéreo —llamado así al ser un telescopio refractor muy largo y sin tubo. En este documento también anunció el descubrimiento de Titán y mencionó que había encontrado una explicación para

la asas de Saturno: “Está rodeado por un anillo plano y delgado, sin tocar en ningún lado e inclinado respecto a la eclíptica” (van Helden, 1974). Huygens propuso que el anillo que rodeaba al planeta debía ser plano, que estaba formado por una sola estructura sólida y las imágenes tan cambiantes que habían observado los otros astrónomos eran resultado de la inclinación de los anillos y del cambio de perspectiva desde la Tierra a través del año (Figura 1.2).

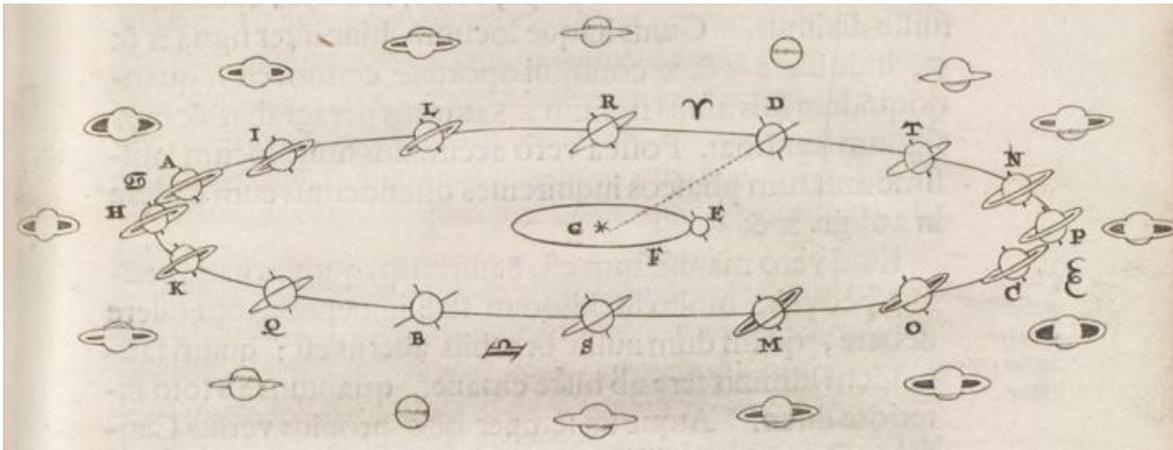


Figura 1.2 Diagrama del libro *Systema Saturnium* que Christiaan Huygens publicó en 1659. El diagrama explica porque las asas del planeta aparecen, crecen y desaparecen. (Huygens, 1659).

Giovanni Domenico Cassini, quien también era italiano, después de hacer fama en Boloña calculando efemérides para propósitos astrológicos, y realizando observaciones de gran precisión y calidad, fue invitado a trabajar como director del observatorio de Paris, donde descubrió las lunas Júpiter y Rea en 1671 y Tetis y Dione en 1684 (en esa época, estos satélites no tenían esos nombres, serían propuestos más tarde por John Herschel). Cassini nombró a estos satélites “*Sidera Lodiacea*” o lunas luisianas, en honor a su benefactor, el rey Luis XIV que patrocinaba el Observatorio de Paris.

Cuando Cassini observó Júpiter con cuidado, se percató de que éste sólo se podía observar del lado oeste del planeta: por más que lo esperaba en el otro hemisferio, éste nunca aparecía. Asumió correctamente que se debía tratar de un satélite con dos albedos muy distintos, haciendo analogía a la Tierra con sus continentes y sus océanos, y en cuánto tiempo realizaba una revolución alrededor de Saturno, para que el hemisferio con un gran albedo mostrara la

cara clara hacia la Tierra y el hemisferio con bajo albedo presentara la cara oscura en dirección opuesta a nuestro planeta (van Helden, 1984).

Cassini también observó en 1675 una línea delgada y oscura dentro del único anillo de Saturno conocido hasta entonces y creyó que se trataba de una marca sobre el anillo que lo dividía en dos secciones. Más tarde a esta región en los anillos se le llamaría División de Cassini, en honor a su descubridor y es una brecha que separa, en realidad, a dos anillos (A y B).

Además de descubrir nuevos satélites y la brecha que lleva su nombre, Cassini también descubrió un cinturón en el disco planetario de Saturno, justo al sur del ecuador y similar a las bandas latitudinales descubiertas en Júpiter por Francesco Fontana en 1630.

Varios años después y haciendo uso de la ley de la gravitación universal (1687) planteada por Isaac Newton, se pudo calcular con precisión la masa y la densidad de Saturno. Este planeta, aunque tiene un volumen 700 veces mayor al de la Tierra, es sólo 95 veces más masivo que ésta, por lo que su densidad, es de 0.69 g/cm^3 y puede flotar en un océano de agua.

En el siglo XVIII, William Herschel construyó un telescopio reflector de 6 pulgadas de diámetro (1774) con el que observó por primera vez los satélites Mimas y Encélado. En cuanto a los dos anillos divididos por Cassini, Herschel creía que se trataba de dos sólidos perfectos, de un material desconocido de dureza increíble (Mullaney, 2007).

Once años después de las observaciones de Herschel, el matemático P. S. Laplace demostró que si los anillos fueran un objeto sólido, entonces las fuerzas de marea producidas por el campo gravitacional del planeta habrían ya perturbado su órbita (1785). En lugar de este modelo argumentó que los anillos estaban formados por muchos anilletes delgados y sólidos. En particular, Laplace investigó de manera teórica la rotación de una esfera de gas y demostró que si ésta rotaba muy deprisa, la parte más exterior tendía a distenderse, y formar un disco (1796). Si el momento angular llegaba a un punto crítico, entonces el borde del disco se desprendería formando un anillo, reduciendo en el proceso, el momento angular del disco. A esto se le conoce como hipótesis nebular del origen del Sistema Solar y, aunque esta teoría ya había sido propuesta antes por Emanuel Swedenborg en 1734 y aplicada por

Immanuel Kant en 1755 (Woolfson, 1993), Laplace afirmó que los anillos concéntricos de Saturno eran prueba de su hipótesis.

El 25 de Abril de 1837, J.F. Encke, director del observatorio de Berlín, observó una delgada línea oscura cerca del borde del anillo A. A esta división, más tarde se le conocería como división de Encke.

Para 1848, el astrónomo francés Édouard Roche demostró que los anillos de Saturno podrían estar formados de fragmentos de una gran luna que se acercó a Saturno y fue despedazada por las fuerzas gravitacionales y propuso un método para calcular la distancia en la que un objeto sostenido sólo por la gravedad, se rompería debido a las fuerzas de marea.

En noviembre de 1850, W.C. Bond, en el observatorio de Harvard, percibió con su telescopio de 15 pulgadas, un anillo de apariencia polvosa que se extendía desde el borde interior del anillo B hacia el planeta. Más tarde otros astrónomos verificarían sus observaciones y nombrarían a este nuevo anillo con la letra C. Con un telescopio refractor de 6 pulgadas, en el observatorio de la Compañía Británica de las Indias Orientales en India, W. S. Jacob observó que el anillo C era más brillante cuando se observaba transitando a Saturno, que fuera del disco planetario y concluyó que el anillo debería ser transparente, ya que, cuando se observa con Saturno por detrás, parte de la luz que refleja el planeta atraviesa el anillo, mostrándolo más brillante que cuando se observa en la zona fuera del disco planetario.

A partir de un estudio detallado de las correlaciones de las observaciones realizadas desde Huygens, O. W. Struve anunció en 1851 que el borde interior del anillo B se reducía cerca de 1 s de arco cada siglo, afirmando que: “El material del cual el anillo estaba compuesto caía en espiral hacia el planeta a razón de 100 km por año. A este paso, el anillo sería absorbido por Saturno en unos cuantos cientos de años”. Dijo que los astrónomos eran afortunados al poder observar este fenómeno transitorio. Para probar su hipótesis, en 1851, Struve realizó una serie de mediciones micrométricas y las repitió en 1882, encontrando que las dimensiones del anillo no habían cambiado significativamente, concluyendo que las mediciones de sus antecesores no habían sido lo suficientemente precisas.

La estabilidad de los anillos era un problema desde las teorías de Laplace, quien creía que los anillos estaban formados por múltiples anilletes. Durante un estudio de la luminosidad

del sistema de anillos, William Herschel encontró en 1780 algunas divisiones en el interior del anillo B. En las décadas siguientes, se descubrirían múltiples divisiones, tanto en el anillo A como en el anillo B.

En 1855, James Clerk Maxwell probó matemáticamente que los anillos no podían ser ni líquidos ni gaseosos, debido a que su rotación produciría ondas que podrían ser disruptivas. También demostró que la teoría de Laplace de múltiples anillos delgados y sólidos era inviable, debido a que por la tercera ley de Kepler (El cuadrado del periodo de un cuerpo en órbita es proporcional al cubo de la distancia media al centro de rotación), la diferencia en periodos de rotación produciría una fuerza de cizalla tan fuerte que ningún material existente podría resistirlas. Dijo que la única explicación posible era que los anillos estaban compuestos por una cantidad colosal de corpúsculos o satélites en órbita alrededor de Saturno, los cuales se veían como un continuo porque eran muchos elementos observados a gran distancia (Maxwell, 1859).

En 1866, Daniel Kirkwood, quien estudiaba el cinturón de asteroides, descubrió que existían zonas de exclusión cuando la distancia media hacia el Sol correspondía a orbitas con periodos resonantes al de Júpiter. Aplicó su teoría en la División de Cassini y descubrió que el radio de la zona corresponde a un periodo orbital de un medio el de Mimas, un tercio el de Encélado, un cuarto el de Tetis y un sexto el de Dione. Afirmó que la resonancia con Mimas es suficiente para mantener “limpia” la zona. En 1871, Kirkwood estudió la división de Encke y descubrió que ésta también corresponde a una fracción del periodo de la de Mimas (Kirkwood, 1883).

La teoría de Kirkwood, con sus zonas de exclusión para asteroides, reforzó la afirmación de Maxwell sobre anillos compuestos por partículas. La verificación observacional la dio Hugo von Seeliger en Múnich en 1888, quien realizó estudios fotométricos para probar que los anillos estaban compuestos de partículas discretas. Concluyó que sólo una configuración como tal podría proveer a los anillos de las variaciones de brillo en su superficie con diferentes ángulos de iluminación solar. También dijo que las partículas debían tener diámetros de alrededor de 1 m. La variación de albedo y las transiciones de fase de la luz solar reflejada indicaban que las partículas no tenían una superficie suave.

En 1895, calculando la velocidad radial de las partículas a lo ancho del sistema de anillos, empleando el efecto Doppler, J. E. Keeler reportó que las partículas deberían tener distintas velocidades en las diferentes regiones de los anillos. Más tarde W. W. Campbell, en el observatorio Lick midió esta velocidad diferencial, probando definitivamente que los anillos estaban formados por partículas individuales. (Keeler, 1895).

En 1887 William Henry Pickering, utilizando un telescopio fotográfico en Arequipa, observó Saturno y descubrió Febe. Observó que ésta orbitaba de manera retrógrada, inclinada y con una gran excentricidad. (Pickering, 1905)

Maxwell en su trabajo explicó que las ondas de densidad no podían existir en un anillo de partículas sólidas, por lo que no era posible que existieran características radiales en los anillos. Sin embargo, a finales del siglo XIX y principios del XX, se reportaron muchas observaciones de características de este tipo, entre las que destacan las de 1856 de Sidney Coolidge, quien observó de 4 a 5 delgadas líneas en el anillo B, en 1884 Henri Perrontin y Norman Lockyer observaron 5 líneas delgadas. En abril de 1896, E. M. Antoniadini observó las líneas en el anillo B, además de media docena de marcas radiales entre la división de Cassini y la parte interior del anillo.

Para 1947, Harold Jeffreys extendió la derivación de Roche, la cual medía el radio en el cual un satélite no puede existir basándose en que el satélite y el planeta tienen la misma densidad —que en el caso de Saturno es extremadamente baja— afirmando que un objeto sólido puede existir desde 2.44 radios del planeta mientras tenga la suficiente integridad estructural para resistir el estrés por fuerzas de marea. Estimó que un cuerpo formado de hielo, con un diámetro de 200 km, en una órbita con radio igual al radio medio orbital de los anillos, pudo haber sido desintegrado en millones de fragmentos pequeños y formado los anillos. (Jeffreys, 1947)

En 1954 Kuiper investigó con el telescopio reflector de Monte Palomar los anillos de Saturno y encontró que la única brecha “real” en los anillos era la división de Cassini, mientras que la de Encke era solamente un cambio abrupto en la intensidad del anillo A.

En 1960 R. M. Goldstein, utilizó un radio telescopio de la NASA y descubrió que los anillos de Saturno tenían una eficiencia de alrededor del 60% para reflejar las ondas de radio, muy alta si la comparaba con sus observaciones de Marte, la Luna y Venus, que no pasaban del

8%. Infirió que los anillos debían tener una composición muy metálica y, por lo tanto los anillos no se habían formado del material prístino y sobrante de la formación de Saturno. (Goldstein, et al., 1977)

El paradigma cambió con la llegada de la era espacial. En lugar de observar a Saturno desde lejos. En las últimas décadas se enviaron sondas robóticas que han orbitado directamente a Saturno y han tomado muchas fotografías. Las misiones más importantes fueron Pioneer II en 1969, las dos misiones Voyager de la década de los 70's y la sonda Cassini que llegó a Saturno en 2004. Estas misiones han sido las que nos han dado un conocimiento más profundo de Saturno, sus satélites y sus anillos, debido a que las observaciones con telescopio están limitadas por la distancia a Saturno y por el ángulo en el que podemos observar al planeta desde la Tierra (Swift, 1997).

Capítulo II

2 El sistema de Saturno

El sistema de Saturno, análogamente al sistema solar, está formado por el planeta, sus satélites y sus anillos. El planeta gira sobre su propio eje en 10.55 horas aproximadamente y orbita alrededor del Sol a una distancia promedio de 1.43×10^9 km tomándole 10,759 días terrestres completar una vuelta alrededor de nuestra estrella (Williams, 2006).

Saturno es el séptimo planeta más lejano al Sol y el segundo más masivo en el sistema Solar. Su radio orbital promedio es de 9.537 UA y tarda 29 años, 167 días y 6.7 horas en completar una revolución alrededor del Sol. Tiene un radio ecuatorial de 60 268 km, aunque tiene una forma elipsoidal, alargada en la zona ecuatorial (McFadden, et al., 2007). Medir su periodo de rotación directamente es imposible, debido a lo grueso de su atmósfera, pero se ha medido a través de la frecuencia de modulación de su magnetosfera y se sabe que la rotación del exterior de Saturno difiere de la rotación del interior; las mediciones de la región ecuatorial muestran que rota con un periodo de 10h 14min y 13s, a esta región se le conoce como Sistema I. Mientras que las regiones al sur y al norte de la región ecuatorial rotan más lento, con 10h 38min y 2.2 s, a estas regiones se les conoce como Sistema II (Desch & Kaiser, 1981).

Saturno, tiene una masa de 6.688×10^{26} kg, es el planeta menos denso del sistema solar, con una densidad de 690 kg/m^3 . Está categorizado entre los planetas jovianos o gigantes gaseosos y está compuesto principalmente de hidrógeno y helio, posee un pequeño núcleo de compuestos rocosos, similar a la composición del núcleo de la Tierra, que está rodeado por una capa de helio e hidrógeno metalizado (McFadden, et al., 2007). A pesar de estar compuesto principalmente por elementos que en condiciones de la superficie terrestre son gaseosos, la mayor parte de la masa de Saturno no está en fase gaseosa y debido a la alta presión en su interior, el 99.9% de su masa está en estado líquido (Figura 2.1).

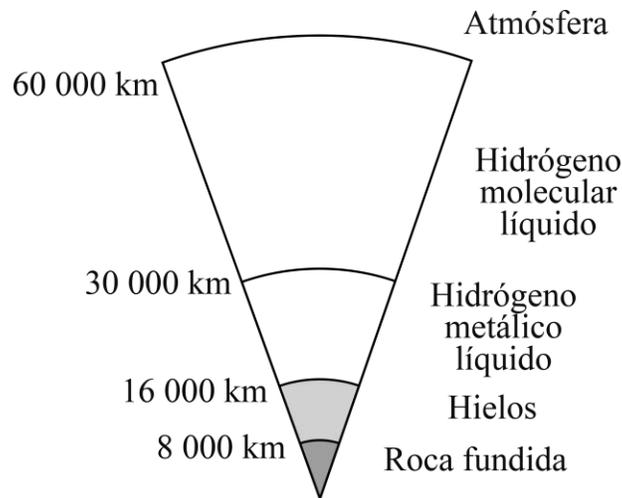


Figura 2.1 Diagrama de una sección de la estructura interna de Saturno, la zona central corresponde al núcleo formado de roca fundida, la segunda capa corresponde a una mezcla de hielos y rocas, la tercera capa hace las veces de manto formado de hidrógeno en fase metálica y finalmente la capa de hidrógeno molecular corresponde a la corteza. Las distancias, en la parte izquierda de la figura son medidas estimadas. Basado en (Fortney, et al., 2010).

2.1 Atmósfera y nubes

La atmósfera de Saturno consta de 96.3% de hidrógeno molecular y 3.25% de helio, con trazas de acetileno, etano, propano y metano (Williams, 2006).

En Saturno, las sustancias que forman las nubes son amoníaco (NH_3) hidrosulfuro de amonio (NH_4SH) y agua (H_2O). Los modelos se complican porque el amoníaco y el agua son solubles mutuamente y forman nubes a cierta altitud dependiendo de la proporción en la que se combinen (Atreya & Wong, 2005).

Al igual que en Júpiter, la superficie visible de Saturno está dividida en bandas paralelas al ecuador existiendo dos tipos de bandas, las de color más claro se llaman zonas y las más oscuras se llaman cinturones. La diferencia entre las zonas y los cinturones es causada por la diferencia en la opacidad de las nubes: la concentración de amoníaco es mayor en las zonas, por lo que hay mayor presencia de nubes densas de amoníaco en altitudes mayores, aclarando el color de las zonas. Por otro lado, las nubes de los cinturones son más delgadas y se ubican a menores latitudes (Figura 2.2).

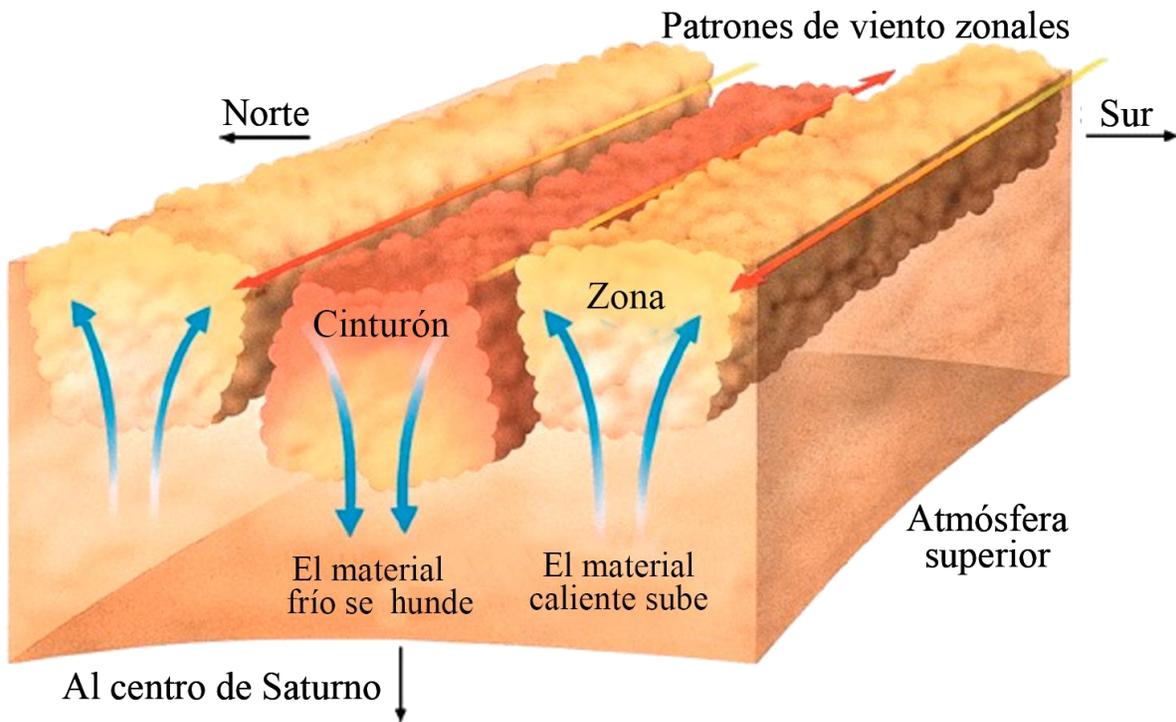


Figura 2.2 Diagrama de cómo se forman los cinturones y zonas en Saturno, aunados a los fuertes vientos en oposición, ocurre un fenómeno conocido como células de Hadley: las zonas son sitios donde las corrientes de convección ascienden, es decir zonas de afloramiento o surgencia, mientras que los cinturones son las zonas opuestas donde las nubes se hunden. Cuando el aire enriquecido en amoníaco asciende en las zonas, se expande y se enfría formando nubes grandes y densas. En los cinturones el aire desciende calentándose adiabáticamente y las nubes de amoníaco blanco se evaporan, revelando las nubes inferiores oscuras (McFadden, et al., 2007).

Las bandas están cercadas por vientos zonales llamados jets. Los jets prógrados (hacia el este) se encuentran en la transición de zonas a cinturones partiendo desde el ecuador, mientras que los jets retrógrados (dirección oeste) están en transiciones de cinturones a zonas (Ingersoll, et al., 1969).

En la región ecuatorial del planeta es donde se han medido los vientos más fuertes dentro de un planeta en el sistema solar, con ráfagas de hasta 470 m/s. Dentro del patrón estable de vientos zonales existe un sinnúmero de características discretas entre los cinturones de Saturno. Las más sobresalientes son las denominadas manchas que son vórtices en dirección ciclónica o preferentemente anticiclónica —en Saturno es la dirección predominante de los vórtices. La duración máxima que se ha visto de estos eventos es de 9 meses.

La liberación de calor del interior del planeta, así como la radiación absorbida proveniente del Sol, es la energía que la atmósfera usa para mantener su dinámica. Dado que el interior de Saturno es fluido, a medida que se contrae libera calor por el mecanismo de Kelvin-Helmholtz y la energía se transporta al exterior mediante corrientes de convección. El clima de Saturno está fuertemente regido por las estaciones debido a la inclinación de su eje de 26.7° y a la sombra que producen los anillos sobre su superficie.

2.2 Campo magnético

Saturno tiene un campo magnético intrínseco, principalmente dipolar. El eje del dipolo está casi alineado con el eje planetario de rotación, con alrededor de 1° de inclinación. La polaridad del campo, como en Júpiter, es opuesta a la de la Tierra. El momento magnético del campo de Saturno es 600 veces más grande que el de la Tierra y bastante más pequeño que el de Júpiter, que es 20 000 veces el momento magnético de la Tierra.

El proceso que genera el campo magnético en Saturno es el proceso de dínamo, el cual explica la existencia del campo en todos los planetas con campo magnético intrínseco.

Tabla 2. 1 Datos comparativos útiles de Saturno, la Tierra y Júpiter. (Harland, 2007)

Parámetro	Saturno ♄	Tierra ⊕	Júpiter ♃
Momento magnético (M_{\oplus})	600	1	20 000
Campo magnético ecuatorial	$2(10^{-5})$ T	$3(10^{-5})$ T	$4(10^{-4})$ T
Inclinación del dipolo	0.0°	23.5°	27°
Máximo/Mínimo	4.6	2.8	4.5
Radio ecuatorial	$6.0(10^4)$ km	$7.1(10^4)$ km	$6.4(10^3)$ km
Periodo de rotación	10.5^h	24^h	10^h

Se requieren tres cosas para que se genere un campo magnético intrínseco con el modelo de la dínamo:

- Un medio líquido y conductor de la electricidad.
- Energía cinética proveniente de la rotación del planeta.
- Una fuente de energía interna que dirija la convección del fluido.

Si bien nunca se ha detectado directamente la presencia de hidrógeno líquido, se sabe que Saturno es casi totalmente de hidrógeno, y dado su tamaño y masa, la presión en su interior es suficiente para tener hidrógeno en este estado. Se sabe por la cantidad de radiación emitida que Saturno emite más cantidad de energía que la que recibe del Sol, entonces claramente hay una fuente de energía interna, aunque no se sabe con certeza que es lo que la produce (Fortney, et al., 2010).

2.3 Magnetósfera

La magnetósfera de Saturno es la zona donde el campo magnético de Saturno excluye al viento solar de la dinámica de la materia que órbita alrededor del planeta (plasma). Rige el comportamiento de toda la materia cargada en el Sistema de Saturno y es responsable de la

formación de algunos de los compuestos químicos detectados tanto en la atmósfera de Saturno como en la de los satélites y anillos que lo orbitan. En ella se producen múltiples fenómenos electromagnéticos, como son las auroras o los cinturones de radiación.

La frontera entre la magnetósfera y el viento solar se llama *magnetopausa*, su posición varía de 16 a 27 $R_S = 60\,330$ km—con R_S es el radio de Saturno que se emplea en los modelos (Williams, 2006)—dependiendo de la actividad solar, ya que el viento solar intenso suele comprimir más la magnetósfera de Saturno. Frente al Sol (lado día), después de la magnetopausa está el *frente de choque*, que es una perturbación en el viento solar causada por su colisión con la magnetosfera. Entre el frente de choque y la magnetopausa está la denominada *funda magnética*, que separa de forma definitiva la región donde el campo magnético de Saturno interfiere con el viento solar. En esta región el viento solar se vuelve turbulento, formando una estela alrededor de la magnetopausa.

En el lado opuesto al Sol (lado noche), el viento solar comprime las líneas de campo de Saturno en una larga y delgada cola magnética, compuesta por dos lóbulos con direcciones de campo magnético opuestas, la separación entre los dos lóbulos es una delgada capa llamada hoja de corriente. En esta zona, parte del plasma atrapado en Saturno puede escapar de la influencia de la magnetósfera. (Russell, 1993).

La magnetósfera de Saturno se puede dividir en 4 regiones:

- La magnetósfera interna contiene a los anillos de Saturno y se extiende hasta $3R_S$ aproximadamente, es estrictamente dipolar y es abundante en plasma que absorben las partículas de los anillos. También, los cinturones de radiación, están localizados en esta región, justo antes y después de los anillos.
- La segunda región comprende entre $3R_S$ y $6R_S$, contiene el plasma frío más denso en la magnetósfera de Saturno, originado en las lunas de hielo interiores de Saturno, particularmente de Encélado, ya que esta luna tiene gran actividad criovolcánica: posee *géiseres* en su polo sur que arrojan material, principalmente hielo a la órbita del satélite.

- La tercera región, entre $6R_s$ y $12-14R_s$, es llamada capa de plasma dinámica extendida. El campo magnético en esta región es estrictamente no dipolar, dado que el plasma está confinado en una delgada capa ecuatorial.
- La región más lejana está localizada más allá de los $15R_s$, y continúa hasta la magnetopausa. Está caracterizada por una baja densidad de plasma y una fuerte influencia del viento solar. En las regiones más lejanas, después de los $20R_s$, el campo magnético se estrecha y forma una estructura de disco, que continúa hasta la magnetopausa en el lado iluminado por el Sol (lado día) y cambia transicionalmente en la cola magnética del lado nocturno (lado noche). Con fuertes vientos solares este disco puede desaparecer del lado diurno, dado la fuerte compresión de la magnetósfera producida por estos vientos (Andre, et al., 2008).

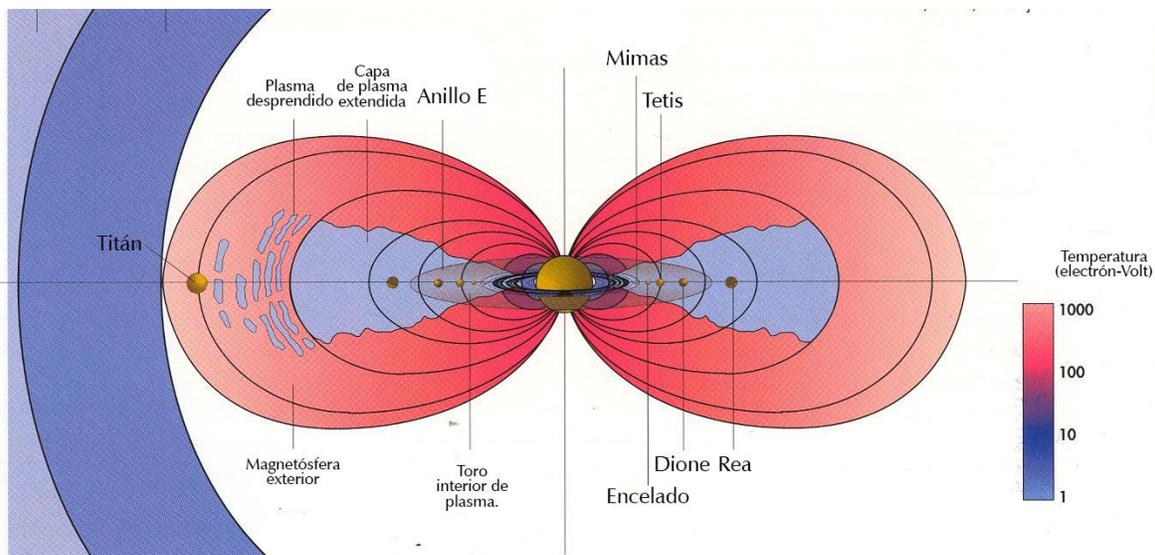


Figura 2.3 Regiones de la magnetosfera de Saturno, la más interior, aparece rodeando a los anillos (sombreada en gris), la segunda corresponde a la zona en azul cielo, la tercera es la zona donde la temperatura es mayor y la cuarta aparece en blanco (NASA, 2004).

2.4 Satélites de Saturno

Orbitando alrededor de Saturno existen un sinnúmero de cuerpos, los más grandes son las lunas; son numerosas y diversas en cuanto a sus características, su tamaño varía desde pequeñas lunetas de menos de 1 km hasta Titán, que es más grande que Mercurio. Saturno tiene 62 lunas con orbitas confirmadas, 53 tienen nombre y sólo 13 tienen diámetros mayores

a los 50 kilómetros. 7 de las lunas son suficientemente grandes para tener forma cuasi-esférica, y sólo dos de éstas están en equilibrio hidrostático.

Las lunas de Saturno tienen nombres mitológicos griegos de los titanes, titánides y gigantes: las hermanas y hermanos de Crono, el equivalente griego del dios romano Saturno. Todas las lunas en órbitas irregulares, salvo Febe, tienen nombres de dioses Inuit, dioses Gálicos y gigantes nórdicos.

Las lunas de Saturno se pueden clasificar en 10 grupos de acuerdo con sus características orbitales. En orden con de menor a mayor semeje mayor se clasifican en:

2.4.1 Lunetas entre los anillos

Las lunetas son pequeños satélites que habitan entre los anillos. Su característica principal es que debido a su tamaño reducido, no logran despejar todo el material en el camino de su órbita dejando a menudo una pequeña zona libre de material alrededor de éstas, llamada hélice (del inglés “*propeller*”), debido a la forma que tiene esta zona. (Tiscareno, et al., 2006).

. En el anillo A se han encontrado lunetas de entre 40 y 500 m de diámetro—demasiado pequeñas para ser vistas directamente y sólo visibles debido a las hélices y estructuras que generan en el anillo—confinadas en tres estrechas bandas dentro entre 126,750 y 132,000 km a partir del centro de Saturno. Cada banda es de unos pocos cientos de kilómetros de ancho y corresponden a zonas donde no hay fuertes perturbaciones producidas por las resonancias con otros satélites. Se estima que el anillo A contiene cerca de 7,000 a 8,000 propellers más grandes que 0.8 km y millones más grandes que 0.25 km (Tiscareno, et al., 2010).

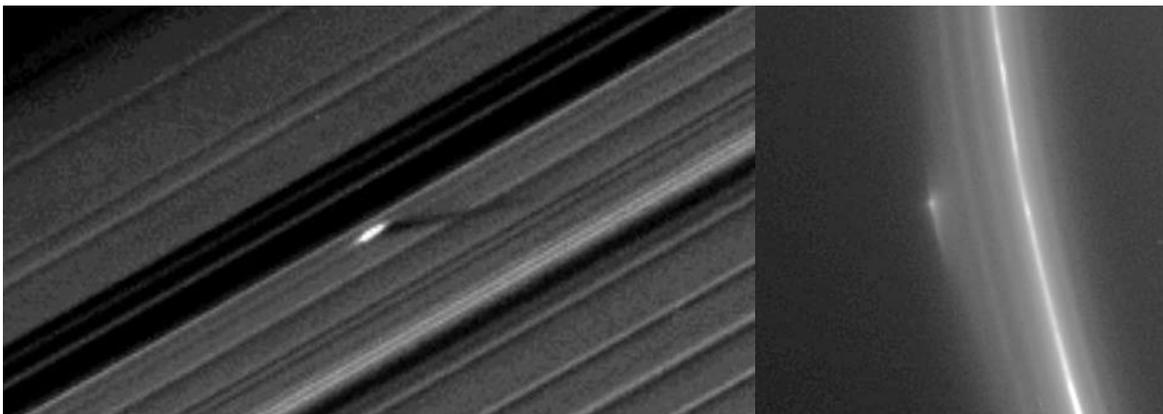


Figura 2.4 A la izquierda, una estructura de forma de hélice inusualmente grande en el anillo A. A la derecha, el objeto S/2004 S 6 observado en el anillo F (NASA, 2009-2016).

En 2009 se descubrió una luneta en el anillo B, a 480 km del borde externo del anillo, de aproximadamente 300 m de diámetro y, a diferencia de las lunetas del anillo A, esta no inducía una “hélice”, probablemente debido a la densidad del anillo B. (Tiscareno, et al., 2006).

Debido a las distintas características dinámicas del anillo F, se han propuesto modelos en que las lunetas juegan un papel central. El anillo posee jets de material que se explican por colisiones entre lunetas formarían parte de la estructura del anillo, inducidas por las perturbaciones de la luna vecina Prometeo. En 2004 se observó un objeto muy polvoso cerca del anillo F, pero no se ha logrado determinar si se trataba de una estructura temporal, como un grumo de polvo o de una luneta sólida (Murray, et al., 2008), (Figura 2.4).

Tabla 2. 2 Características físicas y dinámicas de los satélites más grandes de Saturno. Se incluyen datos relativos a la Luna de la Tierra, marcados como D_L diámetro lunar, m_L masa lunar y a_L semieje mayor lunar (Thomas, 2010).

Nombre	Diámetro medio	Masa	Semieje mayor	Periodo orbital	Inclinación
Mimas	396 km 0.12 D_L	0.4×10^{20} kg 0.0005 m_L	185 540 km 0.48 a_L	0.9 días	1.572
Encélado	504 km 0.14 D_L	1.1×10^{20} kg 0.002 m_L	238 040 km 0.62 a_L	1.4 días	0.009
Tetis	1062 km 0.30 D_L	6.2×10^{20} kg 0.008 m_L	294 670 km 0.77 a_L	1.9 días	1.091
Dione	1123 km 0.32 D_L	11×10^{20} kg 0.015 m_L	377 420 km 0.98 a_L	2.7 días	0.028
Rea	1527 km 0.44 D_L	23×10^{20} kg 0.03 m_L	527 070 km 1.37 a_L	4.5 días	0.331
Titán	5150 km 1.48 D_L	1350×10^{20} kg 1.8 m_L	1 221 870 km 3.18 a_L	16 días	0.348
Hiperión	135 km 0.04 D_L	0.056×10^{20} kg 7.48×10^{-5} m_L	1 500 880 km 3.91 a_L	21 días	0.630
Jápeto	1470 km 0.42 D_L	18×10^{20} kg 0.025 m_L	3 560 840 km 9.26 a_L	79 días	7.489
Febe	213 km 0.06 D_L	0.083×10^{20} kg 8.3×10^{-3} m_L	12 947 780 km 33.70 a_L	550 días	175.986

2.4.2 Pastoras de los anillos

Las lunas pastoras son lunas de mayor tamaño que las lunetas, habitan en los bordes de los anillos, donde generan una zona libre de material llamada brecha, división o borde, debido a la influencia gravitacional que producen, definiendo los bordes finos característicos.

Las lunas pastoras son Pan en la brecha de Encke, Dafne en la de Keeler, Atlas en el borde del anillo A y Prometeo y Pandora en el anillo F (Porco, et al., 2005). Estas lunas, junto con las lunas coorbitales (ver abajo), están formadas como resultado de la acreción de material de los anillos alrededor de núcleos más densos (Figura 2.5).

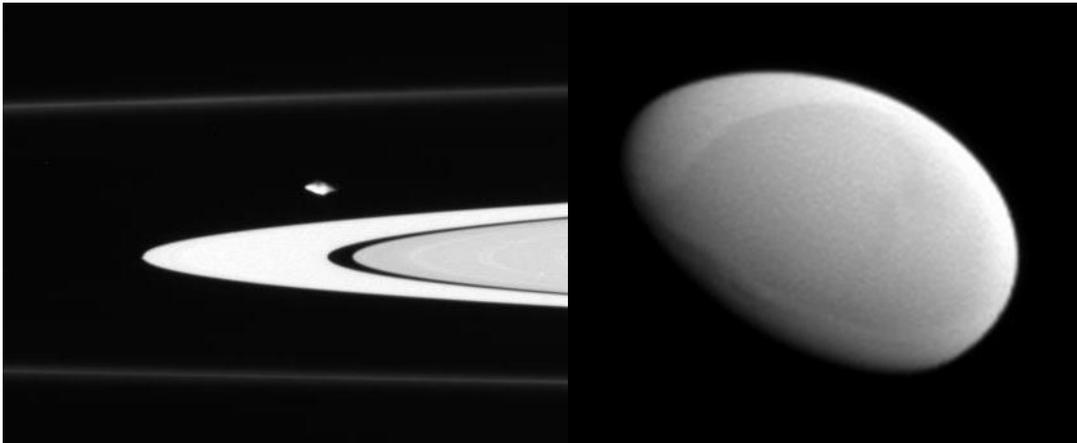


Figura 2.5 A la izquierda: Fotografía de Atlas y los anillos A y F. Se aprecia la acreción de material del anillo a lo largo del ecuador de Atlas, produciendo una zona protuberante alrededor del ecuador, característica de todas las lunas pastoras y de las coorbitales. A la derecha: Fotografía de Metone, donde se aprecia su superficie lisa (NASA, 2009-2016).

2.4.3 Coorbitales

Jano y Epimeteo son satélites con una característica orbital única en el Sistema Solar, tienen órbitas que difieren por sólo unos kilómetros en su semieje mayor y cada 4 años, cuando están más próximas intercambian su órbita. (Spitale, et al., 2006).

2.4.4 Grandes lunas interiores

Las lunas más grandes de Saturno orbitan entre el anillo E y la superficie del planeta junto con tres pequeñas lunas del grupo Alquiónides.

2.4.4.1 Mimas

Tiene una composición casi exclusivamente de agua, lo que le da su característico color blanco. Debido a que es la menos masiva de las lunas interiores, su flexible composición y a la proximidad con el planeta, es la luna interior que tiene la forma más ovoide, el diámetro ecuatorial es mayor que la distancia entre los polos por cerca de 20 km (Thomas, 2010). Su característica superficial más notable es que posee un cráter que mide 1/3 de su diámetro, el cráter Herschel, en el hemisferio que va de frente en la dirección de la órbita (frontal). (Moore, et al., 2004).

2.4.4.2 *Encélado*

Es la segunda luna más pequeña, después de Mimas (Thomas, 2010), la única geológicamente activa en Saturno y el cuerpo más pequeño, geológicamente activo en el Sistema Solar (Porco, et al., 2006). Su superficie es bastante lisa cubierta de valles, pero cuenta con algunas zonas con terreno cubierto de cráteres, irrumpidos por fracturas que forman sistemas de fallas. El área alrededor del polo sur tiene la mayor cantidad de fracturas que también son los más largas y profundos del satélite. Se les conoce como “*zarpazos de tigre*”, algunas de las cuales emiten jets de vapor de agua y polvo en un proceso llamado criovolcanismo. Estos jets forman una pluma larga que sale del polo sur y abastecen de material al anillo E de Saturno siendo la fuente principal de iones en la magnetósfera. El material probablemente proviene de reservorios de agua líquida bajo la superficie polar. La fuente de energía de este criovolcanismo quizá se debe a la existencia de la resonancia 2:1 con Dione, que produce deformaciones en el interior del satélite, produciendo calor. (Porco, et al., 2006).

2.4.4.3 *Tetis*

Es la tercer luna más grande de las lunas internas, (Thomas, 2010) cuya superficie está marcada por Odiseo, un gran cráter de 400 km y el gran sistema de cañones *Ithaca Chasma* que es concéntrico a Odiseo. El resto de la superficie está cubierta de cráteres de impacto con la excepción de algunas planicies y valles en el hemisferio opuesto a Odiseo. Se cree que este terreno suave se formó por la acción del material fundido que fue calentado por la energía producida en la antípoda del cráter Odiseo cuando el cuerpo que formó el cráter impacto en el satélite. La densidad de Tetis es de 0.985 g/cm^3 , un poco menor que la del agua, indicando que es casi completamente de hielo con una fracción muy pequeña de roca (Moore, et al., 2004).

2.4.4.4 *Dione*

La segunda luna más grande de las lunas interiores es Dione, una luna geológicamente activa, seguida solamente de Encélado. La superficie de Dione está tapizada de cráteres y una extensa red de valles y fracturas, que indican que el satélite quizás en el pasado presento algunas características tectónicas. En el hemisferio contrario a la dirección de avance en la órbita, las fracturas son más prominentes y de mayor albedo que la zona circundante, produciendo brillantes líneas. Posee además largas planicies de terreno suave probablemente

producidas por el material expulsado por criovolcanes. Las mediciones magnéticas de Cassini mostraron que Dione también provee de plasma a la magnetosfera (Thomas, 2010) (Moore, et al., 2004).



Figura 2.6 Fotografías a escala de la sonda Cassini. De izquierda a derecha: Mimas, Enceladus, Tethys y Dione (NASA, 2009-2016).

2.4.5 Alquiónides

Se les agrupa con este nombre debido a que las tres lunas que forman el grupo, Metone, Anthe y Palene, tienen el nombre de las hijas del gigante *Alquioneo*. Orbitan entre Mimas y Encélado.

Metone y Anthe poseen un arco delgado (anillo incompleto) en su órbita, mientras que Palene forma un anillo cerrado muy difuso. Sólo Metone ha sido fotografiada de cerca y posee una forma ovoide con pocos o ningún cráter (Figura 2.5).

2.4.6 Grandes lunas exteriores

Son lunas grandes que orbitan más allá del anillo E.

2.4.6.1 Rea

Es la segunda luna más grande de Saturno (Thomas, 2010). Es posiblemente el único satélite en el Sistema Solar con un anillo propio, aunque esto está sujeto a controversia, ya que el

anillo no fue fotografiado, sino detectado por la disminución de la cantidad de electrones alrededor de su zona ecuatorial durante la misión Cassini en 2005 (Jones, et al., 2008). La superficie de Rea está cubierta de cráteres de impacto, con algunas cuantas fracturas similares a las de Dione en el hemisferio contrario a la dirección de avance orbital. Presenta una delgada zona lineal más elevada en el ecuador, probablemente formada por el material de anillos presentes y pasados y dos grandes cráteres en el hemisferio contrario a Saturno, de 400 y 500 km diámetro llamadas Tirawa e Inktomi respectivamente. (Moore, et al., 2004).

2.4.6.2 Titán

Es la segunda luna más grande del sistema Solar, y la más grande de Saturno. Conocida principalmente por su densa atmósfera compuesta principalmente de nitrógeno con un poco de metano (Porco, et al., 2005). Su superficie es complicada de observar debido a su atmósfera que es bastante opaca, de un color amarillo suave, sin embargo se ha observado con la ayuda de los radares a bordo de Cassini: sus regiones meridionales están cubiertas por dunas negras compuestas de hidrocarburos helados (Lorenz, et al., 2006) y los polos están cubiertos por un sistema de lagos y ríos formados de metano y etano líquidos, siendo el único objeto en el Sistema Solar, además de la Tierra con líquidos en su superficie. (Stofan, et al., 2007).

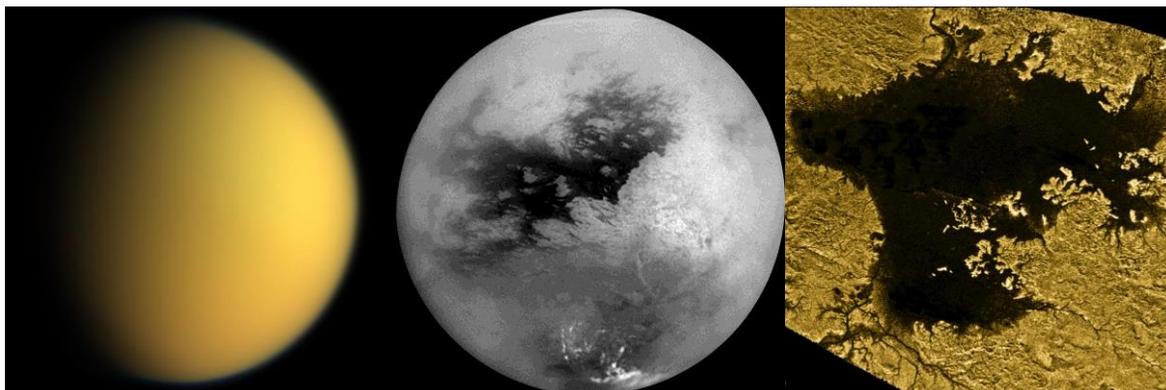


Figura 2.7 Varias imágenes de Titán, de izquierda a derecha: Fotografía de color real de Titán que muestra su gruesa y opaca atmósfera y su característico color amarillento, en medio, una composición de imágenes de radar que muestra la región oscura llamada Xanandú, formada por dunas de material oscuro. A la derecha, uno de los lagos del polo norte de Titán, también tomado mediante el radar (NASA, 2009-2016).

2.4.6.3 Hiperión

Es la luna más cercana a Titán, más pequeña y ligera que Mimas. Su superficie recuerda a la de una esponja por su forma irregular y porque cubierta de profundos cráteres. Es muy poco

densa, alrededor de 0.55 g/cm^3 que indica una porosidad cerca de 40% suponiendo una composición enteramente de agua, siendo el objeto más poroso en órbita alrededor de Saturno. Rota caóticamente, variando su eje de rotación 72° - 75° por día (Thomas, 2010) (Thomas, et al., 2007).



Figura 2.8 Fotografía de Hiperión, que muestra su superficie parecida a una esponja, porosa y cubierta de cráteres (NASA, 2009-2016).

2.4.6.4 Jápeto

Es la tercera luna más grande de Saturno y la luna grande más lejana al planeta. Orbita Saturno a 3.5 millones de km. Es la luna con mayor inclinación orbital 15.47° (Thomas, 2010). El hemisferio que va de frente la dirección de avance de su órbita es muy oscuro, casi negro, mientras que el hemisferio contrario es casi completamente blanco, por lo que se le conoce como la luna bicolor. Fue descubierta por Cassini, quien ya había teorizado que la luna era de dos colores al observar que desaparecía durante algunas observaciones. La región oscura se llama *Cassini Regio*, en su honor.

Su geografía está marcada por una elevada cordillera ecuatorial y por una superficie llena de cráteres, con 4 grandes impactos de 380 a 550 km de diámetro. El material oscuro se sabe que proviene del anillo de Febe (ver capítulo de los anillos), las partículas de este disco orbitan en dirección contraria a la órbita de Jápeto y colisionan en su cara frontal en su deriva hacia Saturno. (Denk, 2009).

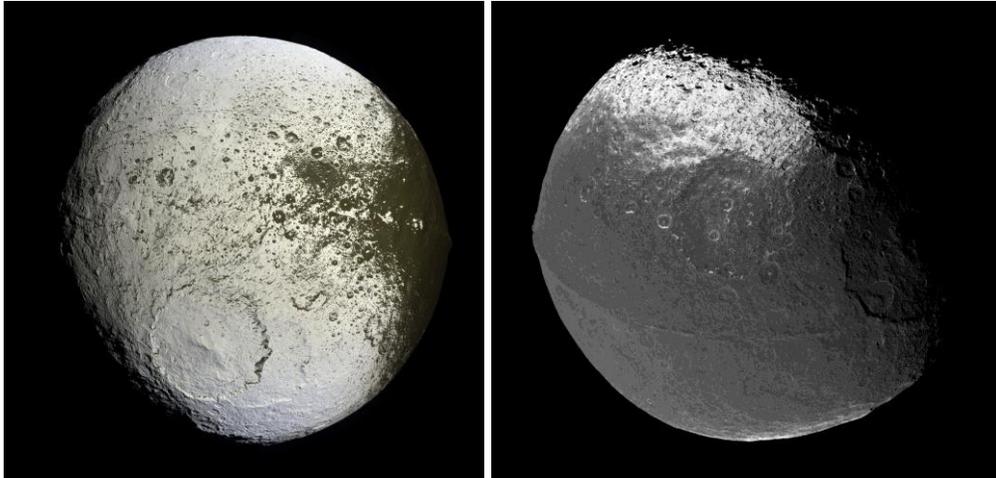


Figura 2.9 Los dos hemisferios de Jápeto, mostrando las diferencias en su coloración (NASA, 2009-2016).

2.4.7 Lunas irregulares

Son las lunas que se desplazan en orbitas altamente elípticas, frecuentemente en dirección retrógrada. Se creen que fueron capturadas. Se clasifican en tres grupos o familias colisionales que comparten características orbitales y de albedo (Jewitt & Haghhighipour, 2007).

2.4.7.1 Grupo Inuit

Compuesto de 5 lunas con órbita prógrada con distancias similares desde el planeta (186-297 R_{S} con R_{S} km, radio de Saturno) y con inclinación orbital entre 45-50°. Han sido nombradas como: Ijiraq, Kiviuq, Paaliaq, Siarnaq, y Tarqeq (Grav & Bauer, 2007).

2.4.7.2 Grupo Gálico

Agrupada 4 lunas en órbita prógrada con distancias entre 207 y 302 R_{S} , con inclinación orbital entre 35-40° y color similar. Sus nombres son Albiorix, Bebhionn, Erriapus, y Tarvos. Tarvos es la luna prógrada más lejana de Saturno (Grav & Bauer, 2007).

2.4.7.3 Grupo Nórdico

El grupo nórdico consta de todas las lunas retrógradas de Saturno y son: Aegir, Bergelmir, Bestla, Farbauti, Fenrir, Fornjot, Greip, Hati, Hyrrokkin, Jarnsaxa, Kari, Loge, Mundilfari, Narvi, Febe, Skathi, Skoll, Surtur, Suttungr, Thrymr, Ymir, S/2004 S 7, S/2004 S 12, S/2004 S 13, S/2004 S 17, S/2006 S 1, S/2006 S 3, S/2007 S 2, y S/2007 S 3 (Grav & Bauer, 2007).

2.4.7.4 Febe

Es una luna del grupo nórdico que destaca por su gran diámetro —para ser una luna en órbita irregular—de 213 km. Otra característica inusual es que es muy esférica. (Grav & Bauer, 2007). Las imágenes de la sonda Cassini muestran una superficie cubierta con cerca de 130 cráteres que exceden los 10 km de diámetro. Los datos espectroscópicos muestran que la superficie está compuesta de hielo, dióxido de carbono, filosilicatos, compuestos orgánicos y posiblemente algunos minerales de hierro. Se cree que Febe es un *centauro*, un planetóide originado en el cinturón de Kuiper y que en el pasado fue capturado por Saturno. (Verbiscer, et al., 2009).

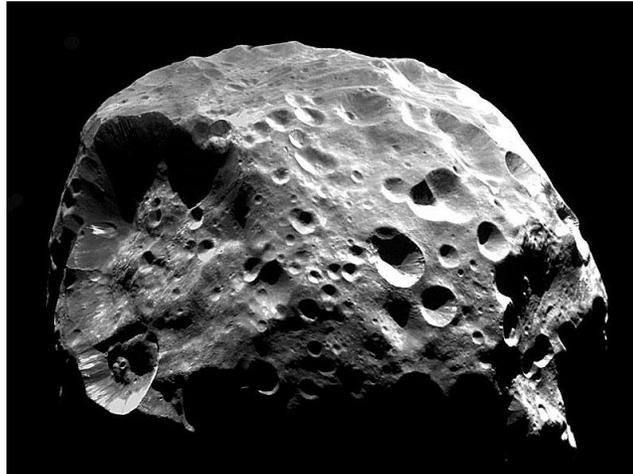


Figura 2.10 Fotografía de Febe que muestra superficie oscura cubierta de cráteres (NASA, 2009-2016).

Capítulo III

3 Anillos

Los anillos son la característica más notoria de Saturno, que ha intrigado a los astrónomos desde Galileo. Todos los planetas Jovianos dentro del Sistema Solar poseen anillos, pero los anillos de Saturno son los más densos y grandes.

Nuestro conocimiento de los anillos planetarios en general se ha visto refinando con la exploración espacial y varias han sido las misiones que han visitado Saturno. Las tres primeras sondas en alcanzar Saturno fueron la Pioneer 11 y las Voyager I y II. Estas tres naves espaciales fueron enviadas a explorar el Sistema Solar en la misma época, en la década de los 70's y 80's. Pioneer 11 tuvo su máximo acercamiento a Saturno, de 21,000 km, el 1 de septiembre de 1979, se le asignó una trayectoria similar a las que tendrían las sondas Voyager I y II que venían en camino, de modo que los datos obtenidos se pudieran comparar entre las tres sondas, además de que si por alguna razón, la sonda pasaba por algún peligro, se pudiese adaptar la trayectoria de las otras dos sondas para evitarlo. Con los datos de esta misión se descubrió a Epimeteo, que la sonda observó desde muy cerca, cartografió parte del campo magnético de Saturno, observó la temperatura de Titán, descubrió los anillos F y G de Saturno y confirmó la existencia del anillo E.

Las naves Voyager I y II contaban con instrumentos mejores que la Pioneer 11. La Voyager I fotografió los anillos: en el anillo F, descubrió su estructura en forma de trenza junto con Prometeo y Pandora, descubrió las manchas radiales (*spokes*) en el anillo B y en general ayudó a descubrir más satélites, a refinar y confirmar teorías y observaciones previas que se habían hecho con ayuda de los telescopios terrestres.

Sin embargo, las misiones Voyager I y II eran misiones destinadas a explorar los planetas jovianos de nuestro sistema, por lo que su encuentro con Saturno fue limitado, pasaron una vez y se fueron. Naturalmente la sonda Cassini, orbitó Saturno desde 2004 hasta 2017, destinada exclusivamente a Saturno, aportó una cantidad mucho mayor de información y con

ésta se han hecho una gran cantidad de descubrimientos con los datos que transmitió a la Tierra.

3.1.1 Clasificación de los anillos

En términos generales, los anillos de Saturno se clasifican en dos grupos: los anillos principales y los anillos tenues. Los anillos principales se extienden desde 66900 km hasta 140180 km desde el centro de Saturno, su grosor no es mayor de 10 metros y están compuestos de 99.9% agua con trazas de tolinas y silicatos. Los cuerpos que los forman (rocas) varían de tamaño desde 1 cm hasta 10 metros. La masa estimada de los anillos es alrededor de 3×10^9 kg, una fracción muy pequeña de la masa total de Saturno y un poco menor que la masa total de Mimas.

Los anillos tenues, en cambio, son anillos muy transparentes, compuestos por partículas de polvo de menos de 100 micras de radio. Las colisiones entre las partículas que los forman son muy raras y las fuerzas no gravitacionales modulan su dinámica.

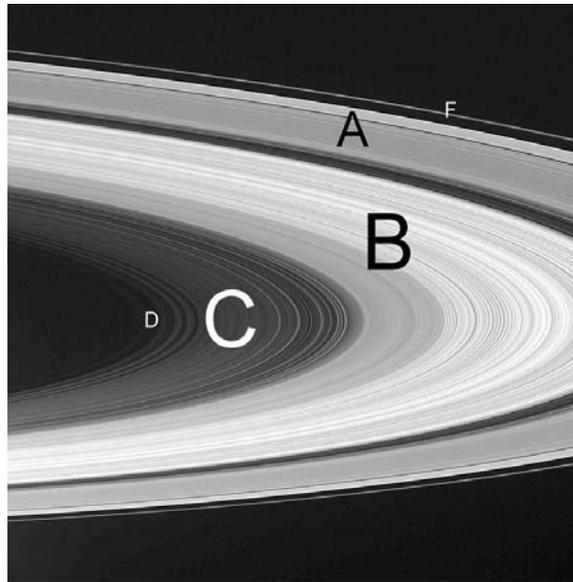


Figura 3.1 Los anillos principales de Saturno (NASA, 2009-2016).

3.1.2 Estructura de los anillos

3.1.2.1 Estructura a gran escala

La clasificación tradicional de los anillos, en la cual se nombraba con una letra del abecedario a las regiones brillantes separadas por zonas oscuras, ya no da abasto a la enorme cantidad de estructuras que se han descubierto en los anillos gracias a la exploración espacial. Sin embargo, se continua usando esta nomenclatura para agrupar características que conforman los anillos en estas regiones: los anillos densos o principales son A, B, C y F mientras que los anillos tenues son los D, E y G. La división de Cassini, que en realidad también es una región de anillos, sólo que mucho menos brillante que los anillos que separa, divide a los anillos A y B, esta brecha también se considera una región de anillos densos. La división de Roche separa los anillos A y F, y contiene material tenue parecido al de los anillos D y G (Figura 3.1).

3.1.2.2 Estructuras recurrentes

Los anillos poseen ciertas estructuras comunes debido a las similitudes de las condiciones que los rodean. Entre las estructuras más comunes son las ondas de densidad, producidas por la interacción de los anillos con los satélites vecinos. La mayoría de estas ondas se producen por resonancias, un fenómeno que ocurre cuando un cuerpo en órbita tiene un periodo que se puede expresar en múltiplos enteros de otro cuerpo en órbita. Este tipo de resonancias genera ondas longitudinales y transversales en los anillos. Fueron utilizadas para explicar la rotación de las galaxias, pero su teoría también se ha aplicado a los anillos, (Goldreich & Tremaine, 1980). Las resonancias producidas pueden ser más intensas si corresponden a zonas donde uno o más satélites producen una resonancia, y pueden resultar en ondas espirales que se extienden decenas de kilómetros en dirección radial o transversal (Figura 3.2).

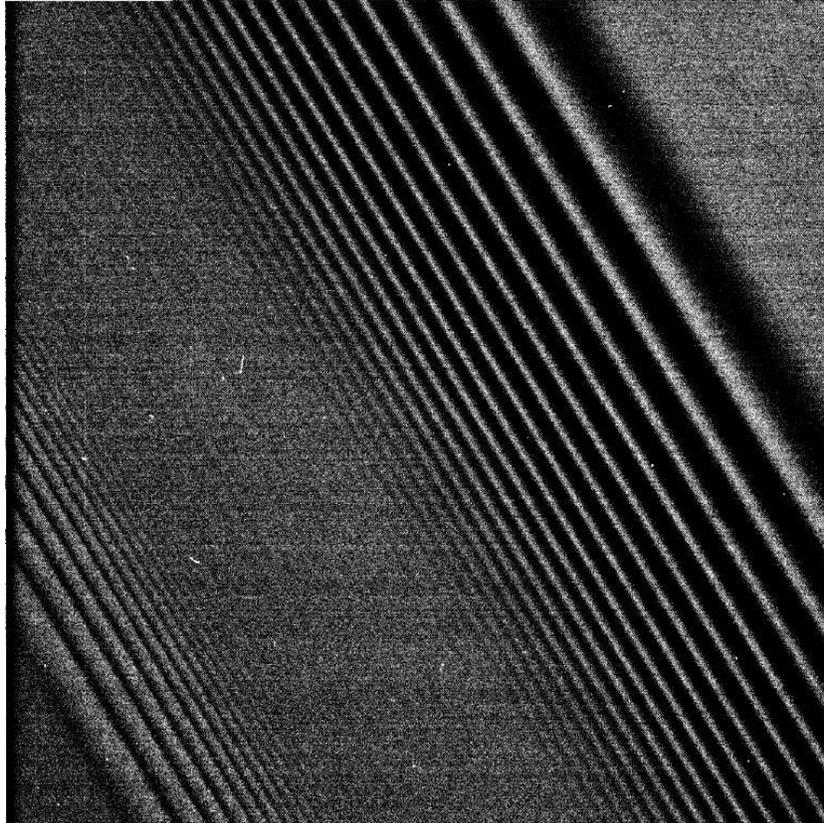


Figura 3.2 Fotografía de la sonda Cassini del anillo A en la que se aprecian las ondas de densidad posiblemente espirales (NASA, 2009-2016).

Otra característica que se puede atribuir en algunos casos a los satélites vecinos a los anillos es la creación de bordes bien definidos, o bien brechas entre los anillos. A los satélites que producen este tipo de efecto se les llama *pastores* como se mencionó en el capítulo anterior. El fenómeno ocurre cuando las partículas de los anillos son perturbadas por acción de la gravedad del satélite, alterando la excentricidad de la órbita del material. El material que va a la deriva y se encuentra cerca del satélite, por lo regular es desviado fuera del anillo, o bien absorbido por el satélite (Figura 3.3).

Un fenómeno también común en los anillos es la generación de “estelas”, también es producido por la acción de los satélites pastores y se trata de una onda de densidad que permanece estacionaria respecto al satélite pastor (Figura 3.3).

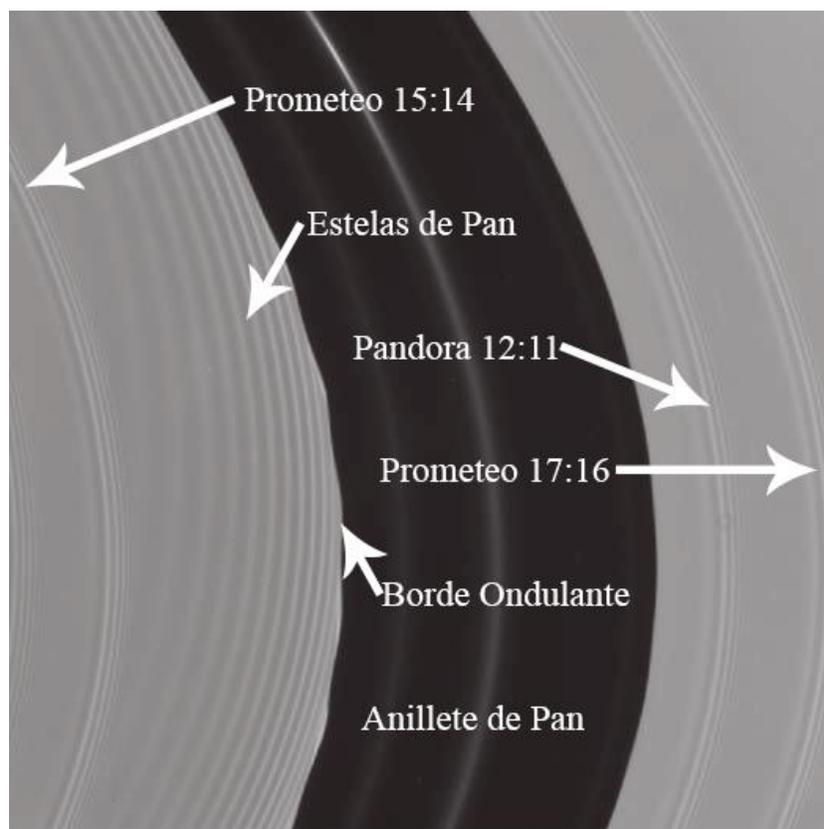


Figura 3.3 La brecha de Encke, de 320 km fotografiada por la sonda Cassini. En el centro se observa el anillete de Pan, región de polvo que corresponde a la órbita de la luna homónima. Se observan las estelas que Pan produce. También se indican las resonancias de Lindblad de las lunas Prometeo y Pandora que corresponden a regiones de menor densidad (NASA, 2009-2016).

Las lunas pastoras, debido a su masa, producen brechas, pero cuando se trata de lunetas, (satélites pequeños que orbitan entre los anillos), éstas no pueden limpiar una brecha completa. En lugar de esto, producen estructuras llamadas hélices: una gran masa entre el anillo comenzará a arrojar el material cercano detrás y enfrente de su trayectoria orbital, debido a la acción de la cizalla kepleriana. Opuesto a este proceso está la viscosidad cinemática, que hace que, con el tiempo, el material del anillo vuelva a invadir la zona limpiada por la luneta (Tiscareno, et al., 2006).

3.2 Anillos principales

3.2.1 Anillo A

El anillo A es el segundo anillo más ancho y brillante, sólo precedido por el anillo B. Las características más notorias del anillo, son una multitud de ondas de densidad en la zona de resonancia de Lindblad con las lunas cercanas, principalmente Prometeo y Pandora y las dos brechas en el borde exterior del anillo, limpiadas por sus lunas pastoras, la Brecha de Encke, pastoreada por Pan y la Brecha de Keeler, por Dafne. El borde exterior del anillo se encuentra en la resonancia 7:6 con los satélites coorbitales Jano y Epimeteo. La región más exterior del anillo A (desde la brecha de Encke al borde exterior), está particularmente poblada con ondas de densidad producidas por las resonancias con Prometeo y Pandora. La región central de la anillo, entre la brecha de Encke y la onda de densidad de Jano/Epimeteo: 4:3 a 125,270 km está relativamente libre de otras subestructuras, solamente aparecen las ondas de densidad de Mimas (resonancia 5:3) y otras ondas de densidad menores. En esta zona es donde se observaron las hélices correspondientes a las lunetas de 100 m (Tiscareno, et al., 2006). Cerca del borde interior, el anillo A exhibe la mayor opacidad que en el resto del cuerpo que lo forma, así como fluctuaciones en la densidad, este fenómeno aún no se explica. La onda de densidad que forma Pandora (resonancia 5:4) está en el borde interior y es la más larga y grande de todas las ondas de densidad salvo la que forma Jano (resonancia 2:1) en el anillo B. Justo dentro del borde interior del anillo está el escalón asociado a la profundidad óptica y después la rampa que representa la transición a la División de Cassini.

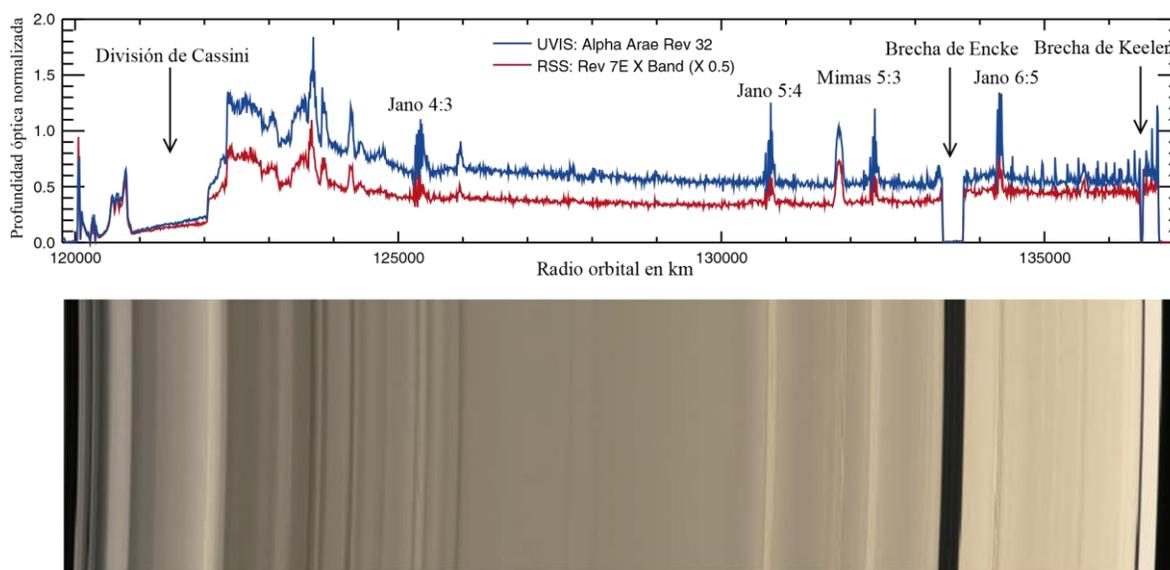


Figura 3.4 El anillo A y la división de Cassini exterior tomado por el Espectrógrafo de Imágenes Ultravioleta (UVIS) y el Subsistema de Radio (RSS) así como un mosaico de imágenes del Sistema de Imágenes de la sonda Cassini. Se muestran las características principales del anillo (NASA, 2009-2016).

3.2.2 Anillo B

Es el anillo más grande y denso de todos, contiene una gran cantidad de la masa total del sistema de anillos (2.7×10^{19} kg). Está compuesto por fragmentos de 30 a 20 cm de diámetro, con un espesor promedio de 10 m. Sin embargo, su estructura no está tan bien caracterizada como la de los anillos A o C, debido en gran parte, a que es muy opaco y esto limita las observaciones por ocultación (cuando se observan los anillos con el Sol o una estrella detrás). Las imágenes que capturó la sonda Voyager mostraron la existencia de regiones coloreadas sutilmente: dos bandas rojas en los 99,000 y 101,000 km y una banda azul a los 109,000 km (Estrada & Cuzzi, 1996).

Los datos de Cassini han incrementado en gran medida la información que se tiene del anillo B. Para su estudio, se ha propuesto dividir el anillo B en 4 subregiones llamadas B1 a B4 (Figura 3.4), dependiendo de la profundidad óptica: las regiones B1 y B2 tienen transparencia de magnitud baja a media, la región central B3, también llamada a veces núcleo del anillo es la región más opaca, y finalmente la región B4 que está en un punto intermedio de opacidad entre el anillo B1 y B2.

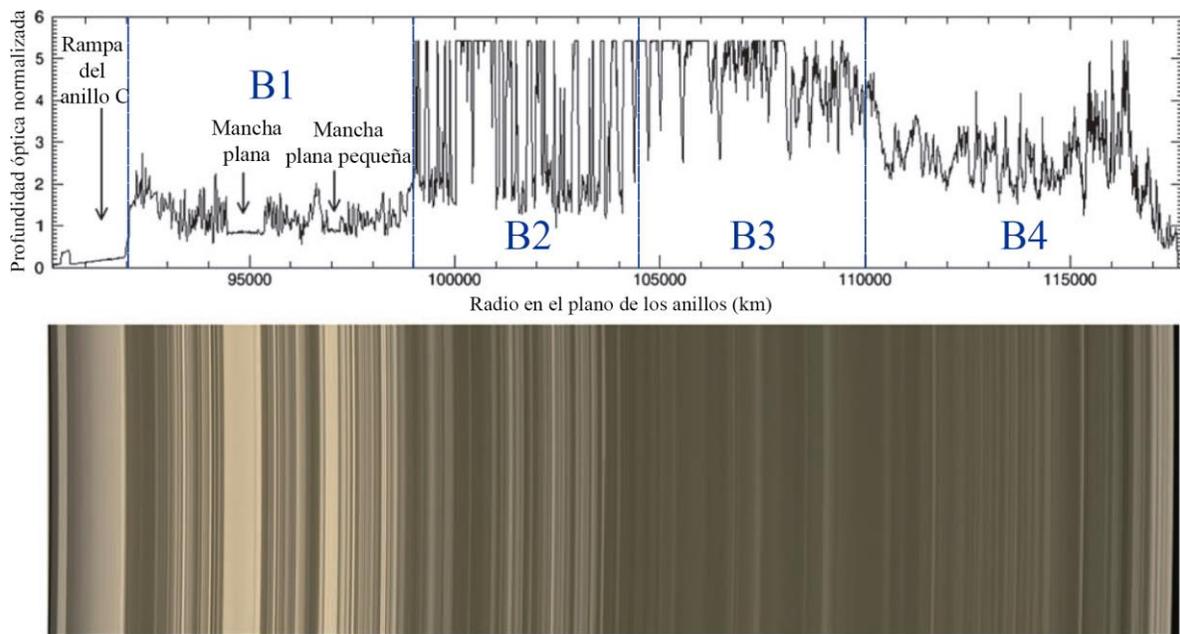


Figura 3.5 El anillo B y la rampa del anillo C, gráfico de los datos del Espectrógrafo de Imágenes Ultravioleta (UVIS) e imagen formada de un mosaico de fotografías del Sistema de Imágenes ISS de la sonda Cassini (NASA, 2009-2016).

La zona más interior del anillo B, la región B1, es relativamente transparente y se extiende desde el interior del anillo entre 92,000 y 99,000 km. A partir de los primeros 700 km, donde la estructura es irregular y la profundidad óptica es mayor que 1.5, esta región tiene una profundidad óptica media de alrededor de 1.1, caracterizada por un patrón alternante interrumpida por dos zonas planas, donde la opacidad se mantiene constante. Si se comparan los datos de la ocultación estelar de la Voyager con los datos de Cassini, se encuentra que la estructura ondulante de la región B1 ha permanecido virtualmente sin cambios en los últimos 25 años (Nicholson, et al., 2008). La región B1 es el hogar de la onda de densidad más prominente de todo el anillo B, producida por la resonancia 2:1 entre Jano y Epimeteo.

La zona B2 inicia a una distancia radial respecto al centro de Saturno de 99,000 km, donde la profundidad óptica cae abruptamente. Entre un radio de 104,100 y 110,000 km se encuentra la zona con mayor profundidad óptica de todos los anillos, es aquí donde inicia la zona B3. (Spitale & Porco, 2010)

La región B4, es la región exterior del anillo B y comienza desde los 110,300 km, la profundidad óptica decrece paulatinamente, pero lo hace de manera irregular sin ninguna estructura periódica. El borde exterior del anillo B, está controlado por la resonancia con

Mimas 2:1 a 117,555 km respecto al centro de Saturno. En 2009 se observó un cuerpo incrustado en esta zona a 480 km del borde exterior, se trata de una pequeña luneta, descubierta por la sombra que producía (Spitale & Porco, 2010), (Figura 3.6).

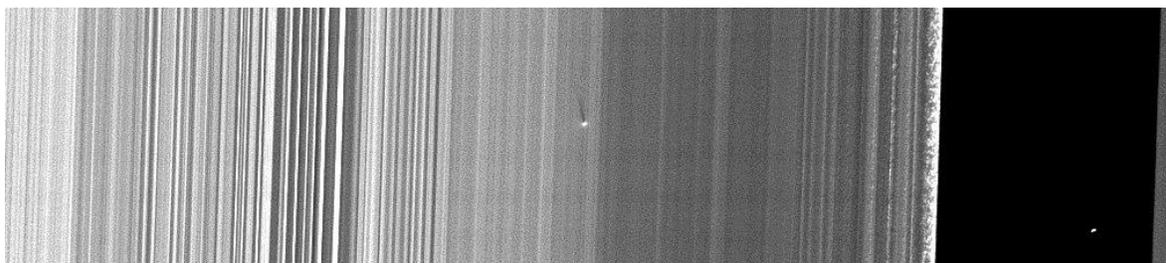


Figura 3.6 Fotografía de la luneta encontrada en el anillo B, denominada S/2009 S 1, situada a 480 km del borde exterior del anillo B, se observa también la sombra que proyecta (NASA, 2009-2016).

Presenta algunas manchas negras, conocidas como cuñas radiales (*spokes*), que se cree se forman por la repulsión electrostática de las partículas de polvo microscópicas finas que forman el anillo. Estos patrones oscuros rotan sincrónicamente con la magnetósfera de Saturno. Se cree que la carga proviene de impactos de micrometeoroides en los anillos o de relámpagos provenientes de la atmósfera de Saturno (Dougherty, et al., 2009).

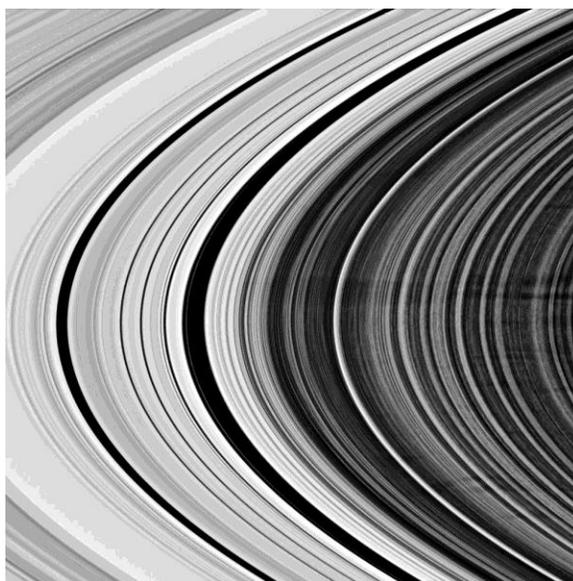


Figura 3. 7 Manchas oscuras (spokes) en la parte más distante del anillo B (NASA, 2009-2016).

3.2.3 División de Cassini

La división de Cassini es una región de menor profundidad óptica entre los anillos A y B. Originalmente se creía que esta zona se trataba de un espacio vacío, sin embargo la división se asemeja mucho al anillo C, y ahora se sabe que su apariencia oscura sólo se debe al fuerte contraste que existe entre ésta y los anillos mucho más densos A y B. La división de Cassini alberga ocho brechas y bastantes anilletes. En el borde interior con el anillo B está la brecha de Huygens de 417 km de ancho, la brecha más ancha del sistema de anillos, que corresponde a la resonancia de Lindblad 2:1 con Mimas, la brecha alberga dos anilletes delgados y un anillo polvoso, que en conjunto se le llama el anillete de Huygens. El borde interno limita con el anillo A y la profundidad óptica tiene una característica forma de rampa (Figura 3.8), (Colwell, et al., 2009).

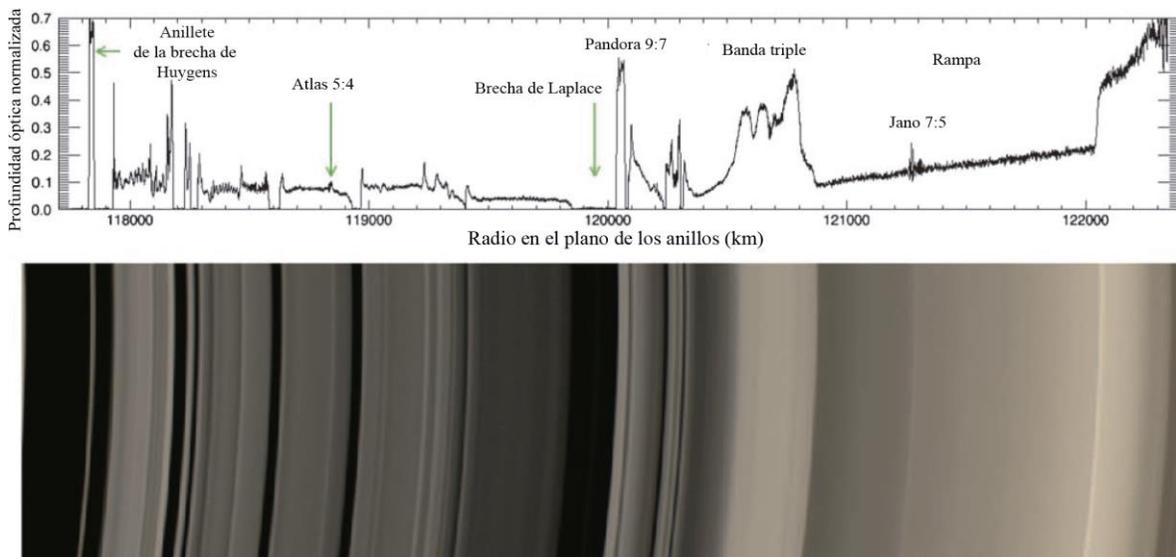


Figura 3.8 División de Cassini, gráfico de los datos del Espectrógrafo de Imágenes Ultravioleta (UVIS e imagen formada de un mosaico de fotografías del Sistema de Imágenes ISS de la sonda Cassini (NASA, 2009-2016).

3.2.4 Anillo C

Está compuesto principalmente por rocas que varían en diámetro desde 1 cm hasta 10 m, además de polvo micrométrico en mucha menor cantidad, tiene un espesor vertical promedio de 5 m y una masa de 1.1×10^{18} kg.

Su apariencia está dominada por una serie de delgadas, y brillantes bandas, separadas por varias brechas estrechas, superpuestas en un fondo cuya profundidad óptica oscila, como se ve en Figura 3.9. El anillo presenta unas zonas, únicas en el sistema de anillos, llamadas mesetas, en el tercio central y al final del anillo (yendo de adentro hacia afuera), caracterizadas por unos bordes bien definidos y una parte superior en forma de rampa o de “U”, generando regiones opacas alternadas en el fondo suave del anillo; en total son 11 mesetas. Posee además dos anilletes, el anillete de Titán y el de Maxwell y 5 brechas estrechas.

Se han encontrado ondas y resonancias en el anillo, las más fuertes producen brechas, algunas de las cuales producen anilletes incrustados en éstas. En el anillo C, no se han observado lunetas que puedan haber acretao este material (Colwell, et al., 2009).

Al igual que la división de Cassini, existe una rampa de transición entre el anillo C y el anillo B. Se cree que estas rampas se deben al transporte balístico del material del anillo B al anillo C (Colwell, et al., 2009).

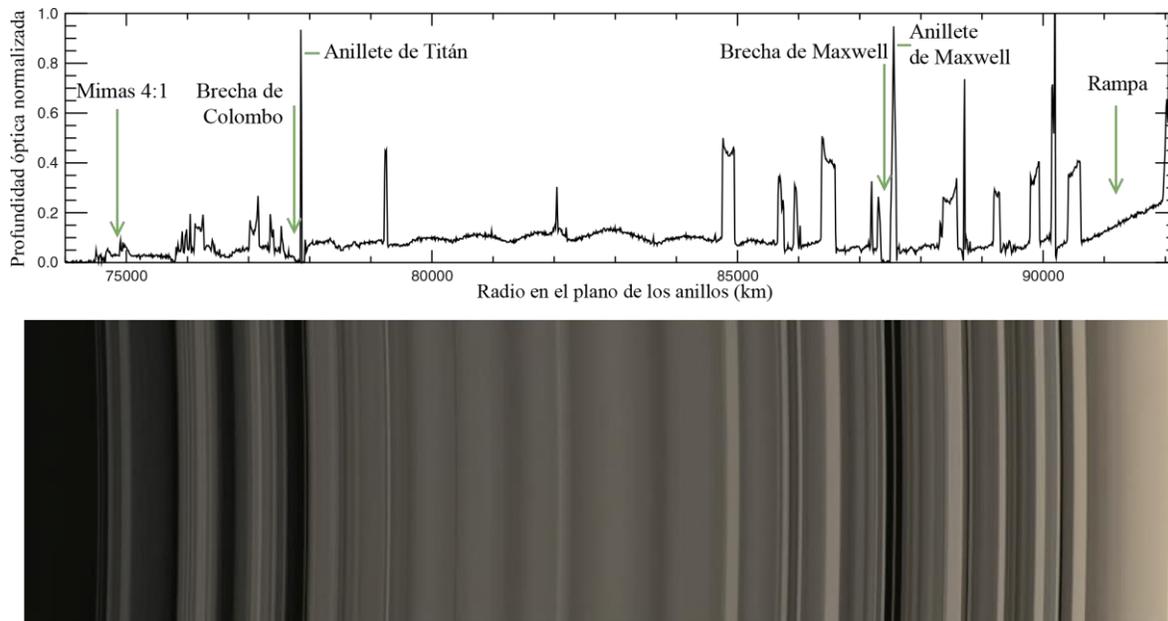


Figura 3.9 Gráfico del UVIS y mosaico de imágenes del ISS de la sonda Cassini, mostrando el anillo C y sus principales estructuras (NASA, 2009-2016).

3.2.5 Anillo F

El anillo F es el tema central de esta tesis, por lo que se le dedicará todo el siguiente capítulo.

3.3 Anillos tenues

Los anillos tenues se caracterizan por ser mucho más transparentes que los anillos principales. Están formados por partículas de menos de 100 μm de radio, por lo que las colisiones entre partículas son muy escasas y son mucho más sensibles a fuerzas no-gravitacionales. Ejemplos de anillos tenues son G, E y D. Algunos consideran al anillo F como un anillo tenue, porque es mucho más transparente que los otros anillos principales.

3.3.1 Anillo D

El anillo D es el anillo más próximo a Saturno, y es uno de los anillos más complejos de los anillos tenues. Se han encontrado algunas diferencias de las observaciones de la Cassini comparadas con las de las Voyager. Las Voyager detectaron tres características designadas como anilletes en esta región junto con variaciones sutiles en la brillantez del anillo (Showalter, 1996). Al menos dos de estos anilletes fueron vistos en las imágenes de la Cassini, pero sus datos indican que han ocurrido cambios importantes en los últimos 25 años (Hedman, et al., 2007). Por ejemplo, la característica más brillante que observaron las sondas Voyager en el anillo D fue un anillete delgado, de menos de 40 km de ancho, ubicado a 71,710 km respecto al centro de Saturno, designado D72. Las imágenes de la sonda Cassini no detectaron ninguna estructura a esa distancia, en su lugar, observaron una región más ancha, de cerca de 300 km y centrada en 71 600 km respecto al centro del planeta, con un brillo máximo no mayor que el de otras estructuras en el anillo. Su conexión con el anillete D72 original no es clara, pero tanto como que el anillete haya desaparecido o se haya transformando en un nuevo anillete, sigue siendo uno de los cambios más drásticos en la estructura de este anillo observado hasta la fecha, (Figura 3. 10).

Los cambios en el anillo D no sólo incluyen variaciones en el brillo, sino también cambios en la distribución de tamaño de las partículas. En general, las regiones más cercanas a Saturno tienden a tener una mayor fracción de partículas pequeñas (1–10 μm), respecto a las partículas grandes (10–100 μm) comparadas con las regiones más lejanas.

Entre las nubes más altas de Saturno y el anillo D existe una separación aparentemente vacía de 5000 km.

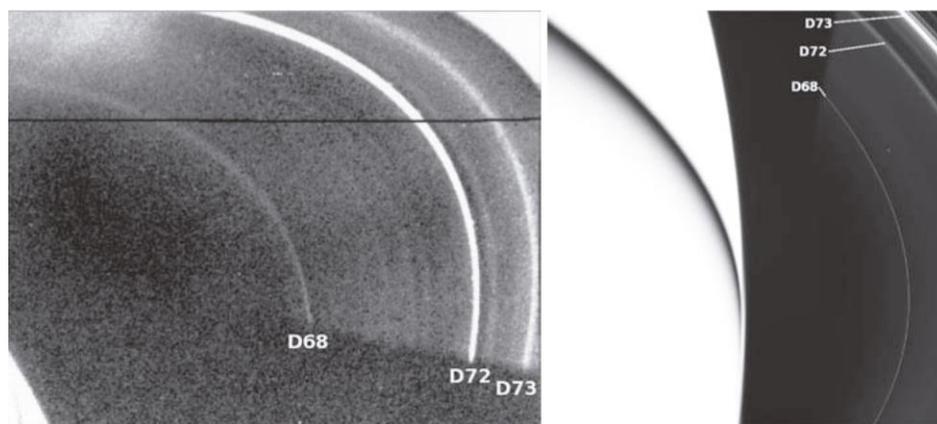


Figura 3. 10 A la izquierda, fotografía de la sonda Voyager I del anillo D, mostrando algunos de los anilletes que se veían en ese entonces, se aprecia el anillito D72 como la estructura más brillante de la imagen (NASA, 1981). A la derecha, fotografía de la sonda Cassini mostrando la misma región del anillo D (desde otro ángulo de fase) donde se aprecia cómo el anillito D7, ahora es más tenue. (NASA, 2009-2016).

3.3.2 División de Roche

No debe confundirse con el límite de Roche, del cual se habla en la introducción histórica, fue nombrada así en honor al científico Édouard Roche, del quien también se habla en la introducción.

Es la separación entre el anillo A y el F, originalmente se pensaba que se trata de una región vacía, pero las sondas Voyager detectaron material y la sonda Cassini observó estructuras en esta zona. (Burns, et al., 1984).

A pesar de que la estructura de Roche es exterior a los anillos principales y el anillo D sea interior, están conectadas por una dinámica común. En el interior de la División de Roche y en el centro del anillo D existen patrones complejos que pueden ser descompuestos en una serie de bandas oscuras y claras alternantes que se cree se deben a resonancias con perturbaciones periódicas. También se cree que estas perturbaciones son forzadas y se deban a fuerzas no gravitacionales, principalmente a su interacción con la magnetósfera de Saturno.

3.3.3 Anilletes entre las brechas

Un gran número de brechas vacías pueden ser encontradas entre los anillos principales de Saturno. Cuatro de estas brechas contienen anilletes transparentes formados, principalmente, de partículas pequeñas ($<100\mu\text{m}$). A pesar de que contienen muy poco de la masa total de los anillos, los anilletes son interesantes porque arrojan pistas del mecanismo que crea las brechas. En orden creciente de distancia desde Saturno, las brechas que contienen anilletes son: la brecha de Maxwell en el anillo C ($\sim 84,420$ km desde el centro de Saturno), las brechas de Huygens y Laplace en la división de Cassini ($\sim 117,740$ km y $\sim 119,940$ km respectivamente) y la Brecha de Encke en el anillo A ($\sim 133,590$ km). (Colwell, et al., 2009)

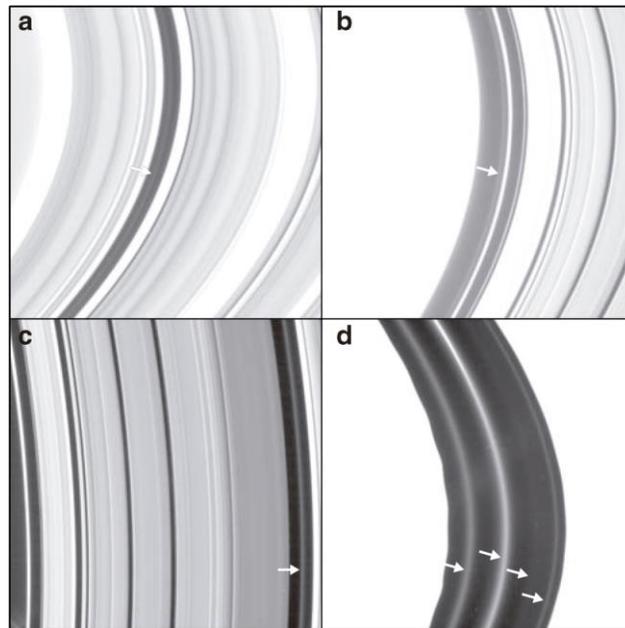


Figura 3. 11 Anilletes ente las brechas de los anillos de Saturno: a) Fotografía de la brecha de Maxwell en el anillo C, b) Fotografía centrada en la brecha de Huygens, en el borde exterior del anillo B. c) Fotografía que incluye la brecha de Laplace en la División de Cassini. d) Fotografía de la brecha de Encke. Las flechas pequeñas señalan los anilletes que existen entre estas brecha (Porco, et al., 2005), (NASA, 2009-2016).

Las brechas de Maxwell, Huygens y Laplace contienen un solo anillo de polvo, muy uniforme dado que no muestran grandes variaciones en el brillo a lo largo de su longitud. En cambio, el material polvoso en la brecha de Encke tiene una estructura mucho más compleja, organizada en tres anilletes delgados (nombrados como anilletes interior, central y exterior de la brecha de Encke) (McFadden, et al., 2007). Los tres anilletes contienen “grumos”,

localizados en regiones que por lo regular son un orden de magnitud más brillante que el promedio del anillote y están asociados a estructuras radiales llamadas “pliegues”. La distribución y morfología de estos grumos en cada anillote varían, pero se han mantenido de manera persistente a lo largo de la misión Cassini (Burns, et al., 2005).

3.3.4 Anillo G

Entre el anillo F y el núcleo del anillo E existen varios anillos relativamente delgados. El más brillante y conocido es el anillo G, localizado aproximadamente entre 165,000 km y 175,000 km desde el centro de Saturno. Los límites precisos del anillo son difíciles de definir debido a que sus bordes se mezclan suavemente con el anillo E. Éste anillo es asimétrico, con un borde interior bien definido y un borde exterior muy difuso. Cerca del borde interior del anillo a 167,500 km, un arco de material brillante se extiende a lo largo de 60° , con un pico en el brillo varias veces más alto que el fondo del anillo G y un ancho radial de 250 km, (Figura 3.12). El arco se encuentra cerca de la resonancia 7:6 con Mimas, sugiriendo que esto es lo que produce el confinamiento del material. Las fotografías de Cassini descubrieron que en el arco, la región más brillante del anillo, existe una luneta de 100 km de diámetro llamada Egeón, cuya erosión por acción de los micrometeoroides, quizá sea el origen del arco (Hedman, et al., 2007).

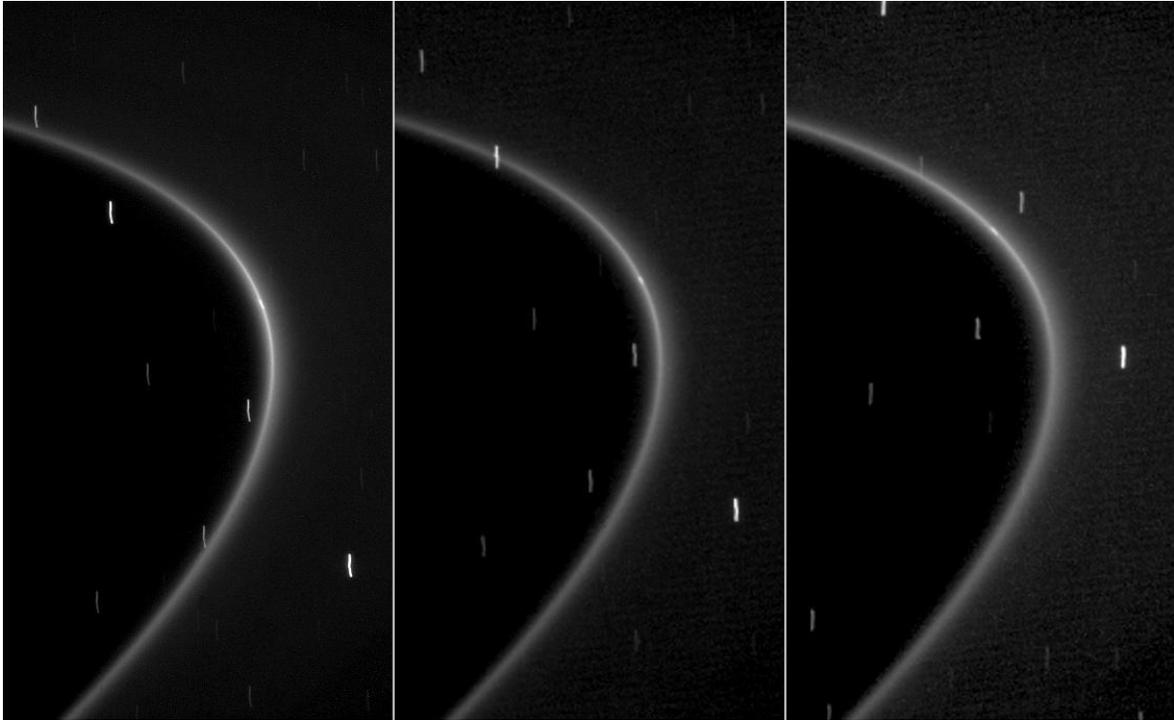


Figura 3.12 Fotografías del arco del anillo G a distintos tiempos, se observa cómo avanza la región más luminosa. En el centro del arco está la luneta Egeón de 1 km de diámetro (NASA, 2009-2016).

3.3.5 Otros anillos y arcos finos

Tal como Egeón produce un arco en el anillo G, se han encontrado otros anillos delgados y arcos cuyo material proviene de la desintegración de pequeñas lunas (Burns, et al., 1999). A los anillos descubiertos, de este modo, ya no se les denomina con una letra del abecedario, sino que simplemente se les llama anilletes o arcos a las estructuras anulares incompletas al que están asociados. Se han observado principalmente en la región entre el anillo F y Encélado, asociados a las lunas coorbitales Jano y Epimeteo y otro anillete que se existe en la pequeña luna Palene, (Porco, et al., 2006). Mediciones *in situ*, también han probado que Metone y Anthe tienen un arco de material tenue (Figura 3.13).

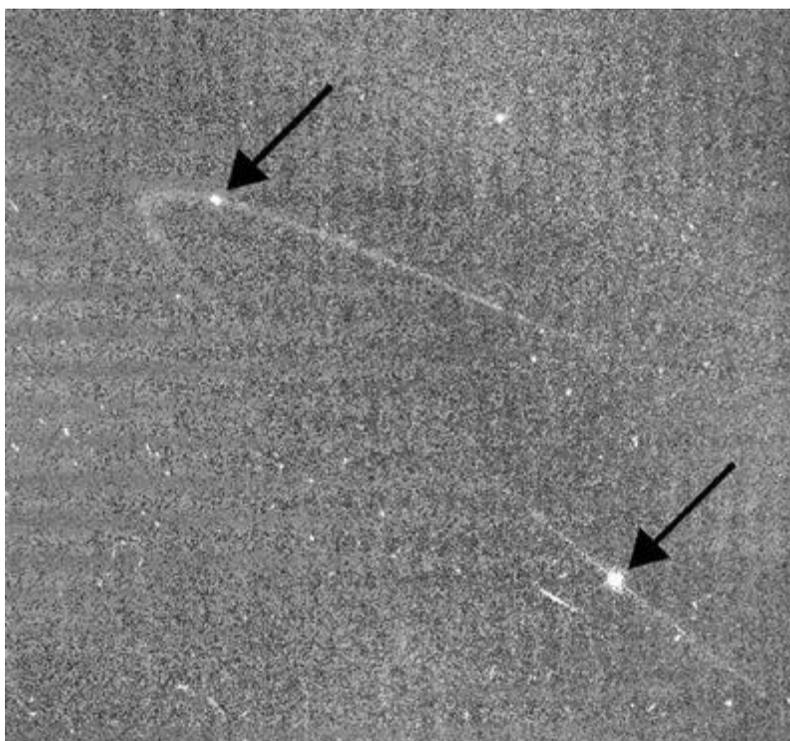


Figura 3.13 Imagen mostrando los arcos asociados a Anthe y Metone (flecha superior e inferior respectivamente. (NASA, 2009-2016).

3.3.6 Anillo E

El anillo E es el segundo anillo más extenso en el Sistema Solar, envuelve a los satélites de hielo Mimas, Encélado, Tetis, Dione Rea y Titán. Dado que su punto máximo de brillo ocurre cerca de la órbita de Encélado, antes de la llegada de la sonda Cassini se propuso que la luna era la principal fuente de partículas del anillo E, (Baum, et al., 1981). La sonda Cassini, obtuvo datos sobre la composición y el tamaño de las partículas en su trayectoria a través del anillo E. Estos datos, junto con el descubrimiento de que Encélado es una luna geológicamente activa, han confirmado que las plumas del polo sur del satélite son la fuente principal del anillo E, (Figura 3.14), (Spahn, et al., 2006) .

Principalmente está compuesto de partículas de polvo, de hielo con muy pocas trazas de silicatos y compuestos orgánicos, con partículas de hasta 10 μm de diámetro. Carece de estructuras macroscópicas bien definidas, sin embargo, la densidad, tamaño y composición de las partículas cambia en diferentes regiones del anillo y dado que sus partículas pueden

llegar a ser muy pequeñas, interactúa fuertemente con la magnetósfera de Saturno, que carga eléctricamente, una gran parte de las partículas del anillo, afectando su dinámica. Por ejemplo, se cree que la región más brillante del anillo E no ocurre exactamente en la órbita de Encélado debido a la presión que el plasma magnetosférico ejerce sobre el anillo, comprimiéndolo un poco. El material del anillo, junto con el resto del material expulsado por Encelado es la principal fuente de plasma de la magnetósfera de Saturno (Porco, et al., 2006).

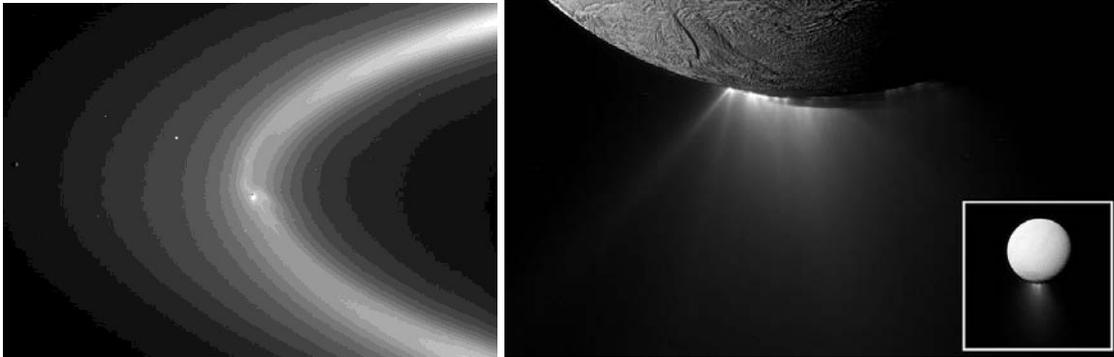


Figura 3.14 A la izquierda, el anillo F, la zona más brillante es Encelado, a la derecha, criovolcanes en los “zarpazos de tigre” del polo sur de Encelado. Fotografías de la sonda Cassini (NASA, 2009-2016).

Tabla 2.3 Medidas de los anillos de Saturno, en kilómetros, en radios de Saturno ($R_S = 60,330 \text{ Km}$) y en radios de la Tierra ($R_T = 6,371 \text{ km}$) por comparación. Datos de la NASA.

Nombre de la estructura	Distancia desde Saturno				Ancho	
	En km		En R_S		En km	En R_T
Anillo D	66,900	— 74,510	1.11	— 1.24	7,500	1.2
Anillo C	74,658	— 92,000	1.24	— 1.52	17,500	2.7
Anillo B	92,000	— 117,580	1.52	— 1.95	25,500	4.0
División de Cassini	117,580	— 122,170	1.95	— 2.03	4,700	0.7
Anillo A	122,170	— 136,775	2.03	— 2.27	14,600	2.3
División de Roche	136,775	— 139,380	2.27	— 2.31	2,600	0.4
Anillo F	140,180		2.32		30—500	0.005—0.08
Anillo de Jano y Epimeteo	149,000	— 154,000	2.47	— 2.55	5,000	0.8
Anillo G	166,000	— 175,000	2.75	— 2.90	9,000	1.4
Arco de Metone	194,230		3.22		¿?	¿?
Arco de Anthe	197,665		3.28		¿?	¿?
Anillo de Palene	211,000	— 213,500	3.50	— 3.54	2,500	0.4
Anillo E	180,000	— 480,000	2.98	— 7.96	300,000	47.1
Anillo de Febe	4,000,000	— 13,000,000	66.30	— 215.48	¿?	¿?

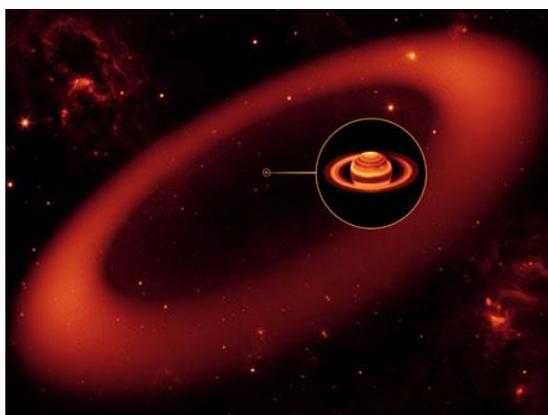


Figura 3.15 Imagen artística del anillo de Febe. ScienceNews.

3.3.7 Anillo de Febe

Se descubrió en 2009, por observaciones en el infrarrojo del telescopio Spitzer. Se extiende en una órbita de aproximadamente 59 radios de Saturno, con una inclinación de 5° con respecto a Saturno, que corresponde a la órbita de Febe. Se cree que el anillo está formado por material arrancado de Febe por la radiación solar, ya que el satélite está lejos de la zona protegida por la magnetósfera de Saturno, (Cowen, 2009).

3.4 Formación de los anillos principales

Los anillos principales, A a F, tienen un origen muy difícil de explicar, debido a que no tienen una causa directa, como los que provienen de la desintegración de satélites. La primera teoría de la formación de anillos fue propuesta por Édouard Roche que propuso en el siglo XIX que, los anillos se formaron de la desintegración de una luna hipotética llamada *Veritas*. Roche explicó la separación de *Veritas* por acción de las fuerzas de marea: la luna debía orbitar en el límite de Roche, que es la zona alrededor de un objeto astronómico donde un objeto compuesto únicamente por hielo y sostenido por su propia gravedad debe desintegrarse al ser superada la fuerza de atracción gravitacional por las fuerzas de marea (Weisstein, 2007).

Otra variación de esta teoría es que la luna original fue desintegrada por acción de múltiples colisiones con cometas, cuando éstos eran más comunes en el periodo denominado como “Bombardeo intenso tardío”.

Otra teoría es la que se resume en el artículo de Choi 2010 que propone una mezcla de las dos teorías anteriores: los anillos provienen del manto de hielo de una luna de tamaño similar al de Titán que orbitaba dentro del límite de Roche, lo que produjo que el hielo se arrancara del satélite de forma gradual, cayendo en forma espiral hacia el planeta durante el periodo en que Saturno estaba rodeado de material gaseoso, produciendo anillos que originalmente eran mucho más masivos que ahora. Por acreción, parte de éstos formaron los satélites internos explicando la carencia de material rocoso en la superficie de estas lunas.

3.4.1 Estabilidad de los anillos

Al ser el anillo compuesto de una inmensa cantidad de partículas, habría colisiones; en cada una de estas colisiones ambas partículas perderán energía de movimiento de traslación alrededor de Saturno. Gracias a la ley de la gravitación universal de Newton, sabemos que si una partícula pierde energía de movimiento de rotación, ésta emigra a una órbita más cercana. Finalmente esto implicaría que las partículas terminarían colisionando con el planeta, mientras que otras partículas terminarían alejándose del mismo.

Se han hecho cálculos con base en las colisiones entre partículas y las pérdidas de energía de las mismas; suponiendo que los anillos de Saturno se formaron al mismo tiempo que el planeta, en tres mil quinientos millones de años deberían haber caído en Saturno, (Cuzzi, et al., 2009).

Se han considerado dos posibles razones de la existencia de estas formidables estructuras:

1. Los anillos son de formación reciente.
2. Hay algo que ayuda a frenar la caída de las partículas a Saturno.

Se estima que si los anillos de Saturno fueron creados por la desintegración de un satélite pequeño durante el periodo intenso de bombardeo tardío (LHB), los anillos podrían haber sobrevivido hasta hoy.

Capítulo IV

4 Anillo F

El anillo F es uno de los objetos más dinámicos del sistema solar, fue detectado por primera vez por la sonda Pioneer 11 en 1979 (Geherels et al., 1980). Su radio es mayor que el del anillo A, se encuentra aproximadamente a una distancia de $140,223.7 \pm 2$ km respecto al centro de Saturno (Bosh, et al., 2002), es delgado, excéntrico y su estructura varía mucho con el tiempo.

Las cámaras de la sonda Voyager 1, en 1980, captaron el anillo con mucha mayor claridad, mostrando un anillo muy delgado, de extensión radial de alrededor de 50 km, con un sinnúmero de estructuras longitudinales, como grumos, pliegues y las llamadas “trenzas”, 9 meses después, la sonda Voyager II observó cambios en estas estructuras. Sin embargo, debido a que la cobertura por las sonda gemelas fue mínima, no se pudo determinar si la estructura había cambiado, o simplemente se trataba de diferencias en la estructura longitudinal. Debido a la existencia de los satélites vecinos, Prometo y Pandora, orbitando en cada lado del anillo, se esperaba que éstos mantuvieran el anillo mediante el mecanismo de pastoreo, que había sido propuesto para explicar los anillos de Urano. (Goldreich & Tremaine, 1979)

En 1988, Cuzzi & Burns observaron una población de lunetas en el anillo F, basándose en las medidas de absorción de electrones de la sonda Pioneer 11 (Cuzzi & Burns, 1988) y propusieron que estas lunetas colisionaban constantemente, formando nubes de material rocoso que producían la absorción de electrones y quizá, en un evento aún no observado, también eran fuente del material del anillo F.

Usando una combinación de los datos de las sondas Voyager, el telescopio espacial Hubble y datos de ocultación en tierra, se creó un modelo del anillo F, dándole forma de elipse Kepleriana que precesa libremente, (Bosh, et al., 2002).

Las primeras observaciones de Cassini, del anillo F (Porco, et al., 2005), confirmaron la apariencia trenzada inusual del anillo y sugirieron que algunas de las características más

regulares son producto de la influencia gravitacional de Prometeo. Imágenes adicionales de la sonda Cassini mostraron que este “trenzado” tiene una estructura espiral (Charnoz, et al., 2005), confirmando que Prometeo es pieza clave en la creación de estructuras regulares, que varían con el tiempo (Murray, et al., 2005) y probando la existencia de satélites pequeños en la cercanía del anillo F, (Porco, et al., 2005; Spitale, et al., 2006; Murray, et al., 2008).

En muchos aspectos el anillo F es único, debido a la gran variedad de estructuras y mecanismos que lo conforman.

4.1.1 Características

El singular anillo F tiene una extensión radial de 2,000 km, es un anillo ligeramente elíptico, con una excentricidad de 0.0026 (Williams, 2006). Está ubicado entre Prometeo y Pandora, lunas que se consideran sus pastoras, sin embargo se ubica en una zona distinta a la zona en donde se balancearían las torcas gravitacionales de acuerdo a la teoría Goldreich y Tremaine (1979), pero esto se podría explicar debido a la influencia de otros satélites influyentes como Titán. (Benet & Jorba, 2017).

Se divide en dos componentes, el “núcleo”, una parte estática de alrededor de 20 km de diámetro, rodeada por una corriente discontinua de material (envoltura). Tanto el núcleo como la envoltura dinámica están compuestas principalmente de polvo fino, alrededor del 98% de este material está formado de partículas pequeñas que tienen radios en la escala de nanómetros a milímetros (Showalter, et al., 1992). La estructura de la envoltura quizá forma una espiral simple alrededor del núcleo debido al fenómeno de cizalla kepleriana (Charnoz, et al., 2005). El núcleo es una estructura con una profundidad óptica muy grande, dominada por partículas con diámetros de unos cuantos centímetros. Algunos datos del ocultamiento de los anillos revelaron objetos de 30 m a 1.5 km que podrían ser objetos sólidos o agregados muy compactos. La envoltura está formada por partículas mucho más pequeñas, de unos cuantos micrómetros de diámetro, con características transitorias bien definidas y muy brillantes, que se interpretan como nubes de polvo generadas por el impacto de micrometeoroides o bien por colisiones locales involucrando la actividad de lunetas.

La masa del anillo F no es conocida, se estima que tienen una masa de polvo entre 2 y 5×10^9 kg, derivada de la distribución de la cubierta. Si se considera que la masa del núcleo

tienen la edad del Sistema Solar se llega a una masa equivalente a un cuerpo de 15-70 km, que está en el rango de masa de Prometeo o Pandora. La alineación aparente de las hebras (o hilos) del anillo F con el núcleo, sugieren que el anillo F es tan masivo como Prometeo o Pandora, masa necesaria para balancear la precesión diferencial entre el núcleo y la envoltura, aunque algunos de los modelos más recientes requieren la existencia de estructuras transitorias de lunetas o grumos que sugieren que las lunetas se forman a partir del material de polvo.

La composición química del anillo, al igual que los otros anillos es, en gran porcentaje, hielo de agua.

4.2 Dinámica

4.2.1 Perturbaciones causadas por Prometeo

La proximidad de Prometeo al anillo F, cuya órbita tiene un semi-eje mayor de 139,380 km (Jacobson & al., 2008), altera la forma del anillo, produciendo ondas azimutales. Los fenómenos visibles varían mucho dependiendo principalmente de la posición del satélite respecto al núcleo del anillo; tanto el anillo como Prometeo tienen una órbita con una pequeña excentricidad, lo que permite que, a veces, el satélite esté más cerca del anillo. En el transcurso de un periodo orbital de Prometeo (14.7 h), el satélite se acerca y se aleja del anillo, produciendo en él, los llamados “canales”. Parte del material es arrojado a una órbita perturbada fuera del anillo, para posteriormente incorporarse de nuevo a su envoltura. Este fenómeno fue propuesto, por primera vez, a partir de las simulaciones numéricas llevadas a cabo para estudiar la dinámica del anillo (Giuliatti Winter, et al., 2000) y más tarde, observado en fotografías de la sonda Cassini (figura 4.1).

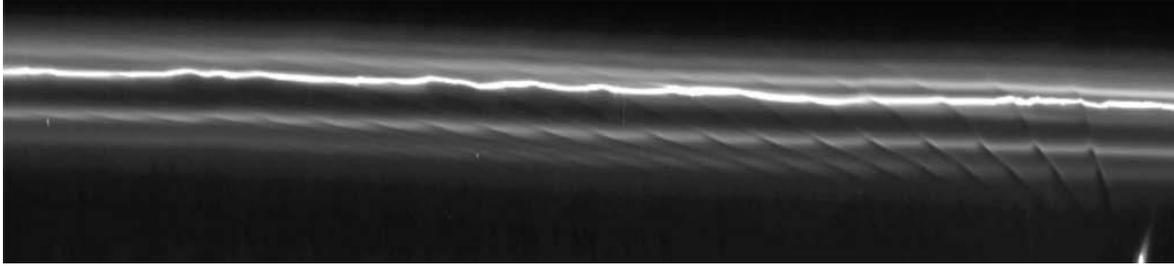


Figura 4. 1 Mosaico de 15 fotografías que cubre 60° grados del anillo F en longitud mostrando la multitud de canales que deja Prometeo en el cuerpo del anillo, el satélite se observa en la esquina inferior derecha, (NASA, 2009-2016).

4.2.2 Jets y espirales

La Figura 4.2 muestra un mosaico de los 360° que forman el anillo F, obtenido del Sistema de Imágenes de la sonda Cassini con su cámara de ángulo pequeño. Se aprecia el núcleo brillante del anillo así como los canales generados por Prometeo (y mucho menos visibles los de Pandora). Se observa que la estructura del anillo está dominada por algunos “jets” de material con diferentes pendientes que aparentemente emanan del núcleo del anillo. Además hay distintas líneas paralelas de material cubriendo los 360° del anillo, éstas son las llamadas “espirales” que se cree son producto de las colisiones entre el núcleo del anillo y un objeto transitorio como la luna S/2004 S6 (Charnoz, et al., 2005).

Usando como evidencia, una serie de mosaicos obtenidos entre diciembre de 2006 y mayo de 2007 (Murray, et al., 2008) , se mostró que los jets estaban asociados a la trayectoria de un objeto con órbita similar a S/2004 S6. La cizalla kepleriana arrastra el material de los jets, formando las espirales. También se mostró que algunos de estos jets no correspondían a S/2004 S6, llevando a los investigadores a pensar en la formación o existencia de otros objetos en la vecindad del anillo F, que deberían también, estar involucrados en las colisiones con este anillo. Si el material del anillo F es arrojado en esta región como resultado de colisiones de satélites con el núcleo, entonces deberían existir alrededor de 10 satélites con radios menores a 2 km.

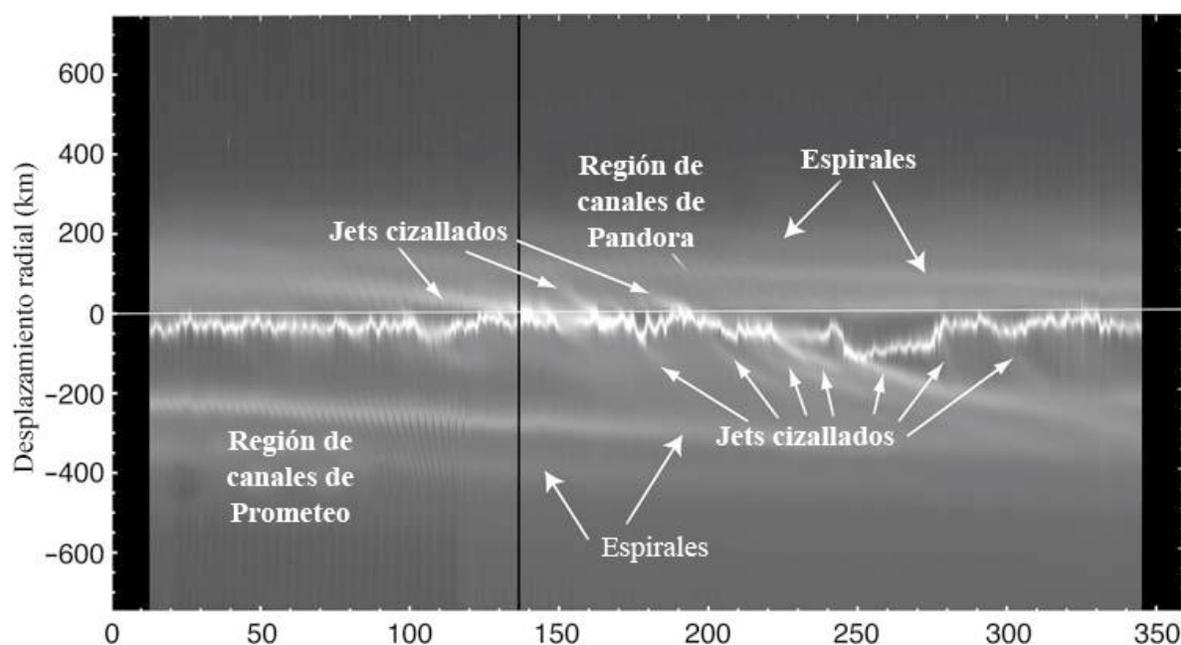


Figura 4.2 Un mosaico de imágenes de la sonda Cassini del anillo F. Están anotadas algunas de las características más prominentes del anillo F, (NASA, 2009-2016).

4.2.3 Lunetas entre el anillo

Una pequeña luneta dentro de un anillo, con una excentricidad muy pequeña respecto a la excentricidad del anillo, puede producir patrones característicos llamados ventiladores (en inglés “fans”), (Murray, et al., 2008). Éstos consisten en una secuencia de canales cortados con un punto común de intersección visible en el material perturbado que lo rodea. Este mecanismo es muy similar a las estructuras de tipo hélice (o “propellers”) que se forman en el anillo A. Sin embargo, mientras que una hélice es una estructura aparentemente inmutable, un ventilador aparece y desaparece a lo largo de la órbita, a medida que el objeto completa un epiciclo respecto al núcleo del anillo. En este aspecto los ventiladores se parecen a los canales que causa Prometeo. Dos ejemplos de ventiladores pueden ser apreciados en la Figura 4.3.

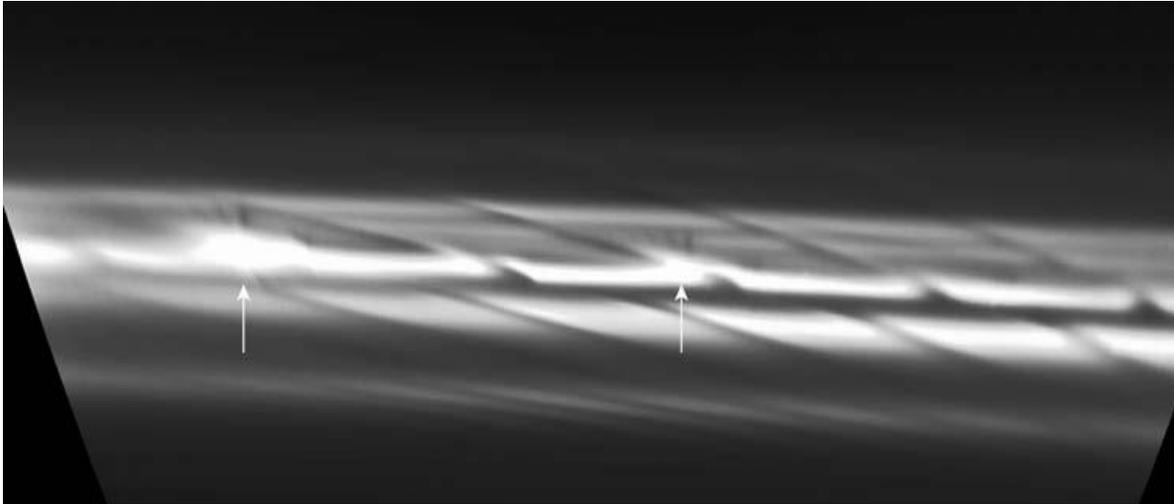


Figura 4.3 Imagen del núcleo del anillo F en la que aparecen dos ventiladores (“fans”) señalados por flechas blancas. Las otras características muy prominentes son los canales debido al encuentro con Prometeo (NASA, 2009-2016).

Está claro que Prometeo ejerce una gran influencia en el anillo F y que su encuentro desordena y reordena el material sucesivamente. Pero si las lunetas previstas, del estilo de S/2004 S6, colisionan constantemente con el núcleo del anillo ¿por qué la estructura del anillo se mantiene? Se ha propuesto que el anillo tiene cierta “memoria” debido a que tiene elementos que son menos vulnerables a los efectos de las colisiones: lunetas entre el anillo de tamaño similar a las lunetas que están fuera del anillo, (Murray, et al., 2008), esta afirmación es sumamente importante en esta tesis, porque es lo que se pretende encontrar en los modelos.

4.3 Estabilidad

Todas estas características sugieren que el anillo tiene una rápida evolución dinámica, y por lo tanto, el anillo F debería ser joven. Se han propuesto varios mecanismos para explicar porque el anillo persiste:

- Parte de la masa del anillo debería abandonar la envoltura de partículas de tamaño micrométrico, en al menos unos millones de años, debido al arrastre de Poynting-Robertson (pérdida de material debido a la acción de la presión de radiación ocasionada por el viento solar) y las lunetas masivas podrían mantener el material en órbitas de herradura. Sin embargo, a partir de las simulaciones numéricas no se ha logrado dar una explicación a esta propuesta (Showalter, et al., 1992).

- El caos inducido por Prometeo y Pandora, y posiblemente por las lunetas, podría mantener el anillo estable, actuando como lunas pastoras, mediante la acción de la disipación colisional e intercambiando momento angular. Las simulaciones numéricas muestran que el sistema completo sería inestable: las lunetas en la región del anillo rápidamente cambiarían a órbitas caóticas, dispersadas más allá de 1,000 km en sólo 160 años, implicando que las estructuras anchas, como el núcleo del anillo deberían ser jóvenes. Por los mismos motivos, la envoltura del anillo F desaparecería en alrededor de 3 años. Debido a estos factores, la estructura del núcleo y la envoltura permanecen inexplicadamente, (Giuliatti, et al., 2006), (Charnoz, et al., 2005).
- Debido al bombardeo de micrometeoroides, se estima que los cuerpos grandes deben perder $\sim 3 \times 10^{-5}$ cm/año, por lo que los objetos más pequeños que 100 m deben ser mucho más jóvenes que el Sistema Solar y por lo tanto, todos estos mecanismos de destrucción deben balancearse con los mecanismos de acreción, (Showalter, et al., 1992).

4.4 Origen

Se han propuesto diversos modelos para explicar el origen del anillo F, todos tienen en común el principio del que parten: la erosión progresiva de grandes cuerpos por diversos mecanismos como el bombardeo de micrometeoroides y la evolución colisional. De estos modelos es importante considerar que:

- a) Las componentes de polvo del anillo F son una nube de partículas liberadas por la erosión colisional de una población de lunetas con diámetros de 0.1-1 km repartidas en una región de alrededor de 2,000 km de ancho, cuyas colisiones mutuas liberaron material del que se formaría el anillo F. El material, pasaría por un proceso de re-acreción, producido por las mismas lunetas, (Cuzzi & Burns, 1988).
- b) El polvo proviene de cinturones de cuerpos aún no detectados, rasgados por la acción de uno o varios planetas.
- c) Los datos de la sonda Voyager I, muestran la existencia de grumos que aparecen y desaparecen, el material polvoso proviene de la desintegración de estos grumos y lunetas en el núcleo del anillo producido por el impacto de micrometeoros de altas velocidades, (Showalter, et al., 1992).
- d) Las imágenes de Cassini muestran una población cercana de lunetas fuera del núcleo del anillo. Las lunetas exteriores podrían estar colisionando regularmente con las lunetas del interior, produciendo material que genera estructuras llamadas espirales o

jets, cuando todavía son jóvenes. Las dos poblaciones de lunetas, podrían interactuar física y gravitacionalmente para crear muchas de las estructuras transitorias del anillo F, (Charnoz, et al., 2005).

De todos estos modelos, se observa que el origen del anillo F está vinculado con las lunetas de tamaño kilométrico, por lo que se propone que quizá en el pasado, una o varias lunas pequeñas fueron destruidas y sus fragmentos se erosionaron lentamente hasta formar las estructuras que se ven ahora, (Cuzzi & Burns, 1988).

La acreción que ahora ocurre en el anillo F y forma las lunetas y grumos detectados, así como las colisiones que se producen entre ellos, alimentan constantemente al anillo F, por lo que su parte más densa se forma alrededor de las lunetas, (Esposito, et al., 2008).

Sin embargo, ninguno de estos modelos explica el comportamiento caótico del anillo, por lo que el origen del anillo sigue siendo un misterio.

En el siguiente capítulo se presentará un modelo matemático que permite simular algunas de las propiedades gravitacionales del anillo F, utilizando los datos y propiedades que se describieron en este capítulo, con el objetivo de estudiar la formación de cuerpos diminutos, la estabilidad y el origen del anillo F.

Capítulo 5

5 Coagulación en el anillo F

Para analizar la evolución y estabilidad de una distribución de masa en el anillo F y definir si pueden formarse cuerpos diminutos (minilunetas) en el anillo F vía la coagulación gravitacional, se utilizó la ecuación de Smoluchowski (1916) siguiendo un procedimiento matemático similar al planteado por Canup et al. (1994).

La ecuación de Smoluchowski se usó, en este caso, para estudiar la evolución dinámica de un grupo de partículas (o cuerpos) suponiendo que ellas describen un proceso estocástico con propiedad de Markov tomando en cuenta que:

- a) Un proceso estocástico es aquel que involucra variables aleatorias, asociadas a conjuntos, que representan los valores numéricos de un sistema que cambia aleatoriamente en el tiempo. La idea general del proceso estocástico se puede representar como una secuencia, continua o discreta de variables aleatorias $X_i(t_n)$. Estas X_i son resultados numéricos de los eventos aleatorios en el sistema y representan valores de distintos parámetros físicos a tiempos t_n . Para cada tiempo t_n , las variables aleatorias X_i tienen una distribución de probabilidad, que puede depender de los valores en tiempos anteriores.
- b) Un proceso de Markov es aquel en el que, el valor del estado actual de un sistema $X_i(t_k)$, sólo depende del estado inmediatamente anterior.

5.1 Descripción del modelo

El modelo utilizado consiste en suponer que la coagulación se produce por un proceso de Markov y se ignora la fragmentación y la erosión mareal en la ecuación de Smoluchowski.

5.1.1 Coagulación y acreción

La coagulación y la acreción son dos conceptos muy similares, ambos procesos describen la formación de cuerpos más grandes originados a partir de la unión de cuerpos más pequeños. Sin embargo, existen diferencias sutiles e importantes entre estos fenómenos. Al unirse los cuerpos pequeños por acción de fuerzas atractivas, si los cuerpos conservan su forma original, se le llama coagulación, si comienzan a suavizarse sus bordes, o colapsan para formar una partícula mucho más redonda, se le llama acreción (Figura 5. 1).

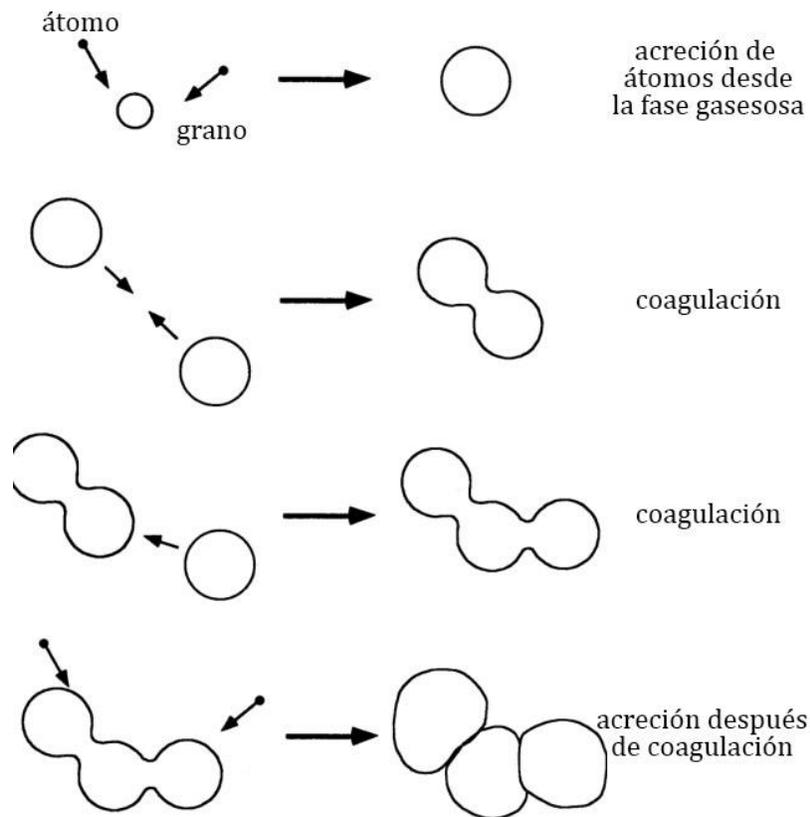


Figura 5. 1 Coagulación y acreción.

Para que se produzca la coagulación se requiere como mínimo dos cuerpos pequeños que colisionen a velocidades lo suficientemente bajas para que no reboten o se despedacen mutuamente y quedar unidos por acción de alguna fuerza, en este caso la gravedad. La velocidad colisional máxima depende de las propiedades elásticas del cuerpo. La acreción ocurre cuando el material tiene suficiente tiempo para comenzarse a redondear, o la cantidad de partículas es tanta que colapsa en una estructura más redonda.

La ecuación de coagulación de Smoluchowski modela el proceso de coagulación. Fue desarrollada originalmente para estudiar la coalescencia de aerosoles, y se ha empleado también en procesos gravitacionales. Se trata de una ecuación integro-diferencial que modela el cambio de la distribución del tamaño de las partículas, asumiendo que sólo existen interacciones binarias. Se trata de un modelo estocástico porque involucra variables aleatorias debido a que no se toma en cuenta la posición de las partículas y en su lugar se analiza la probabilidad de que ocurra una colisión.

En este trabajo se usa un modelo simple basado en la ecuación de Smoluchowski para describir la evolución de las partículas en el anillo F.

5.1.2 Ecuación de coagulación de Smoluchowski

La evolución de una distribución de masa está descrita por la ecuación de coagulación de Smoluchowski (1916), que asume que la densidad de partículas es tan baja que sólo pueden ocurrir colisiones binarias. La ecuación de Smoluchowski en forma de ecuación integro-diferencial es:

$$\frac{d}{dt} n_m = \frac{1}{2} \int_0^m n_{m'} n_{m-m'} A_{m',m-m'} dm' - n_m \int_0^\infty n_{m'} A_{m,m'} A_{m,m'} dm', \quad (5.1)$$

Donde:

- $n_m dm$ representa el número de cuerpos con masa entre m y $m + dm$
- $A_{m',m-m'}$ es la probabilidad de que la colisión resulte en coagulación entre las masas m' y $m - m'$, en partículas por unidad de tiempo.

La primera integral del lado de izquierda a derecha de la ecuación (5.1) representa la ganancia de partículas formadas por coagulación respecto a las partículas menos masivas mientras que la segunda integral del lado derecho representa la pérdida de masa por coagulación para formar partículas más masivas.

A manera de simplificación, suponemos que la probabilidad de colisión A no depende del tiempo aunque la ecuación de Smoluchowski, sí depende del tiempo por lo que, a

continuación se presenta la construcción el vector de estado que representa la distribución de masas en el tiempo usando un proceso de Markov.

5.1.3 Cadena de Markov

Definimos a \vec{S} , el vector de estado que evoluciona en el tiempo. Este vector describe de forma logarítmica, la distribución de masas de las partículas en un tiempo dado de la siguiente manera:

- El k -ésimo elemento de \vec{S} es la masa total de las partículas con masa entre $2^k M_0$ y $2^{k+1} M_0$. M_0 es una unidad arbitraria de masa.
- Si M_k es la cantidad total de masa en la componente k -ésima del vector, entonces M_k está dada por:

$$M_k = \int_{m_k}^{m_{k+1}} m' n_{m'} dm', \quad (5.2)$$

con m_k y m_{k+1} el límite inferior y superior de masa respectivamente, de la componente k -ésima.

Proponemos que la distribución de masa simplemente sea:

$$n_m dm \propto m^{-q_m} dm, \quad (5.3)$$

donde q_m es el exponente diferencial de masa y se elige $q_m=1$ porque simplifica los cálculos y debido a que no se conoce la distribución real de masas del anillo, la elección de q_m es arbitraria. Esta aproximación es muy usada en Física de anillos planetarios (Showalter, et al., 1992).

- La última componente del vector de estado es una componente discreta de masa, que describe a las partículas que poseen la masa total del sistema M_{tot} .
- Si el vector de estado contiene Y componentes, el valor esperado de cuerpos en Y : N_Y está entre 0 y 1. Si es exactamente 1, toda la masa se acreció en un sólo cuerpo de M_{tot} .
- El k -ésimo elemento del vector de estado representa la masa contenida por partículas en el rango m_k a $2m_k$ $\vec{S}(k)$.

Se define \mathcal{T} como la matriz de transición, esta matriz regula la transferencia de masa entre dos componentes del vector de estado \vec{S} . \mathcal{T} representa la evolución temporal del proceso de Markov y está dada por la ecuación de coagulación de Smoluchowski, para cada intervalo del vector \vec{S} , es decir:

- El elemento $\mathcal{T}(i, k)$ es la probabilidad de que una unidad de masa sea transferida de la componente i a la componente k en el vector \vec{S} en un intervalo de tiempo dado como resultado de la acreción.
- Se ajustan los intervalos de tiempo para que en ningún tiempo Δt se transfiera más del 10% de la masa contenida en cualquier componente del vector de estado.

La tasa de cambio de la masa total contenida en la k -ésima componente M_k está dada por:

$$\frac{dM_k}{dt} = (A + B + C) - (D + E + F), \quad (5.4)$$

donde A, B y C son integrales que representan la ganancia de masa de la k -ésima componente y D, E, F representen la pérdida de masa.

$$A = \int_{m_{k-1}}^{m_k} dm'' \int_{m_{k-1}}^{m_k} dm' \frac{1}{2} (m' + m'') n_{m'} n_{m''} A_{m', m''}, \quad (5.5)$$

$$B = \sum B_j = \sum_{j=1}^{k-2} \int_{m_j}^{m_{j+1}} dm'' \int_{m_k - m''}^{m_k} dm' (m' + m'') n_{m'} n_{m''} A_{m', m''}, \quad (5.6)$$

$$C = \sum C_j = \sum_{j=1}^{k-1} \int_{m_j}^{m_{j+1}} dm'' \int_{m_k}^{m_{k+1} - m''} dm' (m'') n_{m'} n_{m''} A_{m', m''}, \quad (5.7)$$

donde:

A es la ganancia de masa de la k -ésima componente debido a colisiones entre partículas en la $(k-1)$ -ésima componente del vector.

B es la ganancia de masa debido a colisiones entre la $(k-1)$ -ésima componente del vector y las partículas de las componentes con menor masa.

C es la ganancia de masa debida a colisiones entre la k -ésima componente del vector y las partículas de las componentes con menor masa.

$$D = \int_{m_k}^{m_{k+1}} dm'' \int_{m_k}^{m_{k+1}} dm' \frac{1}{2} (m' + m'') n_{m'} n_{m''} A_{m',m''} , \quad (5. 8)$$

$$E = \sum E_j = \sum_{j=k+1}^{Y-1} \int_{m_j}^{m_{j+1}} dm'' \int_{m_k}^{m_{k+1}} dm' (m') n_{m'} n_{m''} A_{m',m''} , \quad (5. 9)$$

$$F = \sum F_j = \sum_{j=1}^{k-1} \int_{m_j}^{m_{j+1}} dm'' \int_{m_j}^{m_{j+1}} dm' (m') n_{m'} n_{m''} A_{m',m''} , \quad (5. 10)$$

donde:

D es la pérdida de masa del k -ésimo componente debido a colisiones entre partículas en con las partículas del k -ésimo componente.

E es la pérdida de masa debido a colisiones entre el k -ésimo componente del vector y las partículas de las componentes de mayor masa.

F es la pérdida de masa debido a colisiones entre el k -ésimo componente del vector y las partículas de las componentes con menor masa.

Las integrales A-F, incluyen todas las posibles fuentes de ganancias o pérdidas de masa del k -ésimo componente en un sistema puramente de acreción. Las integrales A y C describen las tasas de transferencia de la k -ésima componente a componentes de menor masa, mientras que las integrales D , E y F describen las transferencias de la k -ésima componente a componentes de mayor masa. Mientras que la integral B describe la tasa de transferencia de masa desde dos componentes de masa —la $(k - 1)$ -ésima y la j -ésima componentes— a la componente k -ésima. Por esta razón se divide en dos partes:

$$B = B_1 + B_2 , \quad (5. 11)$$

$$B_1 = \sum B_{1,j} = \sum_{j=1}^{k-2} \int_{m_j}^{m_{j+1}} dm'' \int_{m_k-m''}^{m_k} dm'(m'') n_{m'} n_{m''} A_{m',m''}, \quad (5.12)$$

$$B_2 = \sum B_{2,j} = \sum_{j=1}^{k-2} \int_{m_j}^{m_{j+1}} dm'' \int_{m_k-m''}^{m_k} dm'(m') n_{m'} n_{m''} A_{m',m''}. \quad (5.13)$$

En resumen, cada elemento de la matriz de transición \mathcal{T} está dado por:

$$\mathcal{T}(i, k) = \begin{cases} [B_{1,i} + C_i] \cdot \Delta t & \text{si } i < (k - 1) \\ [A + B_2 + C_{k-1}] \cdot \Delta t & \text{si } i = (k - 1) \\ 1 - [D + E + F] \cdot \Delta t & \text{si } i = k \\ 0 & \text{si } i > k \end{cases} \quad (5.14)$$

En el caso del elemento final:

$$\mathcal{T}(i, Y) = \begin{cases} [B_{1,i}] \cdot \Delta t & \text{si } i < (Y - 1) \\ [A + B_2] \cdot \Delta t & \text{si } i = (Y - 1) \\ 1 & \text{si } i = Y \end{cases}$$

5.1.4 Determinación de la frecuencia de colisión

Para calcular la frecuencia de colisión, se utiliza la aproximación *PIAB* (*particle-in-a-box*) utilizada por Greenberg et al. 1978, Spaute et al. 1991, Wetherill y Stewart 1989, 1993, Weidenschilling et al. 1984.

La aproximación *PIAB* consiste en tomar un elemento de volumen del anillo que orbita alrededor del planeta. Este elemento de volumen se puede modelar como un prisma rectangular de longitud infinita.

El anillo se puede tratar como un gas ideal cuyas partículas tienen velocidades relativas determinadas por los movimientos aleatorios. Estos movimientos pueden ser radiales, verticales y epicíclicos y su velocidad se describe por la ecuación siguiente: (Lissauer & Stewart, 1993)

$$v_{ran} = a\Omega \sqrt{\frac{5}{8}e^2 + \frac{1}{2}i^2}, \quad (5.15)$$

donde a es el eje semimayor, Ω es la frecuencia orbital y e e i son la excentricidad orbital y la inclinación. La ecuación emplea la aproximación epicíclica, es decir $e, i \ll 1$.

La aproximación *PIAB* es válida cuando:

- Las velocidades de encuentro están determinadas por el movimiento aleatorio.
- Los efectos de la cizalla Kepleriana son despreciables.

Otro parámetro que se necesita para analizar el fenómeno de coagulación es el radio de Hill, que se utilizará para normalizar algunas ecuaciones derivadas del análisis. El radio de Hill es la región en la cual la gravedad de un satélite, (en este caso, una partícula) domina la del planeta y se expresa matemáticamente como:

$$R_{\text{Hill}} = a \left(\frac{m + m'}{3M_{\text{plan}}} \right)^{1/3}, \quad (5.16)$$

donde M_{plan} es la masa del planeta.

Usando la representación *PIAB*, la probabilidad de que dos partículas de masas m y m' colisionen y coagulen por unidad de tiempo es (Greenzweig & Lissauer, 1990):

$$A_{m,m'} = \frac{\alpha \sigma_{m,m'} v_{rel}}{2\pi a W H}, \quad (5.17)$$

Donde α es la probabilidad de que la colisión resulte en coagulación, W y H son el ancho y largo de la caja ocupada por las partículas y $\sigma_{m,m'}$ es la sección transversal de colisión dada por la ecuación:

$$\sigma_{m,m'} = \left(\frac{3}{4}\right)^{\frac{2}{3}} \pi^{\frac{1}{3}} \rho^{-\frac{2}{3}} \left(m^{\frac{1}{3}} + m'^{\frac{1}{3}}\right)^2 \left(1 + \frac{v_{\text{esc}}^2}{v_{\text{rel}}^2}\right), \quad (5.18)$$

Con ρ la densidad de partículas y v_{esc} es la velocidad de escape entre las partículas que colisionan, (Greenberg & Botke, 1991).

Se supone que las partículas colisionan con orientaciones aleatorias, entonces, las velocidades relativas están dadas por:

$$v_{\text{rel}} = (v_{\text{ran}}^2 + v'_{\text{ran}})^{1/2}, \quad (5.19)$$

Se supone que hay dispersión isotrópica con v_{ran} , tal que el ancho y el largo de la caja está determinado por:

$$H \sim W \sim \frac{1}{\Omega} (v_{\text{ran}}^2 + v'_{\text{ran}})^{1/2}. \quad (5.20)$$

(Stewart, et al., 1984)

5.1.5 Criterio de acreción

Usualmente se utiliza un criterio de acreción de dos cuerpos en esta clase de simulaciones. En el espacio libre, dos cuerpos que colisionan permanecen gravitacionalmente unidos si su velocidad de rebote es menor que su velocidad de escape, es decir:

$$v_{\text{reb}} < v_{\text{esc}}, \quad (5.21)$$

$$v_{\text{reb}} = \varepsilon v_{\text{imp}},$$

donde v_{reb} es la velocidad relativa de rebote, v_{imp} es la velocidad relativa de impacto y ε es el coeficiente de restitución. En la aproximación de dos cuerpos, la velocidad de impacto está dada por:

$$v_{\text{imp}}^2 = v_{\text{rel}}^2 + v_{\text{esc}}^2, \quad (5.22)$$

donde v_{rel} es la velocidad relativa de las partículas a una distancia infinita.

Con las ecuaciones (5.21) y (5.22) se obtiene el criterio de acreción, definido por:

$$\varepsilon < \varepsilon_{\text{crit},2B} \equiv \sqrt{\frac{v_{\text{esc}}^2}{v_{\text{esc}}^2 + v_{\text{rel}}^2}}, \quad (5.23)$$

y se obtiene un valor crítico máximo del coeficiente de restitución, $\varepsilon_{\text{crit},2B}$ para que ocurra la acreción.

El criterio anterior es válido, lejos del límite de Roche, pero no es válido en ambientes con fuerzas de marea por lo que se implementa otro criterio mejorado, basado en el trabajo de Ohtsuki 1993, para “tres cuerpos”. Este autor propone un nuevo criterio desde la perspectiva de la energía, considerando la energía potencial y cinética en una formulación de tres cuerpos.

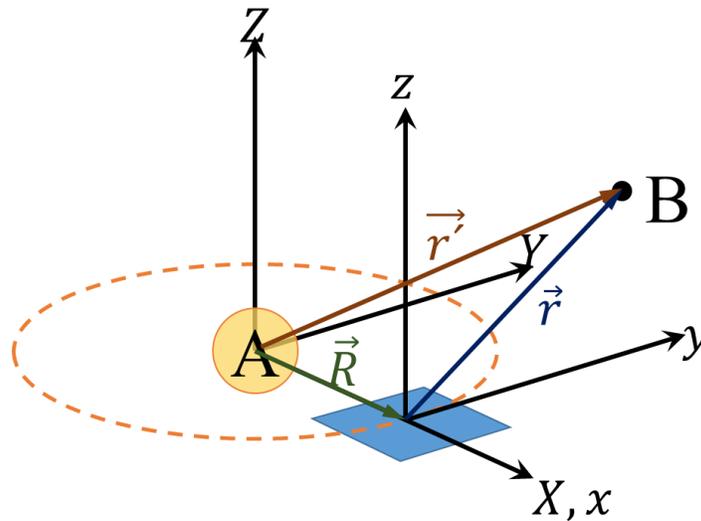


Figura 5. 2 Esquema del cambio de sistema de referencia usado en las ecuaciones de Hill: las coordenadas originales X Y Z están centradas en el planeta A son estáticas respecto los cuerpos en órbita. El nuevo sistema de coordenadas x y z están centradas en un plano en órbita circular ecuatorial, con el eje x perpendicular y apuntando hacia fuera de a la órbita, el eje y perpendicular al eje x, en el plano orbital y apuntando en dirección del movimiento del plano orbital y el eje z paralelo al eje de rotación, perpendicular a los ejes x y y

Ohtsuki utiliza la aproximación de Hill para reducir un problema de tres cuerpos al problema de dos cuerpos de tal modo que su aproximación no desprecie las fuerzas de marea. A pesar de que en el cálculo de la probabilidad de colisión sí se desprecia la fuerza de marea, la aproximación de 3 cuerpos es más precisa.

El movimiento relativo de dos cuerpos en órbita puede ser descrito por la aproximación de Hill. Esta aproximación surge de cambiar el origen del sistema de coordenadas del centro del

planeta a un sistema móvil rotante centrado en una órbita circular ecuatorial que se mueve a velocidad constante (la velocidad correspondiente a esa órbita), cuyo eje x siempre apunta perpendicular hacia afuera de la órbita, el eje y es perpendicular al eje x y está dentro del plano orbital y el eje z es perpendicular a los ejes x y y , paralelo al eje de rotación como en Figura 5. 2. La aproximación se hace al agregar el valor del potencial para definir la fuerza en el nuevo sistema:

$$\Phi = -\frac{GM}{\sqrt{(x+R)^2 + y^2 + z^2}} \quad (5.24)$$

Desarrollando el potencial en serie alrededor de R en potencias negativas y tomando en cuenta sólo con el primer término, se obtiene:

$$\ddot{x} = 2\dot{y} + 3x - 3\frac{x}{r^3}, \quad (5.25)$$

$$\dot{y} = -2\dot{x} - 3\frac{y}{r^3}, \quad (5.26)$$

$$\ddot{z} = -z - 3\frac{z}{r^3}, \quad (5.27)$$

con $r = (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}$

Las ecuaciones escritas están simplificadas aún más utilizando coordenadas de Hill, todos los términos están escalados al radio de Hill, lo que elimina todas las constantes.

Las energías potencial y cinética se obtienen haciendo uso de la integral de Jacobi y siguiendo el desarrollo de Nakazawa e Ida (1988) y la energía total queda expresada como:

$$E = \frac{1}{2}(\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2) + U(x, y, z), \quad (5.28)$$

donde $U(x, y, z)$ es el llamado, potencial de Hill:

$$U(x, y, z) = -\frac{3}{2}x^2 + \frac{1}{2}z^2 - \frac{3}{r} + \frac{9}{2}, \quad (5.29)$$

E es la energía total en el marco de referencia rotando.

Los primeros dos términos de U son la energía potencial de marea, el tercer término representa la gravedad mutua entre los objetos orbitantes, y la constante $9/2$ se añade para que U desaparezca en los puntos de Lagrange: $(x, y, z) = (\pm 1, 0, 0)$.

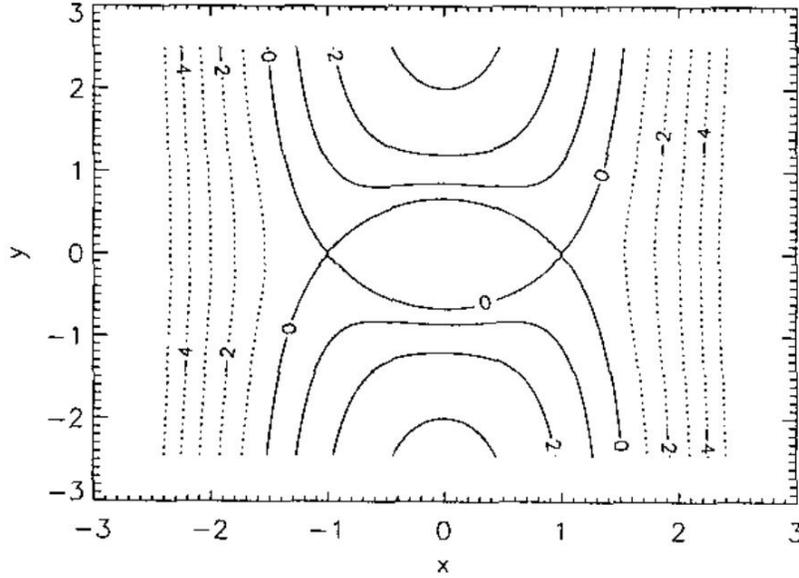


Figura 5.3 El potencial de Hill en el plano $z=0$, las unidades son unidades de Hill, (Canup & Esposito, 1995).

De la Figura 5.3, la esfera de Hill en realidad tiene forma de limón con $1/2R_{\text{Hill}}$ en dirección radial, $2/3R_{\text{Hill}}$ en dirección azimutal y $\approx 0.64R_{\text{Hill}}$ en dirección vertical.

Cuando $U = 0$ (línea es cerrada), dos objetos no pueden escapar de su esfera de Hill si tienen energía total relativa negativa después de la colisión. A esto se le llama *criterio de acreción de tres cuerpos*.

Cuando dos cuerpos orbitan muy lejos ($r = \infty$), la integral de Jacobi asociada a su movimiento puede ser expresada en términos de la velocidad instantánea relativa de sus elementos:

$$E_{\infty} = \frac{1}{2}(e_{\text{H}}^2 + i_{\text{H}}^2) - \frac{3}{8}b^2 + \frac{9}{2}, \quad (5.30)$$

donde e_{H} e i_{H} son la excentricidad y la inclinación de Hill, respectivamente y b es la separación escalada del eje semimayor.

Inmediatamente después que los cuerpos colisionan, aún conservan su energía total E_∞ , dada por la ecuación:

$$E = E_\infty = \frac{1}{2}v_i^2 - \frac{3}{2}x_p^2 + \frac{1}{2}z_p^2 - \frac{3}{r_p} + \frac{9}{2}, \quad (5.31)$$

donde v_i es la velocidad rescalada de impacto, r_p es la suma escalada del radio de las partículas,

$$r_p = \frac{r + r'}{R_{\text{Hill}}}, \quad (5.32)$$

y x_p , y_p y z_p son las coordenadas en el punto de impacto, tal que $x_p^2 + y_p^2 + z_p^2 = r_p^2$.

Despejando la ecuación (5.32), con la definición de (5.16), y reemplazando las masas por la densidad (asumiendo tanto las partículas del planeta como esferas perfectas):

$$r_p = \frac{R_p}{a} 3^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\rho}{\rho_p} \right)^{-\frac{1}{3}} \frac{1 + \mu^{\frac{1}{3}}}{(1 + \mu)^{\frac{1}{3}}}, \quad (5.33)$$

donde R_p y ρ_p son el radio y la densidad del planeta y μ es el cociente de masas de los objetos que colisionan con $0 < \mu < 1$.

Si se considera que dos cuerpos colisionan con orientación aleatoria, entonces, promediando sobre todas las orientaciones, se obtiene la velocidad promedio relativa escalada en el impacto:

$$v_i^2 = 2E_\infty + \frac{6}{r_p} + \frac{2}{3}r_p^2 - 9, \quad (5.34)$$

Se define la velocidad escalada de escape como:

$$v_e^2 = \frac{6}{r_p}, \quad (5.35)$$

y la velocidad relativa entre los cuerpos en (x, y, z) por:

$$v_b^2 = (e_H^2 + i_H^2) - \frac{3}{4}b^2, \quad (5.36)$$

Cuando v_b en $(x, y, z) = (0,0,0)$, se tiene el caso no perturbado de las ecuaciones de Hill, donde se desprecia la gravedad entre las partículas.

Para el modelo *PIAB*, los movimientos aleatorios son mucho mayores que los movimientos debido a la cizalla Kepleriana. Sustituyendo (5.35) y (5.36) en (5.21), se puede llegar a que la velocidad de rebote es:

$$v_r = \varepsilon \left[v_b^2 + v_e^2 + \frac{2}{3}r_p^2 \right]^{1/2}, \quad (5.37)$$

Donde ε se define como la reducción total de la velocidad relativa debido a un impacto inelástico y está relacionada con las componentes normal ε_n y tangencial ε_t del coeficiente de restitución mediante la relación:

$$\varepsilon = \left[\frac{\varepsilon_n^2 v_n^2 + \varepsilon_t^2 v_t^2}{v_n^2 + v_t^2} \right]^{1/2}, \quad (5.38)$$

donde v_n y v_t son las componentes normal y tangencial de la velocidad relativa de impacto, respectivamente.

Sustituyendo en la ecuación de energía (5.31) se obtiene:

$$E' = \frac{1}{2} \varepsilon^2 \left(v_b^2 + v_e^2 + \frac{2}{3}r_p^2 \right) - \frac{3}{r_p} - \frac{1}{3}r_p^2 + \frac{9}{2}, \quad (5.39)$$

Si la colisión es suficientemente inelástica tal que la energía después de la colisión es menor que cero, entonces los objetos no pueden escapar de la esfera de Hill. Esto es $E' < 0$ y por lo tanto:

$$\varepsilon < \varepsilon_{\text{crit},3B} = \sqrt{\frac{\frac{6}{r_p} + \frac{2}{3}r_p^2 - 9}{\frac{6}{r_p} + v_b^2 + \frac{2}{3}r_p^2}}, \quad (5.40)$$

Para que exista una solución real se requiere que: $\frac{6}{r_p} + \frac{2}{3}r_p^2 - 9 \geq 0$ o $r_p \leq 0.691$.

Si se satisface $r_p \leq 0.691$, entonces dos cuerpos permanecerán en su esfera de Hill si ε es menor que $\varepsilon_{\text{crit},3B}$ y las partículas coagularán por colisiones inelásticas sucesivas. Este coeficiente de restitución es independiente de la velocidad y la masa.

También nótese que si el tamaño físico de los cuerpos que colisionan excede el 70% (redondeando 0.691) del radio de la esfera de Hill, entonces no permanecerán unidos, incluso si la colisión es completamente inelástica.

Sustituyendo el valor crítico de $r_p = 0.691$ en la ecuación (5.40) se obtiene:

$$\frac{(1 + \mu_{\text{crit}})^{\frac{1}{3}}}{1 + \mu_{\text{crit}}^{\frac{1}{3}}} = \left(\frac{1}{0.691}\right) 3^{\frac{1}{3}} \frac{R_p}{a} \left(\frac{\rho}{\rho_p}\right)^{-\frac{1}{3}}, \quad (5.41)$$

donde μ_{crit} es el máximo valor que el cociente de masa (ecuación anterior número) de los dos cuerpos, puede tener para que éstos permanezcan gravitacionalmente unidos después de una colisión completamente inelástica.

En el límite $\mu = 0$, la ecuación anterior (5.41) toma una forma similar a la de la ecuación de Roche:

$$\frac{a}{R_p} \cong 2.09 \left(\frac{\rho}{\rho_p}\right)^{-\frac{1}{3}}. \quad (5.42)$$

En este caso, lo único que cambia es el coeficiente respecto a la ecuación de Roche es el coeficiente 2.456, dado que el modelo de Roche es para líquidos y aquí se consideraron sólidos.

Por otro lado, también se define una densidad mínima para acreción de cuerpos sólidos, análoga a la densidad de Roche, dada por:

$$\rho_{\text{crit}} \approx 9.1 \left(\frac{R_p}{a} \right)^3 \rho_p. \quad (5.43)$$

Esta densidad tiene un valor de 0.54 g/cm^3 en el exterior del anillo A y de 2.3 g/cm^3 en el centro del anillo C. Estos valores corresponden a la densidad mínima y máxima en el sistema de anillos principales de Saturno.

El coeficiente crítico de restitución de tres cuerpos también difiere del análogo de dos cuerpos en el caso límite de que la velocidad relativa entre dos cuerpos sea 0. En este caso, si $v_{\text{rel}} = 0$, el coeficiente crítico es 1.

En el caso de tres cuerpos, la velocidad relativa hasta el impacto, típicamente no será cero, incluso en órbitas circulares. Usando el límite inferior de velocidad en el régimen *PIAB*, es decir, cuando la velocidad es tan baja que no hay velocidad de rebote, la ecuación (5.40) se escribe como:

$$\varepsilon_{\text{crit},3B} = \sqrt{\frac{v_e^2 + \frac{2}{3}r_p^2 - 9}{v_e^2 + \frac{2}{3}r_p^2}}. \quad (5.44)$$

El valor de $\varepsilon_{\text{crit},3B}$ siempre es menor que 1 y significa que no puede existir una colisión completamente elástica.

En el capítulo siguiente se presentan los resultados obtenidos para el anillo F a partir del modelo presentado en este capítulo.

Capítulo VI

Resultados y discusión

Se realizaron varias simulaciones con el algoritmo descrito en el capítulo anterior, utilizando como constante de restitución $\varepsilon = 1$ suponiendo que los choques son completamente elásticos, es decir, sólo las partículas con velocidad inicial lenta se coagularan si cumplen con el criterio de la ecuación (5. 21) con la aproximación de tres cuerpos (5. 44). El algoritmo se programó en *Julia*. Las condiciones iniciales empleadas están dadas por la ecuación (5. 3) i.e. en forma de exponencial negativa para simular la distribución de masa del anillo F. Esta simulación es una buena aproximación del estado actual del anillo, (Cuzzi, et al., 2009) y en todas las simulaciones realizadas se utilizaron los parámetros para este anillo (Tabla 6. 1). La densidad de partículas usada fue la de hielo de agua en el vacío (Tabla 6. 1) así como la de algunos materiales comunes, como hidrocarburos ligeros (metano y etano) y silicatos (regolito) que son materiales cuyas trazas se encuentran en los anillos de Saturno incluyendo al anillo F.

El algoritmo básicamente calcula la matriz de Markov (5. 14) así como todas las constantes involucradas mediante las fórmulas descritas en el capítulo anterior. En las simulaciones, Δt nunca fue mayor a un día para asegurar que el cambio producido por la matriz fuera menor al 10%.

Tabla 6. 1: Valores empleados en las simulaciones y sus distintas fuentes.

Constante	Valor
Masa de Saturno M_{plan}	$(568.319 \pm 0.057) \times 10^{24}$ kg (Jacobson, 2007)
Radio medio de Saturno R_{plan}	60 330 km (Williams, 2006)
Densidad de Saturno ρ_{plan}	0.6179 ± 0.0002 g/cm ³ <i>(Valor calculado con la M_{plan} y el R_{plan}, asumiendo que se trata de una esfera)</i>
Semieje mayor a la órbita del anillo F (Distancia media del anillo F) a	$139\,826 \pm 2.32$ km (Porco, et al., 2005)
Excentricidad del anillo F e	0.0026 (Porco, et al., 2005)
Inclinación del anillo F i	0
Densidad de las partículas del anillo F ρ	0.94 g/cm ³ Densidad del hielo en el vacío

La Figura 6. 1 muestra el comportamiento estándar de la simulación, las condiciones iniciales toman en cuenta partículas de polvo muy fino de hielo de agua con radios en el intervalo de 1 nm a 1 mm de acuerdo a las condiciones del anillo F (Showalter, et al., 1992). En la Figura 6. 1 se aprecia como el material se coagula partiendo las partículas de mayor radio: originalmente el material forma una recta en el plano logarítmico (log10-log10), pero a medida que avanza el tiempo, la cantidad de material en la zona de mayor radio comienza a agotarse.

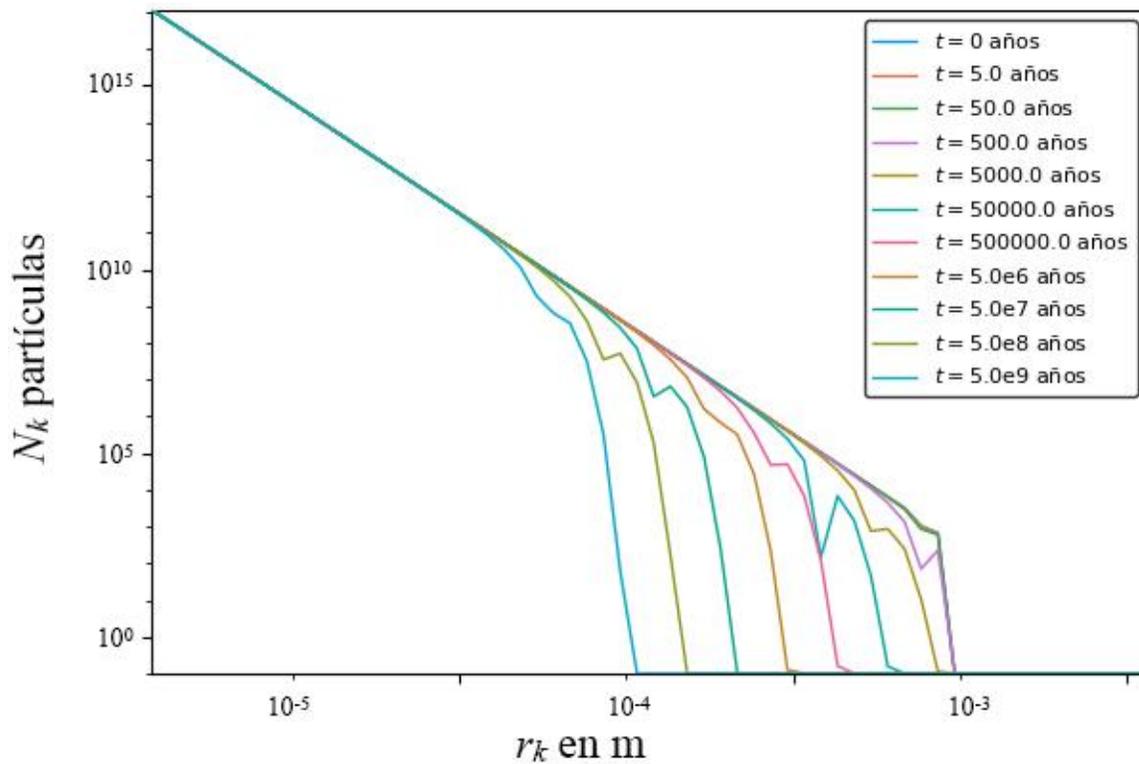


Figura 6. 1: Simulación de coagulación para condiciones iniciales que siguen una distribución exponencial negativa en un intervalo de radios de nanómetros a milímetros. El eje vertical corresponde al número de partículas y es logarítmico con base 10, mientras que el horizontal corresponde al radio de las partículas, también es logarítmico pero de base 2. Las acotaciones muestran la evolución temporal de acuerdo a los periodos que se grafican.

Si se hace la misma simulación con condiciones iniciales para radios más pequeños, se obtiene la Figura 6. 2, en la que se aprecia que, si las partículas tienen radios en el intervalo de nanómetros a micras, como es el caso de las partículas en el anillo F, las partículas no coagularán. Lo que quizá justifique por que el anillo F se mantiene estable a lo largo del tiempo.

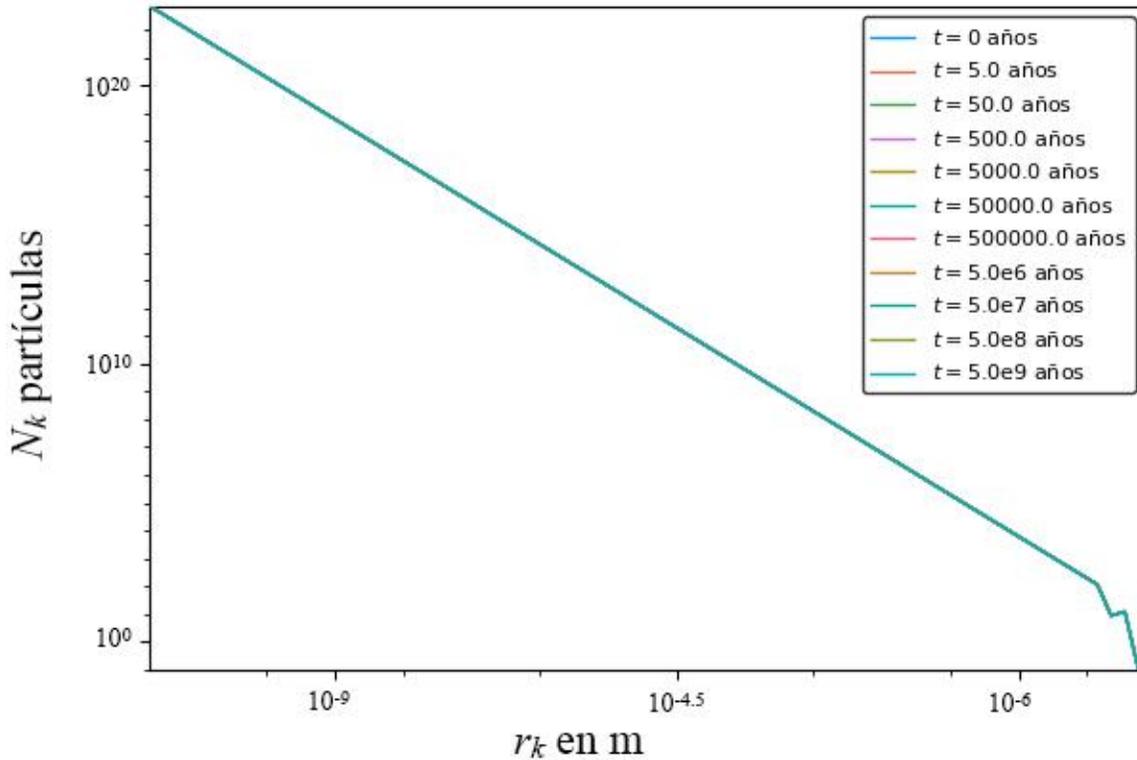


Figura 6. 2: Simulación de coagulación de la evolución temporal de partículas en las condiciones del anillo F para una distribución inicial de exponencial negativa para partículas en el intervalo de nanómetros a micrómetros. No ocurre cambio en la distribución debido a que las partículas son muy pequeñas para coagular en una interacción puramente gravitacional, el máximo valor inicial del radio de las partículas son 40 micras.

Tomando en cuenta otras composiciones químicas (hidrocarburos ligeros y silicatos), el comportamiento, en general de la simulación no se altera. Sin embargo, la coagulación ocurrirá más pronto, tal como se aprecia en el gráfica 6.3. En esta gráfica se observa que a mayor densidad, más pronto ocurre la coagulación.

A pesar de que el intervalo de integración utilizado para cada composición química fue el mismo, se observa cómo los silicatos, material con mayor densidad, han coagulado más rápido formando cuerpos (partículas) de mayor radio.

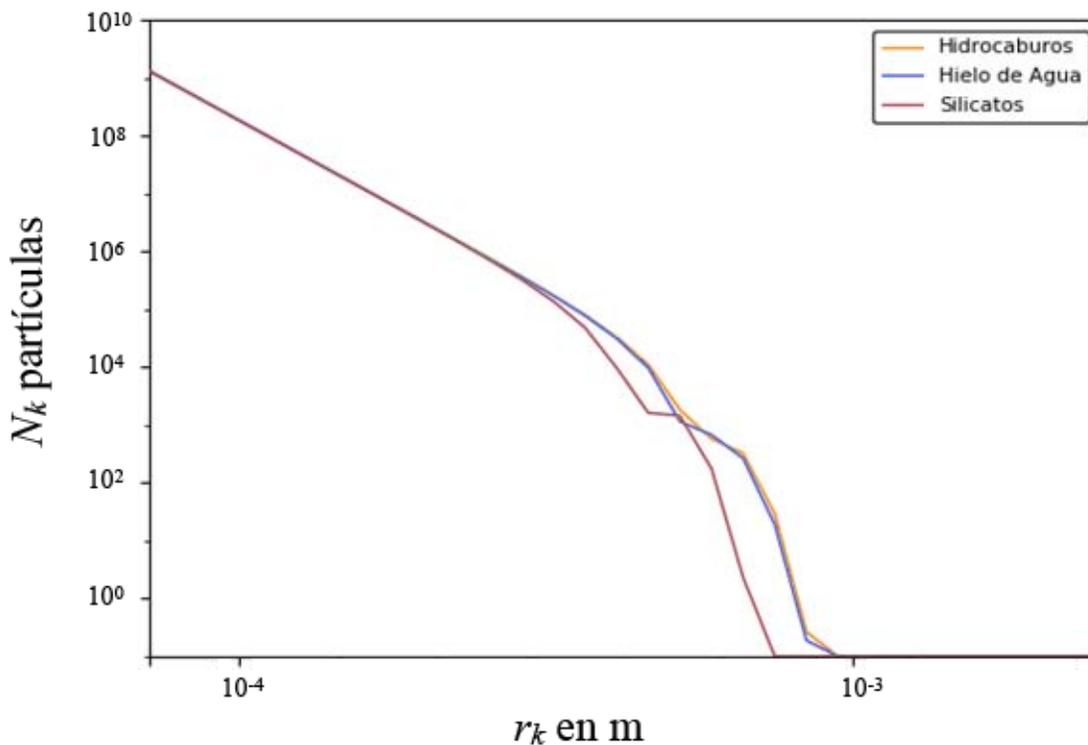


Figura 6. 3: Simulación similar a la de la Figura 6. 2. Se tienen solo las curvas para un lapso de 1000 años, con densidades medias para hidrocarburos ligeros $\rho = 0.70 \text{ g/cm}^3$, hielo de agua en el vacío $\rho = 0.94 \text{ g/cm}^3$ y una mezcla de silicatos y hielo $\rho = 350 \text{ g/cm}^3$. A pesar de ser el mismo tiempo de corrida, se observa cómo los silicatos, con mayor densidad, han coagulado más pronto formando partículas de mayor radio.

Si se calculan los puntos donde la pendiente comienza a cambiar respecto a las condiciones iniciales —una línea recta en el plano \log_2 - \log_{10} — se pueden obtener líneas como en la Figura 6. 3 que cambian de pendiente conforme la densidad lo hace. Dado que la gráfica es logarítmica en ordenadas y abscisas, significa que estas rectas tienen un comportamiento exponencial, es decir, que el radio, cuando las partículas comienzan a aglutinarse es de la forma: \times

$$R_{p0} = a t^{-b} \quad (6.1)$$

Donde a y b son constantes que dependen de la densidad.

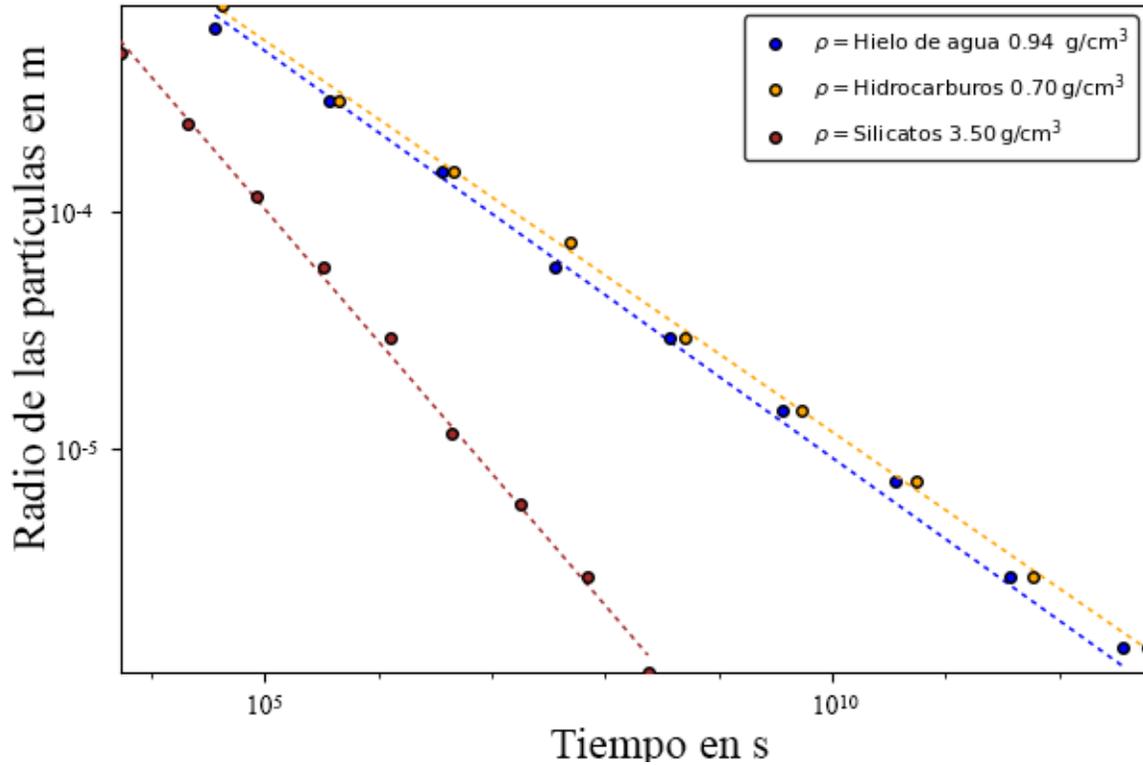


Figura 6. 4: Radios de coagulación respecto al tiempo para diferentes composiciones químicas. Se observa que éstos forman rectas en un plano logarítmico. Las líneas punteadas son estimaciones lineales siguiendo el modelo de la ecuación (6.1) cuyos parámetros aparecen en la tabla 6.2.

Tabla 6. 2: Constantes asociadas a la Figura 6. 4, a es la pendiente y b es la ordenada al origen. A pesar de que a tiene unidades de velocidad, representa la tasa de cambio del radio de las partículas cuando comienzan a coagularse en el tiempo.

Densidad [g/cm^3]	Constantes	
	a [m/s]	b
0.94 (Hielo en el vacío)	1.30 ± 0.54	0.34 ± 0.02
0.70 (Hielo de hidrocarburos)	1.23 ± 0.11	0.33 ± 0.02
3.50 (Silicatos)	2.64 ± 0.45	0.56 ± 0.01

Hay que tener en cuenta que se está trabajando sólo con la masa —que se puede traducir al número de partículas— y no con la posición por lo que, los resultados corresponden a un número sin fin de sistemas equivalentes. Sin embargo, podemos decir de esta simulación que, sin importar la posición de las partículas, el anillo, al estar formando de material tan fino, puede ser más duradero que los anillos compuestos de cuerpos de mayor diámetro.

Debido a que el anillo F está más allá del límite de Roche, no está sometido dinámicamente a las fuerzas de ruptura por acción de la gravedad de Saturno por lo que en el orden de millones de años, las partículas eventualmente coagularán en cuerpos más grandes y/o serán dispersados si ellas tienen, al menos, radios de tamaño micrométrico.

Por otro lado, la gravedad por sí sola no explica cómo se coagula el material más fino (nanómetros de radio) ya que, los resultados del presente trabajo muestran que la coagulación nunca ocurre en esta escala.

Se sabe que este material nanométrico es susceptible a cargarse electrostáticamente, lo que implica que en un trabajo futuro, se deberá incluir en las ecuaciones, otras fuerzas como es el caso de la fuerza electromagnética.

Finalmente, el modelo mostró que no se forman lunetas por estos procesos en el anillo F. Este resultado difiere de los resultados obtenidos por Canup & Esposito (1995), quienes hacen un estudio de formación de lunetas utilizando un modelo puramente gravitacional, como en nuestro caso, solo que estos autores analizan dos grupos de partículas de distintos radios que evolucionan a partir de condiciones iniciales similares a las empleadas en este trabajo pero considerando los parámetros de los anillos principales cerca del límite de Roche. En nuestro caso, el modelo utilizado simplemente no muestra tal comportamiento, por lo que las estructuras dinámicas dentro del anillo F deben ser explicadas con otras suposiciones y/o modelos. Por otro lado, nuestro modelo no descarta la formación de grumos o estructuras poco consolidadas, detectadas no solo en el anillo F sino también en los anilletes que existen en la brecha de Encke aunque quizá, los grumos nunca lleguen a consolidarse para formar minilunetas.

Conclusiones

1. El modelo no muestra la formación de minilunetas, pero no descarta la formación de grumos.
2. Cuando solo la fuerza de gravedad domina dinámicamente el polvo, éste no coagulará si el material es $< \sim 20$ micras.
3. En materiales más densos la coagulación es mucho más rápida.
4. La ecuación (6.1), que fue una ecuación obtenida a partir del análisis, proporciona el radio R_{p0} a partir del cual, las partículas comenzarán a coagularse en el tiempo t , de acuerdo a las constantes a y b . Este radio se puede utilizar para determinar el radio de las partículas que pueden coagular cuando su dinámica está sujeta exclusivamente a las fuerzas gravitacionales.

Referencias

Andre, N., Blanc, M. & Maurice, S. e. a., 2008. Identification of Saturn's magnetospheric regions and associated plasma processes: Synopsis of Cassini observations during orbit insertion. *Reviews of Geophysics*, IV(46).

Atreya, S. K. & Wong, A. S., 2005. Coupled clouds and Chemistry of the giant Planets. *Space Sci. Rev*, Issue 116.

Baum, W. A. y otros, 1981. Saturn's E ring. *Icarus*, Volumen 47, p. 84–96.

Benet, L. & Jorba, À., 2017. A simple model for the location of Saturn's F ring. *Icarus*, Issue 285, pp. 224-236.

Bosh, A. S., Olkin, C. B., French, R. G. & Nicholson, P. D., 2002. Saturn's F ring: Kinematics and particle sizes from stellar occultation studies.. *Icarus*, Volumen 157, pp. 57-75.

Burns, J. y otros, 2005. ISS Team: Morphology, movements and models of ringlets in Saturn's Encke Gap.. *Bull. Am. Astro. Soc.*, Volumen 37, p. 766.

Burns, J. y otros, 1999. The formation of Jupiter's faint rings. *Science*, Volumen 284, p. 1146–1150.

Burns, J., Showalter, M. & Morfill, G., 1984. The ethereal rings of Jupiter and Saturn. En: *Planetary Rings*. Tucson: Univ. Ariz. Press., p. 200–274.

Canup, R. M. & Esposito, L. W., 1995. Accretion in the Roche Zone: Coexistence of Rings and Ringmoons. *Icarus*, Issue 113, pp. 331-352.

Cassini, G. D., 1686. *Journal Des Scavans*.

Charnoz, S. y otros, 2005. Cassini Discovers a Kinematic Spiral Ring Around Saturn. *Science*, Issue 310, pp. 1300-1304.

Charnoz, S. y otros, 2005. Cassini discovers a kinematics spiral ring around Saturn. *Science*, Volumen 310, pp. 1300-1304.

Choi, C. Q., 2010. *Saturn's Rings Made by Giant "Lost" Moon, Study Hints*. [En línea] Available at: <http://news.nationalgeographic.com/news/2010/12/101213-saturn-rings-moon-ice-jupiter-science-space/>

Colwell, J. E. y otros, 2009. The structure of Saturn's rings. *Saturn from Cassini-Huygens*, p. 375.

Cowen, R., 2009. *Largest known planetary ring discovered*. [En línea] Available at: <https://www.sciencenews.org/article/largest-known-planetary-ring-discovered>

Cuzzi, J. N. & Burns, J. A., 1988. Charged particle depletion surrounding Saturn's F ring – evidence for a moonlet belt?. *Icarus*, Issue 74, p. 284–324.

Cuzzi, J. N. & Burns, J. A., 1988. Charged particle depletion surrounding Saturn's F ring: evidence for a moonlet belt?. *Icarus*, Volumen 74, pp. 284-324.

Cuzzi, J. y otros, 2009. Ring particle composition and size distribution. En: M. K. Dougherty, L. W. Esposito & S. M. Krimigis, edits. *Saturn from Cassini-Huygens*. s.l.:Springer, p. 459.

Denk, T., 2009. Iapetus: Unique Surface Properties and a Global Color Dichotomy from Cassini Imaging. *Science (AAAS)*, 326(5964), pp. 435-439.

Desch, M. & Kaiser, M., 1981. Voyager measurement of the rotation period. *Geophys. Res. Lett*, Issue 8.

Dougherty, M. K., Esposito, L. W. & Stamatios, M. K., 2009. *Saturn from Cassini-Huygens*. s.l.:Springer.

Dyches, P. & Clavin, W., 2014. Titan's Building Blocks Might Pre-date Saturn. (*Press release*). *Jet Propulsion Laboratory*..

Esposito, L. y otros, 2008. Moonlets and clumps in Saturn's F ring. *Icarus*, Issue 194, p. 278–289.

Esposito, L. W., 2002. Planetary Rings. *Reports On Progress In Physics*.

Esposito, L. W., 2010. *Composition, Structure, Dynamics and Evolution of Saturn's Rings*. University of Colorado: Review in Advance.

Espresate, J., 2010. *Los anillos de Saturno*. [En línea] Available at: <http://www.revistacienciasunam.com/es/90-revistas/revista-ciencias-59/1150-los-anillos-de-saturno.html>

Estrada, P. R. & Cuzzi, J. N., 1996. Voyager observations of the color of Saturn's rings. *Icarus*, Volumen 122, pp. 251-272.

Fortney, J. J., Baraffe, I. & Militzer, B., 2010. Giant Planet Interior Structure and Thermal Evolution. En: *Exoplanets*. s.l.:The University of Arizona Press.

Galilei, G., 1610. *Carta a Belisario Vinta*, Padua: s.n.

Galilei, G., 1623. *Il Saggiatore*. Roma: s.n.

Gehrels, T. y otros, 1980. Imaging photopolarimeter on Pioneer Saturn.. *Science*, Volumen 207, pp. 434-439.

Giuliatti Winter, S. M., Murray, C. D. & Gordon, M., 2000. Perturbations to Saturn's F ring strands at their closest approach to Prometheus.. *Planet. Space. Sci.*, Volumen 48, pp. 817-827.

Giuliatti, W. S. M., Mourão, D. C. & Freitas, T. C. A., 2006. The strands of the F ring disturbed by its closest satellites. *Adv. Space Res.*, Issue 38, p. 781–787.

Goldreich, P. & Tremaine, S., 1979. Towards a theory for the Uranian rings. *Nature*, 5692(277), pp. 97-99.

Goldreich, P. & Tremaine, S., 1980. Disk-satellite interactions. *The Astrophysical Journal*, Issue 241, pp. 425-441.

Goldstein, R., Green, R., Pettengill, G. & Campbell, D., 1977. The rings of Saturn: Two-frequency radar observations. *Icarus*, 1(30), pp. 104-110.

Grav, T. & Bauer, J., 2007. A deeper look at the colors of the Saturnian irregular satellites. *Icarus*, 191(1), pp. 267-285.

Greenberg, R. & Botke, W. F., 1991. Planetary Accretion Rates: Analytical Derivation. *Icarus*, Issue 94, pp. 98-111.

Greenberg, R., Wacker, J. F., Hartmann, W. K. & Chapman, C. R., 1978. Planetesimals to Planets: Numerical Simulation of Collisional Evolution. *Icarus*, Issue 35, pp. 1-26.

Greenzweig, Y. & Lissauer, J. J., 1990. Accretion Rates of Protoplanetes. *Icarus*, Issue 87, pp. 40-77.

Harland, D. M., 2007. *Cassini at Saturn: Huygens results*. Glasgow: Springer.

Hedman, M. y otros, 2007. Saturn's dynamic D ring. *Icarus*, Volumen 188, pp. 89-107.

Hedman, M. M. y otros, 2007. The Source of Saturn's G Ring. *Science*, 317(5838), p. 653–656.

Huygens, C., 1659. *Systema Saturnium*. s.l.:La Haya.

Ingersoll, A., Dowling, T. & Gierasch, P., 1969. Dynamics of Jupiter's Atmosphere. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 5(26).

Jacobson, R. A., 2007. The gravity field of the Saturnian system from satellite observations and spacecraft tracking data. *Astronomical Journal*, 2(40), p. 453.

Jacobson, R. A. & al., e., 2008. Revised orbits of Saturn's small inner satellites. *Astron. J.*, Volumen 135, pp. 261-263.

Jeffreys, H., 1947. The Relation of Cohesion to Roche's Limit. *MNRAS*, 3(107), pp. 260-262.

Jewitt, D. & Haghighipour, N., 2007. Irregular Satellites of the Planets: Products of Capture in the Early Solar System. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, Volumen 45, pp. 261-295.

Jones, G., Roussos, E. & Krupp, N., 2008. The Dust Halo of Saturn's Largest Icy Moon, Rhea. *Science*, 319(1), p. 1380–1384.

Keeler, J. E., 1895. A Spectroscopic Proof of the Meteoric Constitution of Saturn's Rings. *Astrophysical Journal*, Issue 1, pp. 416-427.

Kirkwood, D., 1883. The Zone of Asteroids and the Rings of Saturn. *Proceedings of the American Philosophical Society*, 21(114), pp. 263-266.

Lissauer, J. J. & Stewart, G. R., 1993. Growth of planets from planetesimals.. En: E. H. Levy & J. I. Lunine, edits. *Protostars and Planets III*. Tucson: University of Arizona Press, pp. 1061-1088.

Lorenz, R., Wall, S. & Radebaugh, J., 2006. The Sand Seas of Titan: Cassini RADAR Observations of Longitudinal Dunes. *Science*, 312(5774), p. 724–727.

Matson, D., Castillo-Rogez, J., Schubert, G. S. C. & Mackinnon, W., 2009. The thermal evolution and internal structure of Saturn's mid-sized icy satellites. *Saturn from Cassini Huygens*, pp. 55, 63, 70.

Maxwell, J. C., 1859. *On the stability of the motion of Saturn's rings*. Cambridge: Macmillan and Co..

McFadden, L.-A., Weismann, P. R. & Johnson, T. V., 2007. *Encyclopedia of Solar System*. Segunda ed. s.l.:Elsevier.

Moore, J. M. y otros, 2004. Large impact features on middle-sized icy satellites. *Icarus*, 171(2), pp. 421-443.

Mueller, H. F., 2010. *Oxford Encyclopedia of Ancient Greece and Rome*. s.l.:Oxford University Press.

Mullaney, J., 2007. *The Herschel Objects and How To Observe Them*. Delaware: Springer.

Murray, C. D. y otros, 2008. The determination of the structure of Saturn's F ring by nearby moonlets. *Nature*, pp. 739-744.

Murray, C. D. y otros, 2005. How Prometheus creates structure in Saturn's F ring. *Nature*, Volumen 437, pp. 1326-1329.

Nakazawa, K. & Ida, S., 1988. Hill's Approximation in the Three-Body Problem. *Progres of Theoretical Physics Supplement*, Issue 96, pp. 167-174.

NASA, 1981. *Jet Propulsion Laboratory | California Institute of Technology | Voyager, the Interstellar Mission*. [En línea]
Available at: <http://voyager.jpl.nasa.gov/gallery/saturn.html>

NASA, 2004. *Regions of Saturn's Magnetosphere*. [En línea]
Available at: <http://saturn.jpl.nasa.gov/photos/imagetails/index.cfm?imageId=2177>

NASA, 2009-2016. *Jet Propulsion Laboratory | California Institute of Technology | Photojournal: Saturn*. [En línea]
Available at: <http://photojournal.jpl.nasa.gov/targetFamily/Saturn>

Nicholson, P., 2008. A close look at Saturn's rings with Cassini VIMS. *Icarus*, I(193).

Nicholson, P. D. y otros, 2008. A close look at Saturn's rings with Cassini VIMS. *Icarus*, Volumen 193, p. 182-212.

Ohtsuki, K., 1993. Capture Probability of Colliding Planetesimals: Dynamical Constraints on Accretion of Planets, Satellites and Ring Particles. *Icarus*, Issue 106, pp. 228-226.

Pickering, W. H., 1905. The ninth and tenth satellites of Saturn. *Annals of Harvard College Observatory*, Issue 53, pp. 173-185.

-
- Porco, C. C., Baker, E. & Barbara, J., 2005. Cassini Imaging Science: Initial Results on Saturn's Rings and Small Satellites. *Science*, 307(5713), pp. 1226-1236.
- Porco, C. C. y otros, 2005. Cassini Imaging Science: Initial Results on Saturn's Rings and Small Satellites. *Science*, Issue 307, pp. 26-36.
- Porco, C. C. y otros, 2006. Cassini Observes the Active South Pole of Enceladus. *Science*, 311(5766), pp. 1393-1401.
- Rusell, R., 2003. *A Look at Saturn's Magnetosphere*. [En línea] Available at: http://www.windows2universe.org/saturn/upper_atmosphere.html
- Russell, C., 1993. Planetary Magnetospheres. *Reports on Progress in Physics*, VI(56).
- Seidelmann, P. K. y otros, 2007. Report of the IAU/IAG Working Group on cartographic coordinates and rotational elements. *Celestial Mech Dyn Astr*, Issue 98, pp. 155-180.
- Showalter, M. y otros, 1992. A photometric study of Saturn's F ring. *Icarus*, Issue 100, p. 394-411.
- Showalter, M. R., 1996. Saturn's D ring in the Voyager images. *Icarus*, Volumen 124, pp. 677-689.
- Smoluchowski, M., 1916. Drei Vorträge über Diffusion, Brownsche Molekularbewegung und Koagulation von Kolloidteilchen. *Physik. Z*, Issue 17, pp. 557-571, 585-599.
- Spahn, F. y otros, 2006. Cassini dust measurements at Enceladus and implications for the origin of the E ring.. *Science*, Volumen 311, p. 1416-1418.
- Spaute, D., Weidenschilling, S. J., Davis, D. R. & Marzari, F., 1991. Accretional Evolution of a Planetary Swarm. *Icarus*, Issue 92, pp. 147-164.
- Spitale, J. N., Jacobson, R. A., Porco, C. C. & Owen, W. M. J., 2006. The orbits of Saturn's small satellites derived from combined historic and Cassini imaging observations. *The Astronomical Journal*, 132(2), pp. 692-710.

Spitale, J. N. & Porco, C. C., 2010. Detection of free unstable modes and massive bodies in Saturn's outer B Ring. *Bulletin of the American Astronomical Society*, Volumen 42, p. 981.

Stewart, G. R., Lin, D. N. C. & Bodenheimer, P., 1984. Collision-Induced Transport Processes in Planetary Rings. *Planetary rings, University of Arizona Press*, pp. 447-512.

Stofan, E., Elachi, C. & Lunine, J., 2007. The lakes of Titan. *Nature*, 445(7123), pp. 61-64.

Swift, D. W., 1997. Voyager Tales: Personal Views of the Grand Tour. *AIAA*, p. 69.

Thomas, P., 2010. Sizes, shapes, and derived properties of saturnian satellites after the Cassini nominal mission. *Icarus*, 2008(1), pp. 395-401.

Thomas, P. C., Armstrong, J. W. & Asmar, S. W., 2007. Hyperion's sponge-like appearance. *Nature*, 448(7149), pp. 50-53.

Tiscareno, M. S. y otros, 2006. 100-metre-diameter moonlets in Saturn's A ring from observations of 'propeller' structures. *Nature*, Issue 440, pp. 648-650.

Tiscareno, M. S. y otros, 2010. Physical characteristics and non-keplerian orbital motion of "propeller" moons, embedded in Saturn's rings. *The Astrophysical Journal Letters*, Volumen 718, pp. L92-L96.

van Helden, A., 1974. Saturn and his anses. *Journal for hte History of Astronomy*, Issue 5, pp. 105-121.

van Helden, A., 1984. *Saturn through the telescope: A brief historical survey*. Tucson: University of Arizona Press.

Verbiscer, A. J., Skrutskie, M. F. & Hamilton, D. P., 2009. Saturn's largest ring. *Nature*, 461(7267), pp. 1098-1100.

Weidenschilling, S. J., 1984. Evolution of Grains in a Turbulent Solar Nebula. *Icarus*, Issue 60, pp. 553-567.

Weissman, P., McFadden, L.-A. & Johnson, T., 2015. *Encyclopedia of the Solar System*. s.l.:Academic Press.

Weisstein, E. W., 2007. *Roche Limit*. [En línea]
Available at: <http://scienceworld.wolfram.com/physics/RocheLimit.html>

Wetherill, G. W. & Stewart, G. R., 1989. Accumulation of a Swarm of Small Planetesimals. *Icarus*, Issue 77, pp. 350-357.

Wetherill, G. W. & Stewart, G. R., 1993. Formation of Planetary Embryos: Effects of Fragmentation, Low Relative Velocity, and Independent Variation of Eccentricity and Indclination. *Icarus*, Issue 106, pp. 190-209.

Williams, D. R., 2006. *Saturn Fact Sheet*. [En línea]
Available at: <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/saturnfact.html>

Woolfson, M. M., 1993. Solar System - its origin and evolution. *Astronomical Society*, Issue 34, pp. 1-20.