



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

Formación de Anillos Tenues en Saturno

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

FÍSICO

PRESENTA:

JOSÉ LUIS LEAL HERRERA

DIRECTOR DE TESIS:

MARÍA DOLORES MARAVILLA MEZA



2013



Universidad Nacional
Autónoma de México



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

Leal

Herrera

José Luis

62739291

Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ciencias

Física

096533635

2. Datos del tutor

Dra.

Maravilla

Meza

María Dolores

3. Datos del sinodal 1

Dr.

Herrera

Velazquez

José Julio Emilio

4. Datos del sinodal 2

Dra.

Cordero

Tercero

María Guadalupe

5. Datos del sinodal 3

Dr.

Martinell

Benito

Julio Javier

6. Datos del sinodal 4

Dr.

Goldstein

Menache

Patricia

7. Datos del trabajo escrito

Formación de Anillos Tenues en Saturno

170 p.

2013

Agradecimientos

Le doy gracias a mi tutora la Dra. María Dolores Maravilla Meza por el apoyo, dedicación y entusiasmo que me brindó durante la elaboración de esta tesis.

Agradezco los valiosos comentarios y aportaciones de los sinodales: El Dr. Julio Herrera, la Dra. Guadalupe Cordero, la Dra. Patricia Goldstein y el Dr. Julio Martinell.

Le doy gracias a la Universidad Nacional Autónoma de México, por los apoyos económicos que me otorgó durante la elaboración de esta tesis a través del proyecto DGAPA: IN107612 “Estudio de la coagulación del polvo protoplanetario” y del programa de becas tesis-licenciatura del Instituto de Geofísica-UNAM.

Esta tesis se la dedico a mis padres: Mónica y Luis, a mis hermanos: Héctor, Erick y Anahí. Especialmente dedicada a mis dos grandes amores: Diana y Liber.

Resumen

En esta tesis se presenta un estudio de la formación de los anillos tenues de Saturno basado en el modelo gravito-electrodinámico, suponiendo que el material que forma estos anillos (polvo) proviene de la superficie de los satélites y de la orilla externa del anillo A.

En el capítulo 1 de la tesis se narra secuencialmente la historia del estudio de los anillos desde los trabajos de Galileo hasta los trabajos teóricos realizados en la década de los setenta del siglo pasado por Richard Goldstein.

Como los anillos de Saturno son estructuras que forman parte de un sistema muy complejo formado por el planeta, los anillos y los satélites, en el capítulo 2 se describe la estructura interna de Saturno, su atmósfera, su campo magnético y su magnetosfera incluyendo también los resultados más recientes obtenidos por la sonda espacial Cassini que arribó a la vecindad de Saturno en el año 2004 y que continuará estudiando al planeta, a sus satélites y a sus anillos hasta el año 2017.

Como se ha propuesto que las superficies de los satélites son la fuente principal de polvo que forma a los anillos tenues, en el capítulo 3 se trata de los satélites saturnianos incluyendo los descubiertos recientemente por la misión Cassini.

El capítulo 4 está dedicado a los 7 anillos de Saturno. Este capítulo incluye sus características físicas así como las estructuras descubiertas en ellos tanto de naturaleza gravitacional (brechas) como posiblemente electromagnética (hélices).

El modelo gravito-electrodinámico se describe en el capítulo 5 y se resuelve la ecuación de movimiento considerando que las fuerzas gravitacional y electromagnética son las únicas fuerzas que participan en la dinámica del polvo. A partir de las soluciones se obtiene el radio de las partículas de polvo que escapan de las superficies satelitales y de la orilla externa del anillo A, y de estos valores, se infiere el tamaño del polvo que puede quedar atrapado cerca de los satélites formando anillos tenues, y del que escapa hacia regiones externas de la magnetosfera saturniana y/o escapa del medio magnetosférico al espacio interplanetario.

En el capítulo 6 se presentan los resultados obtenidos, suponiendo que las partículas son

inyectadas en la magnetosfera saturniana a $L_0 = 2.27, 2.77, 3.08, 3.95, 4.88, 6.26$ y 8.72 , donde L_0 es el parámetro magnético y los valores anteriores corresponden a la ubicación de la orilla externa del anillo A y de los satélites Egeón, Mimas, Encelado, Tetis, Dione y Rea respectivamente.

Los resultados muestran que el radio de las partículas, a , que escapan de la magnetosfera de Saturno, así como de las que quedan atrapadas es del orden de nanómetros, resultados que coinciden con las mediciones de la sonda Cassini.

Las partículas de polvo ($a < 1 \text{ nm}$) que permanecen cerca de los satélites quedan atrapadas por la fuerza de Lorentz y describen un movimiento adiabático (girociclotrón, entre los puntos espejo y de deriva longitudinal).

Las partículas de polvo ($1 \text{ nm} \leq a \leq 80 \text{ nm}$) que escapan, forman regiones de polvo más densas a medida que alcanzan las regiones donde se localizan los otros satélites que se consideran fuente de polvo, formando posiblemente estructuras anulares muy tenues. Es de particular importancia el polvo que escapa de Egeón ya que de acuerdo con los resultados obtenidos, el tamaño de las partículas de polvo que escapan del satélite coincide con los valores detectados por la sonda Cassini ($a \geq 3 \text{ nm}$) para el anillo G, por lo que se comprueba con este modelo que Egeón es la fuente de polvo que crea y alimenta a este anillo.

En el capítulo 6 también se presentan los resultados relacionados con la velocidad con la que escapan al medio interplanetario las partículas de polvo que son eyectadas de todos los satélites antes citados, así como el tiempo que les lleva viajar del satélite a la frontera de la magnetosfera externa de Saturno.

Finalmente se presentan las conclusiones de este trabajo así como las referencias.

Índice general

Agradecimientos	III
Resumen	V
Índice general	VII
Índice de figuras	IX
Índice de cuadros	XIII
1. El descubrimiento de los anillos en Saturno	1
2. Saturno	9
2.1. Estructura interna	9
2.1.1. Primeros modelos	9
2.1.2. Modelos recientes	12
2.2. Atmósfera	18
2.2.1. Composición química	18
2.2.2. Distribución vertical	18
2.2.3. Estructura latitudinal	21
2.2.4. Estructuras regionales atmosféricas	21
2.2.5. Estructura de bandas y perfil de velocidades de la capa nubosa	27
2.2.6. Modelos de dinámica atmosférica	29
2.3. Campo magnético y magnetosfera	34
2.3.1. Campo magnético	34
2.3.2. Magnetosfera	37

3. Satélites	45
3.1. Introducción	45
3.2. Descubrimiento de los satélites de Saturno	45
3.3. Clasificación de los satélites por grupos orbitales	49
3.3.1. Lunetas de los anillos	50
3.3.2. Satélites pastores	51
3.3.3. Satélites coorbitales	51
3.3.4. Alciónides	51
3.3.5. Satélites troyanos	51
3.3.6. Satélites irregulares	52
3.3.7. Satélites grandes	54
4. Anillos	87
4.1. Encuentro con los anillos	87
4.2. Sistema de anillos de Saturno	90
4.2.1. Composición, tamaño y forma de las partículas en los anillos	90
4.2.2. Estructuras en los anillos	93
4.2.3. Edad y evolución de los anillos	95
4.3. Clasificación y características de los anillos de Saturno	96
4.3.1. Anillos principales o densos	96
4.3.2. Anillos tenues	105
5. Modelo Gravito-electrodinámico	117
5.1. Plasma y polvo	117
5.2. Dinámica del polvo en la magnetosfera de Saturno	119
5.2.1. Modelo de Mendis y Axford	120
5.3. Modelo Gravito-electrodinámico kroniano	122
5.4. Fuentes de polvo	129
6. Resultados	133
6.1. Resultados y discusión de resultados	133
Conclusiones	141
Publicaciones	143
Bibliografía	145

Índice de figuras

1.1. Esquema de Saturno realizada por Galileo en 1610	3
1.2. Esquema de Saturno realizada por Galileo en 1616	3
1.3. Facetas de Saturno, Huygens, 1659	4
1.4. Dibujo de los anillos de Saturno realizada por Huygens en 1659	5
1.5. Dibujo de la división en los anillos, Cassini, 1676	6
1.6. Estructura fina en los anillos de Saturno, Lyot, 1943	7
2.1. Esquema del interior de Saturno propuesto por D. J. Stevenson en 1982	12
2.2. Ilustración de las formas que adquiere un planeta debido a su rotación	15
2.3. Esquema del interior de Saturno propuesto por Guillot (2005) y Fortney (2010)	17
2.4. Representación esquemática de la composición y estructura vertical de nubes en la atmósfera de Saturno	20
2.5. Imagen cualitativa de la estructura latitudinal en la atmósfera superior de Saturno	22
2.6. Gran mancha blanca observada en febrero del 2011 por <i>Cassini</i>	24
2.7. Esquema de la sección transversal atmosférica mostrando el proceso de con- vección en Saturno	25
2.8. Proyecciones ortográficas del polo norte y sur, registradas entre el 15 y el 16 de Junio del 2008 por <i>Cassini</i>	28
2.9. Dibujo de la estructura de bandas latitudinales en Saturno, dividida en zonas y cinturones	29
2.10. Comparación de los perfiles de velocidades de las capas nubosas en Saturno, obtenidos por <i>Viajero</i> , <i>Hubble</i> y <i>Cassini</i>	30
2.11. Modelo numérico de circulación general atmosférica, basado en las ecuacio- nes de movimiento para un modelo de capas superficiales	31
2.12. Esquema de modelos de circulación profunda, mostrando las columnas de Taylor-Proudman y los cilindros concéntricos	32

2.13. Circulación general de Saturno y características relevantes en su atmósfera . . .	33
2.14. Trayectorias de <i>Pionero 11</i> , <i>Viajero 1</i> y <i>Viajero 2</i> en su aproximación a Saturno	35
2.15. Trayectorias de <i>Pionero 11</i> , <i>Viajero 1</i> , <i>Viajero 2</i> y <i>Cassini</i> en su aproximación a Saturno	36
2.16. Representación esquemática de las regiones de plasma en Saturno	39
2.17. Trayectoria de partículas cargadas a lo largo de las líneas del campo magnético	40
2.18. Estructura toroidal de los <i>cinturones de radiación</i> alrededor de Saturno	41
2.19. Ilustración de la distorsión de la magnetosfera de Saturno	42
2.20. Imagen artística de la magnetosfera de Saturno	43
3.1. Huygens en su telescopio	46
3.2. Imágenes de los satélites pequeños obtenidas por el equipo de imágenes de <i>Cassini</i> en 2004	50
3.3. Imagen del satélite <i>Antea</i> obtenida por el equipo de imágenes de <i>Cassini</i> en 2008	52
3.4. Imagen de <i>Mimas</i> obtenida por <i>Cassini</i> el 13 de febrero de 2010	56
3.5. Mapa topográfico de <i>Mimas</i> con una escala de 0.43 km/pixel	57
3.6. Imagen de <i>Encelado</i> obtenida por <i>Cassini</i> el 14 de junio de 2005	58
3.7. Imagen de <i>Encelado</i> y el anillo E obtenida por <i>Cassini</i> el 15 de septiembre de 2006	59
3.8. Imagen obtenida por <i>Cassini</i> , en el espectro de luz visible, el 13 de octubre de 2009 donde se observan las plumas de material eyectado en el hemisferio sur de <i>Encelado</i>	60
3.9. Mapa topográfico de <i>Encelado</i> con una escala de 0.11 km/pixel	61
3.10. Mapa topográfico del hemisferio sur de <i>Encelado</i> donde se observan las fisu- ras geológicas conocidas como las rayas de tigre	62
3.11. Imagen sobrepuesta del mapa topográfico del polo sur de <i>Encelado</i> , y medi- ciones espectrales de las rayas de tigre	62
3.12. Imagen de <i>Tetis</i> obtenida por <i>Cassini</i> el 3 de febrero de 2010	63
3.13. Mapa topográfico de <i>Tetis</i> con una escala de 0.29 km/pixel	64
3.14. Imagen del cráter <i>Odiseo</i> en <i>Tetis</i> obtenida por <i>Cassini</i> el 24 de diciembre de 2005	65
3.15. Imagen de <i>Dione</i> obtenida por <i>Cassini</i> el 12 de diciembre de 2011	66
3.16. Mapa topográfico de <i>Dione</i> con una escala de 0.15 km/pixel	67

3.17. Imagen de los acantilados en el hemisferio trasero de Dione obtenida por <i>Cassini</i> el 24 de julio de 2006	68
3.18. Imagen de Rea obtenida por <i>Cassini</i> el 26 de noviembre de 2005	69
3.19. Mapa topográfico de Rea con una escala de 0.67 km/pixel	70
3.20. Imagen de Titán obtenida por <i>Cassini</i> el 30 de enero de 2012	71
3.21. Estructura interna de Titán	72
3.22. Patrón de nubes en el polo norte de Titán	74
3.23. Ilustración de la estructura y composición de la atmósfera de Titán	75
3.24. Mapa topográfico de Titán	76
3.25. Vista panorámica de Titán obtenida por la sonda <i>Huygens</i> en su descenso	77
3.26. Imagen de Hiperión obtenida por <i>Cassini</i> el 26 de septiembre de 2005	78
3.27. Imagen de Hiperión obtenida por <i>Cassini</i> el 26 de septiembre de 2005	79
3.28. Imagen de Japeto obtenida por <i>Cassini</i> el 10 de septiembre de 2007	80
3.29. Mapa topográfico de Japeto con una escala de 0.8 km/pixel	81
3.30. Mosaico de imágenes de la cordillera ecuatorial de Japeto obtenidas por <i>Cassini</i>	82
3.31. Imagen de Febe obtenida por <i>Cassini</i> el 23 de junio de 2004	83
3.32. Forma casi esférica de Febe	84
3.33. Mapa topográfico de Febe con una escala de 0.23 km/pixel	85
3.34. Cráteres de impacto en Febe	86
4.1. Imagen de los anillos de Saturno obtenida por el <i>Pionero 11</i>	88
4.2. Imagen del anillo D obtenida por el <i>Viajero 2</i> , el 25 de agosto de 1981	88
4.3. Imagen del anillo F obtenida por el <i>Viajero 1</i>	89
4.4. Imagen de los anillos obtenida por el <i>Viajero 2</i>	89
4.5. Cuerpos dinámicos y efímeros DEB	92
4.6. Imagen en el ultravioleta de los anillos principales de Saturno	93
4.7. Ilustración de ondas espirales longitudinales y transversales en los anillos	94
4.8. Diversos fenómenos ondulatorios en el anillo A	95
4.9. Composición de la profundidad óptica y la imagen de los anillos principales de Saturno	97
4.10. Composición de la profundidad óptica y la imagen del anillo A de Saturno	98
4.11. Imagen de la brecha de Encke	99
4.12. Propellers en el anillo A	100
4.13. Composición de la profundidad óptica y la imagen del anillo B de Saturno	100

4.14. Imagen de la luneta <i>S/2009 S1</i> en el anillo B	101
4.15. Spokes en el anillo B	102
4.16. Composición de la profundidad óptica y la imagen del anillo C de Saturno	103
4.17. Composición de la profundidad óptica y la imagen de la División de Cassini	104
4.18. Imagen de 255° del anillo F	105
4.19. Anillos tenues de Saturno	106
4.20. Anillo D observado por las naves <i>Viejo</i> y <i>Cassini</i>	109
4.21. Anilletes en brechas de los anillos principales	110
4.22. Imagen del arco anular en el anillo G	111
4.23. Arcos anulares de las lunetas <i>Ante</i> y <i>Metone</i>	112
4.24. Anillo de <i>Febe</i>	114
5.1. Configuración del modelo Gravito-electrodinámico	123
6.1. Gráficas de las soluciones del modelo Gravito-electrodinámico para cada una de las fuentes de polvo	134
6.2. Gráfica de las soluciones del modelo Gravito-electrodinámico para <i>Egeón</i>	135
6.3. Gráfica del modelo Gravito-electrodinámico para <i>Egeón</i> con un acercamiento en la solución $p_1(x)$ para valores de $p < 0$ ($Q_0 > 0$)	136
6.4. Gráfica de las soluciones del modelo Gravito-electrodinámico para las 7 fuentes	137
6.5. Regiones de escape para granos cargados positivamente, indicando el inter- valo de tamaño de grano y la velocidad de escape para cada una de las 7 fuentes	139

Índice de cuadros

2.1. Características de Saturno recabadas por Stevenson en 1982	11
2.2. Características de Saturno recabadas por Hubbart en 2009	14
2.3. Abundancia de especies observadas en la atmósfera de Saturno	19
3.1. Características físicas de los satélites grandes de Saturno	55
4.1. Características físicas de los anillos densos de Saturno	97
4.2. Características físicas de los anillos tenues de Saturno	107
5.1. Características físicas de las fuentes de polvo	130
5.2. Características físicas de Saturno y constantes físicas en unidades cgs	131
6.1. Radios, tiempos y velocidades de escape de las partículas eyectadas para las 7 fuentes de polvo	138

Capítulo 1

El descubrimiento de los anillos en Saturno

Los anillos de Saturno están entre las más familiares, hermosas e intrigantes estructuras en el sistema solar. Su compleja y estriada forma, similar a las ranuras en un disco de vinilo, inspiran de igual forma el placer estético y el interés intelectual.

Los anillos son estructuras formadas por rocas y polvo que provienen, de acuerdo con las teorías actuales, de la destrucción de satélites en el caso de las rocas, o la superficie o el interior de los satélites en el caso del polvo. Los anillos de este planeta gigante han sido clasificados con base en el tamaño del material que los forma, en anillos de rocas, de rocas y polvo o simplemente de polvo. En particular, estos últimos siguen siendo tema de debate por el tipo de fenómenos que presentan, desde las interacciones puramente gravitacionales hasta las electromagnéticas, y por su origen.

Por otro lado, el descubrimiento de los haces de polvo escapando de Saturno está vinculado con la formación de estos anillos y actualmente se sabe que, en el caso del anillo E, la fuente son los géiseres que se observan en la superficie de Encelado.

Así mismo, el anillo F, que es otro de los anillos de polvo, tiene asociados un par de satélites pastores, que no solamente confinan el material del anillo en una región del espacio, sino que, gracias a esto, las interacciones electromagnéticas que se producen entre el material del anillo y el plasma magnetosférico, propician la formación de estructuras con una dinámica muy compleja, que parece ser diferente en el tercer anillo de polvo (G), cuya fuente no es conocida y su dinámica no ha sido del todo estudiada.

Historia del descubrimiento de los anillos

El primer telescopio práctico fue inventado en Los Países Bajos en 1608 por Hans Lipershey (1570-1619), utilizando una serie de lentes concavas y convexas para construir un

instrumento capaz de amplificar los objetos distantes tres veces su tamaño (3X). Al año siguiente, Galileo Galilei (1564-1642) originario de Pisa Italia, construyó su primer telescopio basándose en la descripción del instrumento alemán y mejorándolo de tal manera que logró ampliaciones 30 veces mayores (van Helden, 1974).

Utilizando este telescopio, Galileo se convirtió en la primera persona en observar los anillos de Saturno, desde Padua Italia, cuatro meses después de la publicación de su obra *Sidereus nuncius* en Julio de 1610. El día 30 de ese mismo mes, informó de su descubrimiento a Belesario Vinta en una carta dirigida a éste, quien fungía como secretario de Cosimo II de Médici, cuarto Gran Duque de la Toscana.

“Comencé el 15 de este mes otra vez observando Júpiter en la mañana por el Este, con sus planetas Mediceos ordenados, y he descubierto una extraña maravilla, la cual me gustaría dar a conocer a su Majestad y a su Señor, manteniéndolo en secreto hasta que mi trabajo sea publicado. Y he de decirles que ninguna persona hasta ahora ha observado semejante maravilla.. ..la estrella Saturno no está solitaria, sino que es una composición de tres estrellas, que se tocan unas a otras sin cambiar de posición ni presentan movimiento entre sí. Están dispuestas en una línea paralela al zodíaco, y la estrella de enmedio es tres veces mayor que las laterales, ordenándose de la siguiente forma oOo.” (van Helden, 1974).

Sin querer alertar a otros astrónomos sobre su descubrimiento, pero al mismo tiempo estableciendo un precedente de sus observaciones, Galileo envió el siguiente mensaje a Johannes Kepler (1571-1630), “smaismrmilmepoetaleumibunenugttauras”, un anagrama para *Altissimum planetam tergeminum observavi*, o “ he observado la triple forma del planeta más alejado (Saturno)”, (Miner et al., 2007).

La potencia del telescopio utilizado por Galileo, aquel verano de 1610, no fue suficiente para develar la forma de los anillos en Saturno, siendo esto evidente en la descripción mostrada anteriormente, y por el bosquejo derivado de aquellas observaciones (Figura 1.1).

Galileo continuó observando a Saturno desde julio de 1610 hasta Mayo de 1612, y después de un receso, en diciembre de 1612 retornó a sus observaciones encontrando diferencias con lo visto anteriormente, “ No se que decir, es una situación sorprendente y novedosa”, fue lo que escribió a finales de 1612 (Burns, 1999). Lo que observó en ese entonces fue a Saturno con los anillos vistos de canto, siendo estos invisibles para un observador en la Tierra.

Galileo vaticinó que la configuración anterior retornaría, sin embargo en el verano de 1616, se encontró con una forma diferente en la “cambiante estrella” (ver Figura 1.2).

1. El descubrimiento de los anillos en Saturno

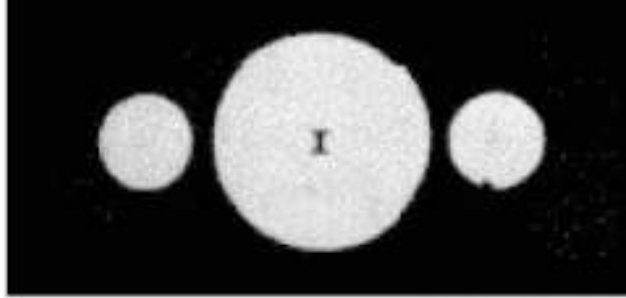


Figura 1.1: Al dirigir por primera vez su telescopio hacia Saturno en Julio de 1610, Galileo fue sorprendido por su apariencia triple, como su primer dibujo lo muestra.

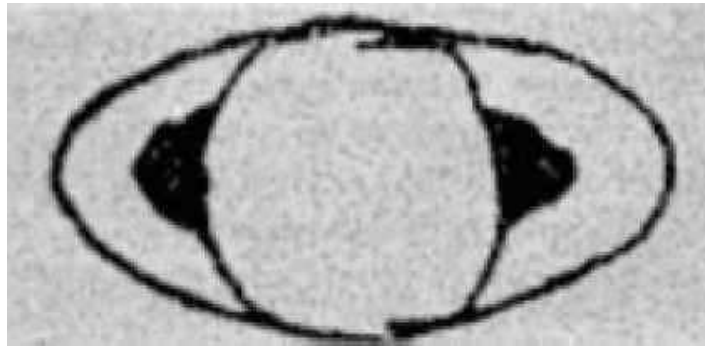


Figura 1.2: En 1616, Galileo observó un Saturno con una configuración distinta, este dibujo nos muestra el *ansae* o asas en ambos lados del planeta, algunos historiadores refieren que Galileo menciona un Saturno con orejas.

Las protuberancias peculiares observadas por Galileo en 1616, extendiéndose en ambos lados del planeta, fueron conocidas como *ansae* o “asas”.

Entre 1610 y 1656, muchos astrónomos realizaron observaciones de Saturno, elaborando diagramas y conjeturando teorías sobre la forma de los anillos vista con sus telescopios como fue el caso de Johannes Hevelius (1611-1689), que publicó en 1656 un libro ilustrado titulado *Disertatio de natura Saturna facie*, donde menciona que Saturno era un elipsoide con dos protuberancias ligadas físicamente al planeta.

En 1646, Francesco Fontana (1580-1656), mencionó un Saturno con asas en su libro *No-vae coelestium terrestriunque return observationes*, y Pierre Gassendi (1592-1655), realizó observaciones detalladas de Saturno, comenzando en 1633 y continuando hasta su muerte acaecida en 1655, y catalogó los cambios ocurridos en la apariencia de Saturno, en un esfuerzo por explicar como estos ocurrían (van Helden, 1974).

Gassendi describió sus observaciones en la publicación de *Animadversiones* en 1649; sin embargo, los diagramas producto de sus observaciones, vieron la luz hasta la publicación de

su obra póstuma *Opera omnia* en 1658.

En 1651, Giovanni Battista Riccioli (1598-1671) publicó un almanaque ilustrado de Saturno, mostrando diferentes facetas observadas desde 1610, en su libro *Almagestum novum*, mientras que la interpretación adecuada de las “asas” vistas en Saturno fue deducida, finalmente, en febrero de 1656, por Christiaan Huygens (1629-1695)(ver Figura 1.3).

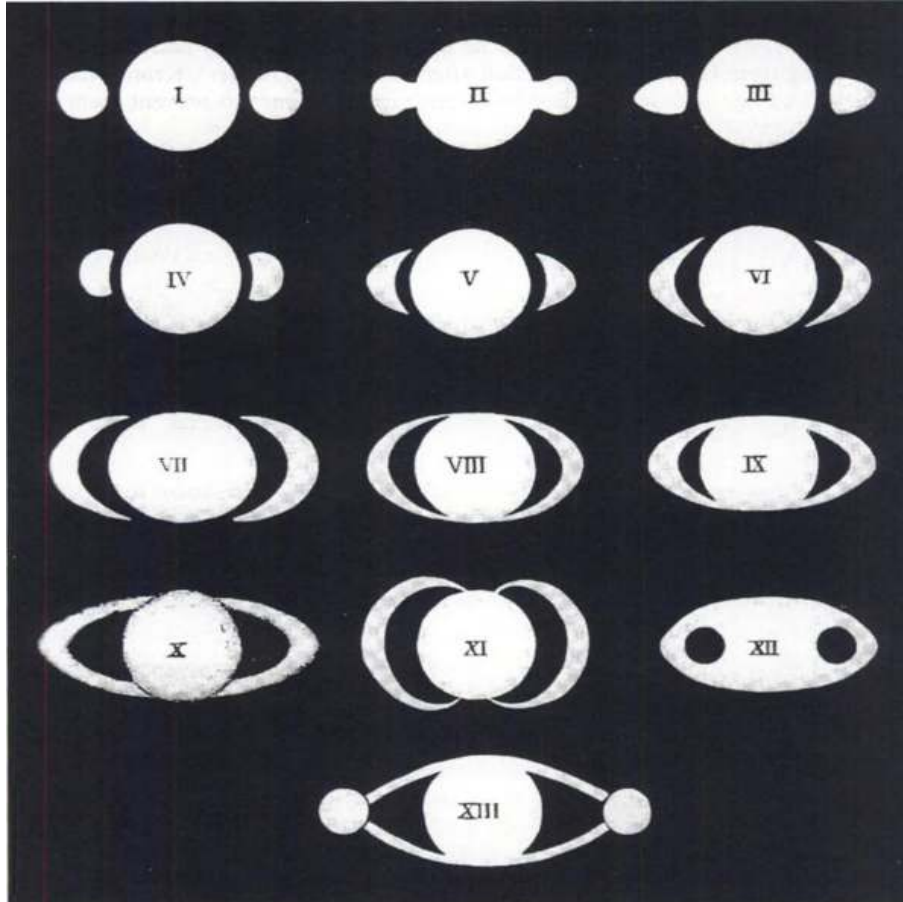


Figura 1.3: Facetas de Saturno publicadas por Christian Huygens en *Systema Saturnia* (1659), mostrando las observaciones e interpretaciones realizadas por otros astrónomos. I es una copia del dibujo realizado por Galileo en 1610. El resto de los diagramas se atribuyen a las observaciones o teorías de: II Schneider (1614); III Riccioli (1641-1643); IV-VII Hevelius (1642-1647); VIII-IX Riccioli (1648-1650); X Divini (1646-1648); XI Fontana (1636); XII Gassendi (1646); XIII Fontana y otros (1644-1645).

Para su interpretación de los anillos, Huygens pensó en una solución plana para la apariencia de éstos, y se dejó influenciar por la teoría de vórtices de Rene Descartes (1596-1650), la cual menciona que el Universo estaba formado por discos contiguos de materia en rotación, en parte como explicación del movimiento orbital observado en los satélites planetarios.

El concepto de gravedad era desconocido en aquella época, en la cual Isaac Newton (1643-1727) no había propuesto aún su teoría de la gravitación universal, la cual dio a conocer

1. El descubrimiento de los anillos en Saturno

hasta 1687 con la publicación de los *Principia Mathematica*.

En 1656, Huygens publicó un documento breve, *De Saturni luna observatio nova*, anunciando el descubrimiento de una luna que posteriormente sería bautizada como Titán, y estableciendo que había encontrado una explicación para el *ansae* de Saturno.

Al igual que Galileo, dió a conocer su descubrimiento a través de un anagrama, “aaaaaacccccc-deeeehiiiiiiiIIllmmnnnnnnnnnooooppqrrstttttuuuuu”. El anagrama es traducido como *Annu-lo cingitur, tenui, plano, nusquam cohaerente, ad eclipticam inclinato*, o “Está rodeado por un anillo plano y delgado, sin tocar en ningún lado e inclinado respecto a la eclíptica”.

Huygens finalmente publicó su teoría sobre el anillo de Saturno en Julio de 1659, en su obra *Systema Satvrnivm; sive, De causis mirandorum Satvrni phaenomenôn, et comite ejus planeta nova* (Figura 1.4).

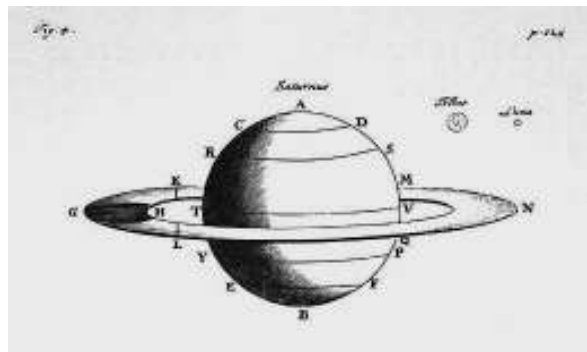


Figura 1.4: Imagen de los anillos de Saturno realizada por Huygens en 1659.

Aunque la teoría del disco sólido fue generalmente aceptada, en 1670 aún se debatía la composición de la materia que formaba dicho anillo. Mientras Huygens pensaba que era un anillo sólido, otros creían que estaba formado por líquido o por pequeños satélites.

En 1676, Giovanni Domenico Cassini (1625-1712), descubrió una ranura en los anillos, actualmente conocida como la “División de Cassini”, y con esto, la teoría del disco sólido propuesta por Huygens fue olvidada momentáneamente (Figura 1.5).

Cassini pensaba que los anillos estaban compuestos por pequeños y numerosos satélites, sin embargo, en 1791, William Hershel (1738-1822) sugirió que los anillos estaban compuestos por dos anillos sólidos (Harland, 2007).

Dada la importancia de Hershel frente a la comunidad astronómica, la teoría del disco(s) sólido(s) fue retomada, aun cuando, algunos años antes, Pierre Simon de Laplace (1749-1827) conjeturó que los anillos de Saturno estaban formados por un gran número de anillos angostos y sólidos, y cuyo centro de masa no coincidía con su centro geométrico (1787). Ya en 1785 Laplace había demostrado que un disco sólido era inestable, sin embargo postuló,

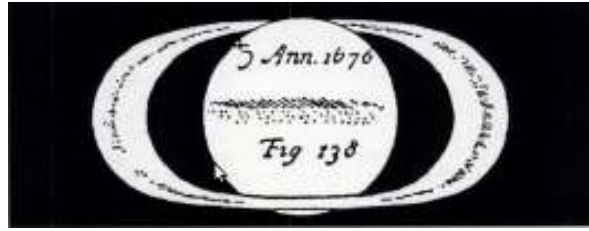


Figura 1.5: Dibujo realizado por Cassini de la división en los anillos de Saturno en 1676.

mas nunca demostró, que un disco sólido era estable si la distribución de masa era desigual (Mahon, 2003).

Para 1848, Édouard Roche (1820-1883), especuló que los anillos podían componerse de los restos de satélites “líquidos”, destruidos debido a fuerzas de marea.

La estocada final a las teorías de discos sólidos la dió James Clerck Maxwell (1831-1879), cuando en 1859, publicó el documento “On the Stability of the Motion of Saturn’s Rings”, donde probó que un anillo sólido era inestable, a excepción de que $4/5$ de su masa estuviera concentrada en el borde, una estructura que no coincidía con las observaciones de los anillos de Saturno realizadas en la época. Maxwell demostró que la única estructura anular estable era aquella formada por un gran número de cuerpos orbitando independientemente (Mahon, 2003).

En 1866, Daniel Kirkwood (1814-1895), presentó una teoría que explicaba las características físicas mostradas por los anillos, señalando que una partícula situada en la *División de Cassini*, está en resonancia con el satélite de Saturno, Encelado. Posteriormente, en 1872, indicó que la *División de Cassini* y la *División de Encke* (esta última en honor a Johann Franz Encke (1791-1865)), se asociaban con las resonancias de los cuatro satélites interiores: Mimas, Encelado, Tétis y Dione.

El primero en observar con claridad la *División de Encke*, en 1888, fue James Edward Keeler (1857-1900), siendo el primero en obtener imágenes espectrográficas de los anillos de Saturno. Producto de sus observaciones, publicó un documento en 1895 (Keeler, 1895). Como consecuencia de las observaciones realizadas por Keeler, se concluyó que la velocidad orbital de los anillos decrece con la distancia al centro de Saturno, siendo ésta, la primera evidencia observacional que apoyaba la demostración teórica desarrollada por Maxwell en 1857.

Entre principios y mediados del siglo XX, una serie de observadores utilizando telescopios con excelente resolución, reportaron haber visto divisiones finas en los anillos de Saturno (Harland, 2007). En particular, Percival Lawrence Lowell (1855-1916), en 1915 presentó un

1. El descubrimiento de los anillos en Saturno

reporte donde manifestó haber visto una "doble" división de Encke, por observaciones realizadas entre 1909 y 1914. En 1943, Bernard Ferdinand Lyot (1897-1952), reportó haber observado numerosas divisiones en los anillos (Figura 1.6).

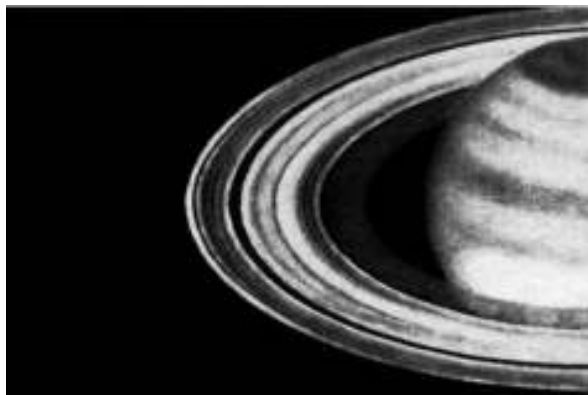


Figura 1.6: En 1943, Lyot hizo este dibujo de los anillos de Saturno, mostrando una fina estructura anular. Aunque sus contemporáneos mencionaron que la idea de semejante estructura era ilusoria, la misión *Viajero* en su arribo a los anillos, le dio la razón.

Varios años después (1947), Harold Jeffreys (1891-1989), mediante cálculos derivados de la teoría propuesta por Roche, estimó que los anillos podrían estar compuestos por hielo y rocas. Posteriormente, Gerrit Pieter Kuiper (1905-1973), utilizando un estudio espectroscópico de los anillos, reportó que las partículas que los componen podrían ser de hielo o de rocas con material congelado en su superficie (Harland, 2007). En 1972, Richard M. Goldstein del JPL de la NASA, utilizando una antena gigantesca como radar, encontró que los anillos de Saturno reflejan la energía en la frecuencia de las microondas con una eficiencia cercana al 60%. Goldstein infirió de este resultado que, además de hielo, los anillos deberían de estar compuestos por un gran contenido de rocas con una alta proporción de metal, muchas de ellas de gran tamaño y forma irregular (Goldstein, 1973).

Con la llegada de la exploración espacial, en las últimas cuatro décadas se han realizado nuevos descubrimientos relacionados con los anillos, pero de esto se hablará en la sección 4.1.

Capítulo 2

Saturno

2.1. Estructura interna

2.1.1. Primeros modelos

A finales del siglo XIX, los astrónomos pensaban que los planetas gigantes tenían densidades similares a la del Sol. En particular, Richard Anthony Proctor suponía que Saturno debería de ser una especie de "Sol miniaturizado". En su libro titulado *Saturn and its system* (1895) Proctor menciona que:

Sobre una región de cientos de miles de kilómetros cuadrados, la superficie brillante del planeta debe ser dominada por fuerzas subplanetarias. Grandes masas de vapor ardiente deben ser expulsadas desde el interior, alcanzando enormes alturas y desplazando el manto envolvente de nubes, que oculta una superficie perturbada, o debe por si misma formar una inmensa capa de nubes reconocible por su enorme extensión... (Proctor, 1895)

De hecho, los planetas gigantes eran reconocidos como estrellas fallidas, las cuales no se habían enfriado en su totalidad y como consecuencia emitían más energía de la recibida por el Sol (Moore, 2011).

En 1923, Harold Jeffreys publicó una serie de artículos mostrando que el modelo de *estrella fallida* no era sustentable, debido a que los planetas gigantes no tuvieron la masa que se asocia a la formación de un cuerpo estelar.

En 1932, Rupert Wildt realizó mediciones espectrales de Saturno, concluyendo que su composición primordial era el hidrógeno. En 1938, Wildt, utilizando el modelo para enanas blancas desarrollado en la tesis doctoral de Daulat Singh Kothari (Kothari, 1936), llegó a la conclusión de que los planetas gigantes estaban compuestos principalmente por hidrógeno

2.1. Estructura interna

y helio. Wildt mencionó que la estructura interna de Saturno consistía en un núcleo rocoso de 45,000 km de diámetro similar al interior de la Tierra, cubierto por una capa de hielo de 12,000 km de espesor y una capa exterior de hidrógeno y helio de 25,000 km de ancho. En esta última capa las condiciones de presión y temperatura serían tales que el hidrógeno podría hipotéticamente sufrir un cambio de un estado molecular a uno metálico (Wildt, 1938).

Ya en 1935, Eugene Wigner y Hillard Bell Huntington habían propuesto que, sometidos a una presión de aproximadamente 25 GPa, los átomos de hidrógeno mostrarían propiedades metálicas, perdiendo control sobre sus electrones (Wigner y Huntington, 1935). El modelo propuesto por Wildt fue bien recibido en general, con la corrección en 1943 por Ralph Kronig (1904-1995), donde demostraba que la presión interior en los planetas gigantes era suficiente para forzar el hidrógeno a adoptar una fase metálica.

Basándose en el concepto de que el interior de los planetas gigantes era químicamente homogéneo, y que cualquier estructura sufre cambios de estado debido a cambios de presión, W. H. Ramsey sugirió que el hidrógeno en el interior de Saturno debería estar en estado metálico y, por lo tanto, contener un núcleo más denso de lo que Wildt había propuesto (Ramsey, 1951). Posteriormente, Ramsey también mencionó que el hidrógeno constituía el 62 % de la masa planetaria, la cual se encontraba localizada en dos partes: una más profunda en estado metálico de 36,000 km de espesor y otra exterior en estado molecular, además de contener un núcleo rocoso de aproximadamente 27,000 km de radio a una temperatura de 15,000 K y una masa equivalente a 10 masas terrestres, (Ramsey, 1952). Ramsey consideró que la mayoría de la materia en el interior planetario se encontraba en estado líquido y en equilibrio con las fuerzas gravitacionales; por lo que utilizó la ecuación de equilibrio hidrostático (Ec. 2.1), y el periodo de rotación aceptado para Saturno en aquella época de 10 horas y 38 minutos.

$$\frac{dP}{dr} = -\rho \left\{ g(r) - \frac{2}{3} \omega^2 r \right\} \quad (2.1)$$

En esta ecuación se consideran propiedades intrínsecas de Saturno, como su densidad (ρ), la gravedad local ($g(r)$), la distancia desde el centro (r), y la velocidad angular (ω), derivada del periodo de rotación mencionado.

A partir del estudio de la masa y dinámica de satélites en Saturno, Harold Jeffreys propuso un modelo de la estructura interna, usando como base el modelo desarrollado por Ramsey; y añadiendo términos más finos, tales como la respuesta del planeta a su propia rotación (Jeffreys, 1954).

Los modelos de la estructura interna de los planetas gigantes, en particular de Saturno, requerían nutrirse de resultados observacionales y experimentales. La masa (M), el radio ecuatorial (a) y la densidad (ρ) fueron obtenidos a partir de observaciones telescópicas desde la Tierra.

W. B. Hubbard y R. Smoluchowski plantearon un modelo del interior planetario más completo, añadiendo coeficientes (momentos o armónicos gravitacionales), que determinaban el achatamiento de la superficie y la distribución de la materia en el interior de Saturno, (Hubbard y Smoluchowski, 1973). Al igual que la masa y el radio, los armónicos gravitacionales son resultados observacionales a partir de las órbitas de satélites naturales y la precesión de los anillos.

Hasta ese momento, los modelos teóricos eran acompañados por observaciones y experimentos realizados en la Tierra, pero con la llegada de la sonda espacial *Pionero 11* en 1979 y posteriormente *Viajero 1* y *2* en 1980 y 1981 a Saturno, el panorama de la estructura interna fue enriquecida con datos obtenidos *in situ*.

David John Stevenson llegó a los resultados mostrados en el Cuadro 2.1, y al modelo del interior de Saturno mostrado en la Figura 2.1, tras basarse en el modelo de Hubbard y otros, apoyarse en los datos recientes obtenidos de las misiones espaciales *Pionero 11* y *Viajero 1* y *2*, en las observaciones realizadas en la Tierra y en los experimentos de física de altas presiones (Stevenson, 1982).

Parámetro	Medición	Referencia
Masa (Tierra=1)	94.147	<i>Allen, 1973</i>
Radio(10^9 cm) ($P=1$ bar)	5.83 ± 0.003	<i>Hubbard et al., 1980</i>
Densidad promedio ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	0.69 ± 0.01	
Harmónicos gravitacionales		
j_2	$(16479 \pm 18) \times 10^{-6}$	<i>Null et al., 1981</i>
j_4	$-(937 \pm 38) \times 10^{-6}$	<i>Null et al., 1981</i>
Achatamiento observado	0.088 ± 0.008	<i>Gehrels et al., 1980</i>
Periodo de rotación	10 hrs. 39.4 min.	

Cuadro 2.1: Características de Saturno recabadas por Stevenson a partir de observaciones, experimentos y modelos. (Adaptada de Stevenson, 1982).

2.1. Estructura interna

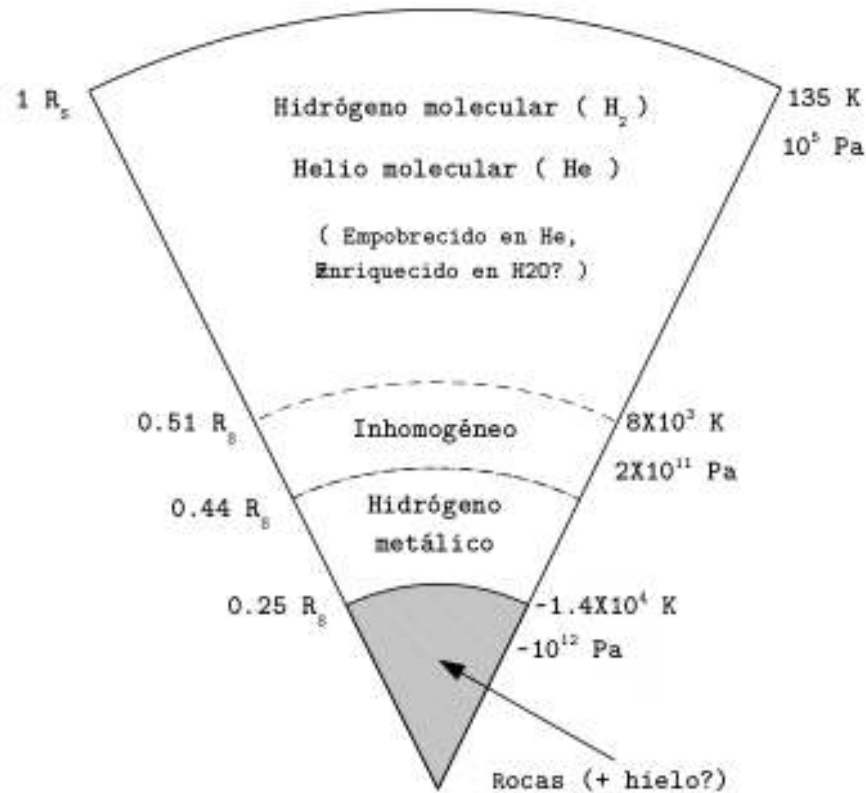


Figura 2.1: Esquema de la estructura interna de Saturno. (Adaptada de Stevenson, 1982).

Podemos observar en el modelo recreado por Stevenson, un diámetro de Saturno de $\sim 51,000$ km a un nivel de presión de 10^5 Pa, al igual que una región de hidrógeno metálico de $\sim 22,000$ km a una presión de 2×10^{11} Pa, y un núcleo rocoso de $\sim 13,000$ km bajo una presión de $\sim 10^{12}$ Pa.

2.1.2. Modelos recientes

Casi 20 años después de la llegada de las sondas espaciales *Viajero 1* y *2* a Saturno, fue lanzada la misión *Cassini-Huygens*, el 15 de Octubre de 1997, y después de un largo viaje interplanetario, entró en órbita alrededor de Saturno el 1 de Julio del 2004.

Cassini-Huygens es una de las misiones espaciales más ambiciosas jamás lanzadas al espacio. Equipado con una serie de instrumentos y cámaras, es capaz de realizar mediciones precisas y de tomar imágenes detalladas de las condiciones atmosféricas y espectrales en

Saturno, sus anillos y sus satélites *.

Por otro lado, el 24 de Abril de 1990, la NASA puso en órbita alrededor de la Tierra el telescopio espacial *Hubble* (HST por sus siglas en inglés). Este telescopio cuenta con un espejo principal de 2.4 m de diámetro, y con instrumentos que registran la luz en el espectro visible, el ultravioleta y el infrarrojo. Se encuentra orbitando alrededor de la Tierra a 593 km sobre el nivel del mar, con un periodo orbital entre 96 y 97 minutos. La ventaja de disponer de un telescopio más allá de la atmósfera radica, principalmente, en que se pueden eliminar los efectos de la distorsión atmosférica. Además, la atmósfera absorbe fuertemente la radiación electromagnética en ciertas longitudes de onda, especialmente en el infrarrojo, disminuyendo la calidad de las imágenes e imposibilitando la adquisición de espectros en ciertas bandas espectrales cuyas longitudes de onda son absorbidas por la atmósfera terrestre. Los telescopios terrestres se ven también afectados por factores meteorológicos (presencia de nubes) y la contaminación lumínica ocasionada por los grandes asentamientos urbanos.

El telescopio espacial *Hubble* tomó imágenes de alta calidad de las nubes de la atmósfera saturniana, monitoreó el grosor y la densidad de los anillos y buscó nuevos satélites naturales. También registró imágenes en el infrarrojo de la superficie de Titán, que ayudaron a la misión *Cassini* a ubicar el lugar donde tenía que aterrizar la sonda *Huygens*.

En particular, a través del telescopio se ha observado la superficie de Saturno y medido la velocidad de las regiones latitudinales para conocer el periodo de rotación y los elementos que constituyen la atmósfera ya que estos nos brindan pistas sobre la composición del interior planetario[†].

Actualmente los modelos del interior de los planetas gigantes están contruidos a partir de mediciones observacionales, de resultados experimentales y de desarrollos teóricos y computacionales. Como resultado de las mediciones realizadas por la misión *Cassini*, los modelos teóricos pudieron ajustarse y así obtener una visión más completa de la estructura interna, la dinámica y la composición de Saturno.

En el Cuadro 2.2 se pueden observar algunas características de Saturno obtenidas por las misiones *Viajero* y *Cassini*, así como algunos parámetros derivados de la teoría y el modelo computacional. Estas características y parámetros proporcionan una imagen actual del interior de Saturno y su dinámica.

*Misión *Cassini-Huygens*, <http://saturn.jpl.nasa.gov/>

†Telescopio Espacial *Hubble*, <http://hubblesite.org/>

2.1. Estructura interna

Parámetro	<i>Viajero</i>	<i>Cassini</i>	Referencia
Masa M (Tierra=1)		95.16 ± 0.02	<i>Jacobson et al., 2006</i>
Radio ecuatorial a (km)($P=1$ bar)	60268 ± 4		<i>Lindal et al., 1992</i>
Radio polar b (km)($P=1$ bar)	54364 ± 10		<i>Lindal et al., 1992</i>
Periodo de rotación P_s (s)	38364 ± 7	38745 ± 36	<i>Cecconi y Zarka, 2005</i>
Masa del núcleo (Masas terrestres)	19.24	18.65	
Harmónicos gravitacionales			
$j_2 \times 10^6$		16324.19 ± 0.11	<i>Jacobson et al., 2006</i>
$j_4 \times 10^6$		-939.32 ± 0.98	<i>Jacobson et al., 2006</i>
$j_6 \times 10^6$		91 ± 5	<i>Jacobson et al., 2006</i>
$j_8 \times 10^6$		-10	<i>Jacobson et al., 2006</i>
$\Lambda_2 = j_2/q$	0.1055	0.1076	

Cuadro 2.2: Características de Saturno a partir de las comparaciones entre las mediciones obtenidas por las naves *Viajero* y *Cassini*, destaca la diferencia en el periodo de rotación (P_s) obtenido. (Adaptada de Hubbard et al., 2009).

Campo gravitacional y forma

La distribución de la masa en el interior se relaciona con la forma achatada de la superficie y la respuesta a la rotación (Figura 2.2). Mediante técnicas de ocultamiento se han cuantificado los radios polar (b) y ecuatorial (a) en las nubes tope donde la presión es de 1 bar, una relación entre dichos radios permite determinar el achatamiento del planeta (~ 0.097). Los armónicos gravitacionales (J_{2n}), componentes de la ecuación del potencial gravitacional (ecuación 2.2) para un cuerpo con rotación uniforme y en equilibrio hidrostático, obtenidos a través de perturbaciones en la trayectoria de las naves y teóricamente mediante modelado computacional, nos proveen de información sobre la respuesta de Saturno a su propia rotación. A partir de estos parámetros se ha estudiado la distribución de masa en el interior, y definido que Saturno es un planeta *centralmente concentrado*.

$$\phi = -\frac{GM}{r} \left\{ 1 - \sum_{n=1}^n \left(\frac{a}{r}\right)^{2n} J_{2n} P_{2n}(\cos \theta) \right\} \quad (2.2)$$

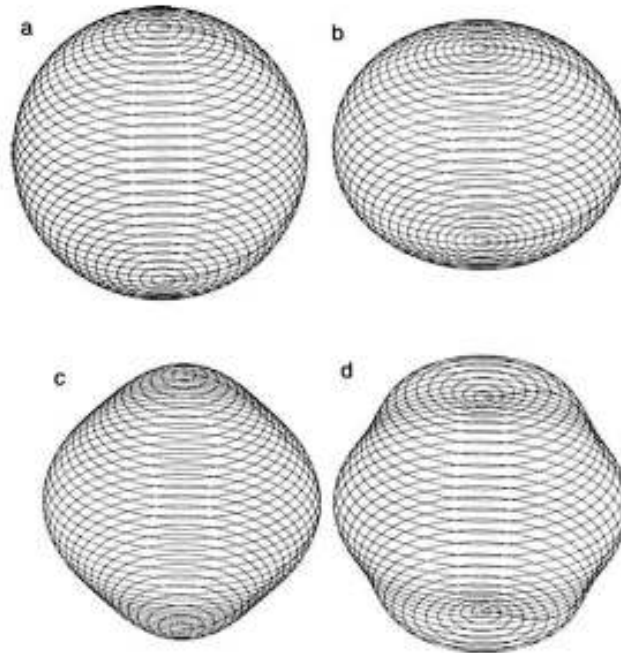


Figura 2.2: Ilustración de las formas que adquiere un planeta debido a su rotación. (a) Un planeta sin rotación adquiere forma esférica. Distorsión de la forma de Saturno debido a sus armónicos gravitacionales J_2 (b), J_4 (c) y J_6 (d) (Tomada de Marley y Fortney, 2007).

Campo magnético

Saturno posee un campo magnético muy complejo, el eje del campo se encuentra inclinado respecto al eje de rotación por 0.7° siendo casi axisimétrico. El único mecanismo conocido que podría producir campos magnéticos planetarios globales, el dínamo hidromagnético, requiere el movimiento de una región conductora interior. La región de hidrógeno metálico en Saturno es la responsable de generar semejante campo magnético. Por ello mismo, conocer la intensidad y distribución del campo magnético de Saturno es un elemento clave, ya que define el tamaño y la conductividad de la región de hidrógeno metálico en su interior.

Ecuaciones de estado y física de altas presiones

Los materiales en el interior de Saturno están expuestos a temperaturas y presiones extremas alcanzando $T \sim 10,000$ K y $P \sim 1,000$ GPa (~ 10 Mbar). Desde 1935, fecha en que Wigner propusiera la hipótesis sobre la existencia del hidrógeno metálico, los laboratorios especializados en física de altas presiones de todo el mundo, han realizado experimentos para determinar los rangos de presión (P) y temperatura (T) a la cuales el hidrógeno realizaría la transición de un estado molecular a uno metálico. Las temperaturas y presiones obtenidas

2.1. Estructura interna

en estos experimentos son las condiciones que se tienen en el laboratorio, más cercanas a las existentes en el interior de los planetas gaseosos. La caracterización de los materiales bajo estas condiciones ha sido uno de los grandes retos experimentales y teóricos de la física de altas presiones en los últimos 70 años. Además de las observaciones planetarias, un ingrediente clave en la construcción de los modelos del interior es el desarrollo de ecuaciones de estado (EOS por sus siglas en inglés) que dependen no solo de las observaciones experimentales y los desarrollos teóricos, sino también de la presión, la temperatura, la composición química y la densidad de los materiales que forman el interior. Los experimentos de ondas de choque y celda de yunque de diamante, han contribuido a comprender mejor el comportamiento de la materia bajo estas condiciones, en ellos se han sometido al hidrógeno, helio y otros materiales a altas presiones y temperaturas, de tal forma que conjuntamente con la teoría y las simulaciones por computadora, se elaboran ecuaciones de estado, recreando las diferentes regiones de la estructura interna en los planetas gaseosos.

En 1996, mediante experimentos de ondas de choque, Bill Nellis y sus colaboradores del Laboratorio Nacional Lawrence de Livermore reportaron haber descubierto que el hidrógeno transita de un estado molecular a uno metálico, a una presión y temperatura aproximadas de 1.4 Mbar y 3,000 K (Weir et al., 1996).

Origen y evolución

Se sabe que Saturno emite más energía que la recibida por el Sol, aproximadamente de 2 W/m^2 (Guillot, 2005). Esta fuente de energía interna es demasiado grande para ser explicada por decaimiento radioactivo de los materiales en el interior. La fuente del exceso de calor es energía potencial gravitacional que fue convertida en calor durante la formación de Saturno y almacenada como energía interna en su interior. Desde este periodo primigenio, Saturno se fue enfriando y contrayendo, liberando energía potencial gravitacional hasta su estado actual. La relación entre contracción y temperatura se conoce como mecanismo de *Kelvin-Helmholtz*. Los modelos evolutivos que incorporan el mecanismo de *Kelvin-Helmholtz* estiman que por su actual flujo de energía, Saturno debió haberse formado hace 2,000 millones de años. Debido a que no hay razones para pensar que Saturno se formó 2,500 millones de años después que el resto de los cuerpos en el sistema solar, se piensa que el proceso de diferenciación del helio provoca en Saturno una lluvia de helio en su interior, de tal forma que las gotas que caen hacia el centro generan energía potencial gravitacional que eventualmente es convertida en energía térmica liberada hacia la superficie, explicando con esto la edad estimada de Saturno en correspondencia con el flujo de energía térmica observado.

En la Figura 2.3 podemos observar un esquema de la sección transversal de Saturno, elaborado a partir de los reportes de William B. Hubbard, Michele K. Dougerty, Tristan Guillot y Jonathan J. Fortney, (Hubbard et al., 2009), (Guillot, 2005), (Fortney et al., 2010).

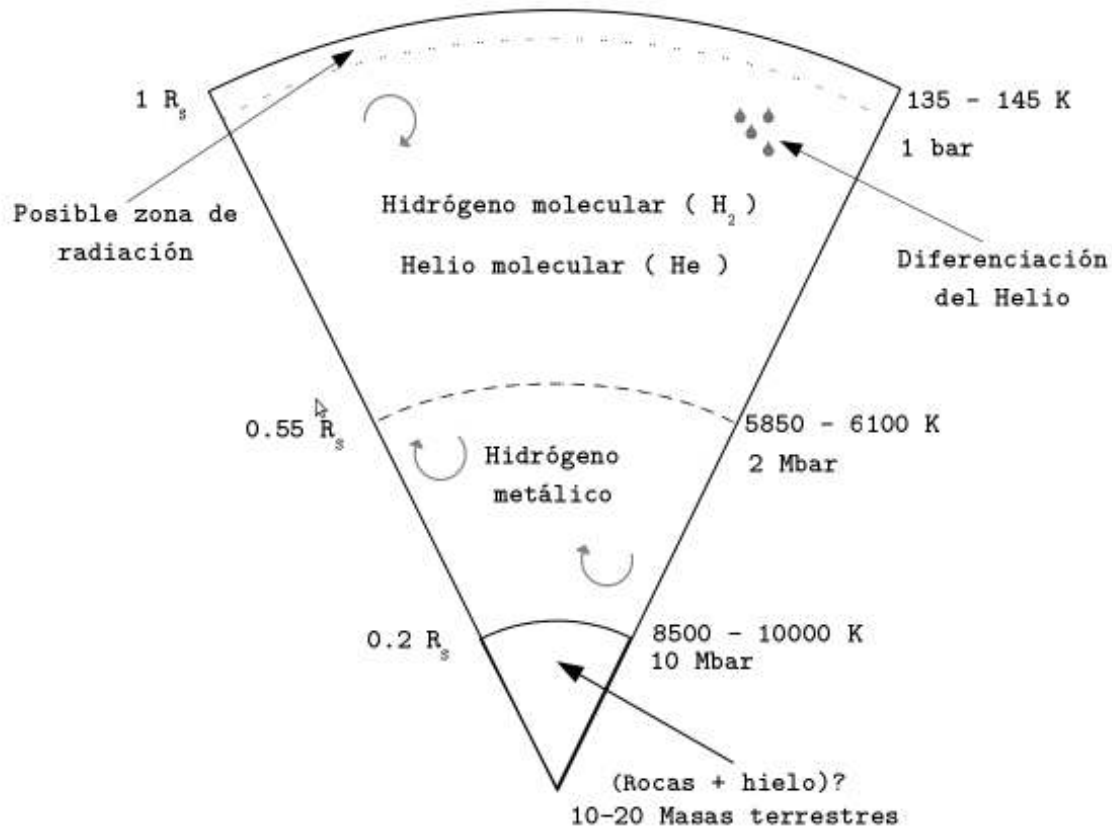


Figura 2.3: Representación esquemática de la estructura interna de Saturno. El rango de temperaturas es estimado utilizando un modelo homogéneo e incluyendo una posible zona radiativa. La masa del núcleo central está entre 10 y 20 masas terrestres. Las flechas indican movimientos convectivos del material. (Adaptada de Guillot, 2005; Fortney et al., 2010).

2.2. Atmósfera

La atmósfera de Saturno está dominada por fenómenos meteorológicos propios muy diferentes a los que se observan en un planeta como la Tierra. Las principales diferencias con la atmósfera terrestre son su gran tamaño, de 9.14 veces mayor que la Tierra; su periodo de rotación, de 10.56 horas; la ausencia de una superficie ("suelo") con la que la atmósfera se pueda frenar y su composición atmosférica. A grandes rasgos, Saturno es una inmensa esfera de hidrógeno y helio: gases muy ligeros comparados con aquellos que se condensan para formar nubes.

Encontrándose Saturno a una distancia del Sol de 9.5 UA, su atmósfera es mucho más fría que la de la Tierra. La temperatura a nivel de las nubes superiores, donde se observan la mayor parte de los fenómenos meteorológicos, es de ~ 123 K (150°C bajo cero). Esta temperatura sería aún más baja de no ser porque Saturno conserva una parte importante del calor acumulado durante su formación. Este calor almacenado en las capas profundas se libera lentamente en las altas regiones atmosféricas como radiación infrarroja, observándose que la energía emitida es $\sim 60\%$ mayor que la recibida por el Sol.

2.2.1. Composición química

La atmósfera en Saturno ha sido analizada a través de observatorios tanto en la Tierra, como en órbita alrededor del planeta por naves espaciales. Como resultado de esto, mucho se conoce de la composición de los gases que conforman la capa atmosférica.

Desde su llegada en 2004, la sonda espacial *Cassini* ha estado midiendo la composición de la atmósfera a través del espectrómetro infrarrojo CIRS*, con ello ha confirmado mediciones realizadas anteriormente por instrumentos en órbita, principalmente por la misión espacial *Viajero*, y encontrado nuevos compuestos químicos a diferentes altitudes atmosféricas. En el Cuadro 2.3 se pueden observar algunas especies que componen la atmósfera de Saturno y su correspondiente proporción en ella.

2.2.2. Distribución vertical

Considerando la extensión vertical de la atmósfera de Saturno, las nubes que se forman se limitan a una estrecha capa de unos pocos centenares de kilómetros respecto al espesor

*Espectrómetro Compuesto Infrarrojo, CIRS por sus siglas en inglés, mide la luz infrarroja procedente de un objeto (como la atmósfera o la superficie de un planeta) para conocer mejor su temperatura y composición, <http://cirs.gsfc.nasa.gov/>.

Componente	Proporción máxima	Nombre
Especies con proporción constante		
H ₂	0.90	Hidrógeno molecular
HD	4 × 10 ⁻⁵	Deuterio
He	0.10	Helio
CH ₄	2 × 10 ⁻³	Metano
CH ₃ D	2 × 10 ⁻⁷	
²⁰ Ne	2 × 10 ⁻⁵	Neón (isótopo)
Especies condensables		
NH ₃	2 × 10 ⁻⁴	Amoniaco
H ₂ S	2 × 10 ⁻⁷	Hidrosulfuro
H ₂ O	2-20 × 10 ⁻⁹	Agua
CH ₄	4.5 × 10 ⁻³	Metano
Especies en desequilibrio a nivel troposférico		
PH ₃	2 × 10 ⁻⁶	Fosfina
GeH ₄	4 × 10 ⁻¹⁰	Germano
AsH ₃	3 × 10 ⁻⁹	Arsina
CO	1-25 × 10 ⁻⁹	Monóxido de carbono

Cuadro 2.3: Abundancia de especies observadas en la atmósfera de Saturno de acuerdo a su proporción máxima (Adaptado de Atreya et al., 1999; West, 2007).

de las capas superiores. En las capas altas, donde la presión es aproximadamente de 100 mbar, se forman nieblas finas por la interacción de la luz solar con el metano (CH₄), dando lugar a hidrocarburos más complejos. Estas nieblas cubren homogéneamente la superficie del planeta, teniendo una mayor densidad en las regiones ecuatoriales. Las partículas que componen las nieblas son de $\sim 1 \mu\text{m}$ de diámetro.

En la región donde la presión está entre 1 (presión a nivel del mar en la Tierra) y 2 bares, se forman nubes de amoniaco (NH₃) de una densidad similar a los *cirrus* en la Tierra*

Por debajo de estas nubes, las temperaturas se van incrementando hasta que a los ~ 200 K y ~ 4 bares de presión, el amoniaco reacciona químicamente con otro gas, el hidrosulfuro (H₂S), para dar lugar a una nube mixta, de menor densidad, compuesta principalmente por hidrosulfuro de amonio (NH₄ SH).

Más profundamente, donde la presión atmosférica es ~ 6 bares, aparecen los primeros rastros de agua condensada. Las temperaturas son entre 230 K y 250 K, la densidad de la

*En la atmósfera terrestre, un *Cirrus* o cirro, es una formación nubosa compuesta por cristales de hielo, caracterizada generalmente por ser muy finas y con forma de rizo.

2.2. Atmósfera

nube de agua puede alcanzar máximos comparables a nubes densas en una tormenta intensa en la Tierra.

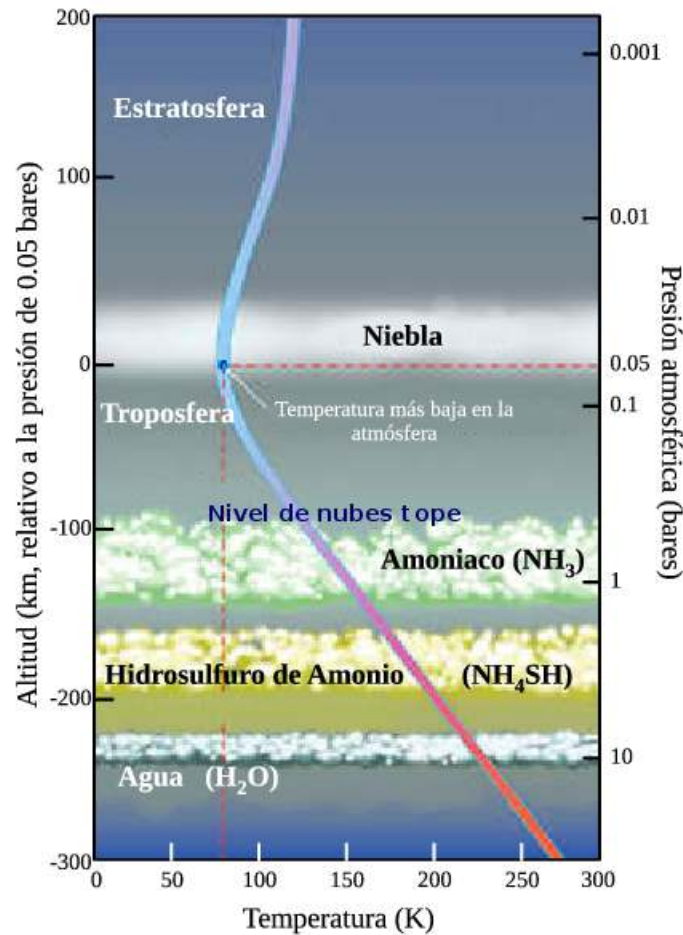


Figura 2.4: Este gráfico ilustra esquemáticamente la localización vertical y composición de nubes en la atmósfera de Saturno, con base en un modelo de equilibrio termoquímico (adaptada de Atreya y Wong, 2005).

La estructura vertical atmosférica presentada es considerada cuando la mezcla de gases está "bien mezclada", esto es, cuando se encuentren en equilibrio termodinámico y la dinámica atmosférica tenga un papel menor. La misión *Cassini* a través del instrumento VIMS*, registró actividad convectiva que llevó a la conclusión de que la dinámica atmosférica en Saturno se localiza a mayor profundidad de lo que se pensaba. Como consecuencia, estos gases "bien mezclados" podrían situarse en niveles de presión y temperatura mayores a los descritos anteriormente (Baines et al., 2009).

*Espectrómetro de mapeo visual e infrarrojo, VIMS por sus siglas en inglés, compuesto por dos cámaras. Este instrumento capta con una de ellas la luz visible y con la otra la luz infrarroja, <http://saturn.jpl.nasa.gov/spacecraft/overview/>.

2.2.3. Estructura latitudinal

Cuando observamos a Saturno a través de telescopios en la Tierra o de imágenes provistas por las naves espaciales, podemos notar un patrón de bandas alternadas de diferentes colores de acuerdo a la latitud del planeta. Si se observa por largos periodos es posible registrar que las bandas rotan alternadamente a diferentes velocidades, esto es, la banda que cubre el ecuador del planeta se mueve con una velocidad mayor que las situadas en los polos. Esta apariencia visual y el patrón de corrientes latitudinales sugieren una clasificación regional de las nieblas en tres regiones principales: una ecuatorial situada entre latitudes de $\pm 20^\circ$, una región media situada entre $\pm 20^\circ$ y $\pm 60^\circ$ y la región polar que va de $\pm 60^\circ$ a $\pm 70^\circ$ a los polos del planeta.

Los niveles de presión atmosférica y especialmente, las variaciones de la profundidad óptica a diferentes latitudes en las nieblas son los factores determinantes en la apariencia visual de Saturno (Figura 2.5). Se ha observado que la región de la niebla en el ecuador es más alta y densa que en otras latitudes. En las regiones polares, la niebla en la Troposfera disminuye a sólo un décimo de la abundancia en el ecuador.

2.2.4. Estructuras regionales atmosféricas

Ya se ha mencionado que Saturno emite más energía de su interior que la recibida del Sol, aun así, la energía calorífica disponible en su atmósfera es muy pequeña comparada con la energía solar disponible en la atmósfera de la Tierra. Con tan poca energía disponible, sería de esperar que los movimientos atmosféricos a escala global no fueran muy intensos. Sin embargo, las observaciones realizadas en las últimas tres décadas con las naves *Viajero*, *Cassini*, el telescopio espacial *Hubble*, así como con telescopios en Tierra, demuestran lo contrario.

Corriente de chorro ecuatorial

Siguiendo el movimiento de las pequeñas formaciones nubosas en el curso de unas horas, se observa que los vientos que las arrastran se dirigen en la atmósfera a lo largo de los paralelos, en una circulación denominada "zonal", sin apenas movimientos meridionales. Estos vientos alternan su dirección hacia el este y el oeste con la latitud, observándose en el ecuador (entre 10° Norte y 10° Sur) una ancha e intensa *corriente de chorro* ("jet") cuya velocidad es de aproximadamente 500 m/s, lo que equivale a $2/3$ de la velocidad del sonido.

Se ha registrado que la profundidad y velocidad de la *corriente de chorro ecuatorial* tiene

2.2. Atmósfera

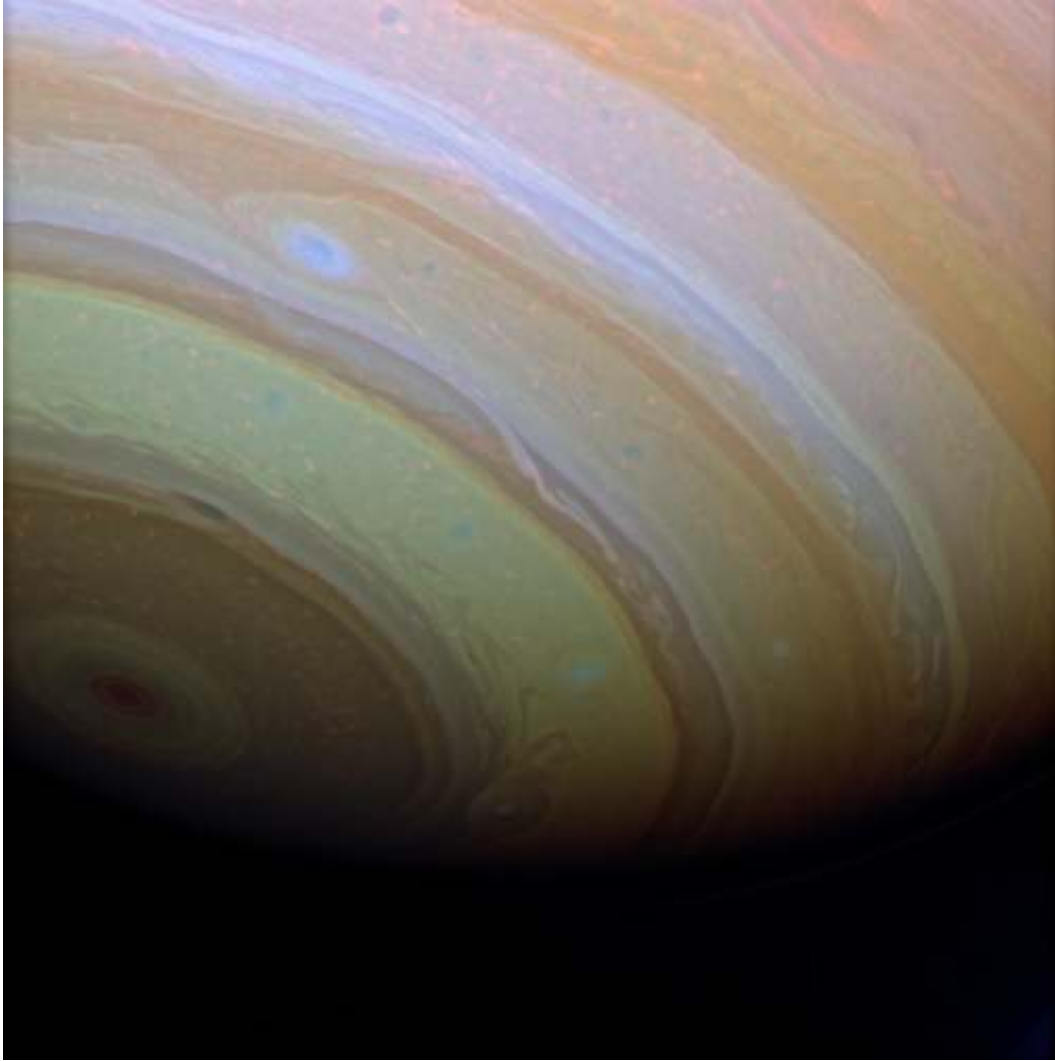


Figura 2.5: Esta imagen ilustra el grosor y abundancia de las regiones neblinosas latitudinales en la atmósfera superior del hemisferio sur de Saturno, fotografiada por el gran angular de *Cassini* utilizando una combinación de filtros espectrales sensibles a longitudes de onda de 752 nm (rojo), 890 nm (azul) y 728 nm (verde). La imagen fue capturada el 2 de febrero de 2007 a una distancia de un millón de kilómetros de Saturno (tomada de NASA/JPL/Space Science Institute).

variaciones temporales, de tal forma que en el periodo de 1980 a 1981, la capa nubosa se situaba a una presión atmosférica de 360 mbar y con velocidades aproximadas de 455 m/s. En el 2004, a través de imágenes tomadas por el telescopio *Hubble*, se registraron las capas nubosas en altitudes mayores, con niveles de presión de 50 mbar moviéndose con velocidades de 280 m/s.

Estos resultados fueron confirmados por las mediciones atmosféricas ecuatoriales (entre 8° Norte y 20° Sur) realizadas por *Cassini* en el 2004, donde a niveles de presión de 50 mbar se midió la velocidad de la capa nubosa en 263 m/s. La comparación de la información

mostrada previamente indica que la *corriente de chorro ecuatorial* ha presentado un cambio significativo en las últimas tres décadas, y como consecuencia probablemente de la gran dinámica atmosférica observada en Saturno entre 1990 y 1996.

La gran mancha blanca

En Septiembre de 1990, una gigantesca tormenta llamada *la gran mancha blanca* (GWS, por sus siglas en inglés) emergió en la zona ecuatorial de Saturno a una latitud de 5° Norte, perturbando la dinámica y estructura nubosa de esta región por más de un año. En 1994 otra estructura similar apareció en la zona ecuatorial con menor intensidad que la de 1990. Estos eventos modificaron las propiedades atmosféricas en la capa nubosa de la zona ecuatorial durante muchos años después, siendo una de ellas el aumento significativo en la profundidad óptica. Al parecer, estas tormentas convectivas ocurren periódicamente en la atmósfera de Saturno, se tiene registrado que las más grandes, conocidas como *manchas blancas*, emergen una cada año saturniano, es decir, cada 29.5 años terrestres.

Hace poco más de dos años, el 5 de diciembre de 2010, los telescopios terrestres detectaron los primeros signos de una tormenta emergiendo a 37.7° Norte en la atmósfera de Saturno. Simultáneamente, el instrumento RPWS* de *Cassini* detectó actividad eléctrica ligada a la tormenta. Lo que empezó como un pequeño punto, rápidamente creció en tamaño y brillo, expandiéndose de una longitud ~ 3000 km a una de 8000 km en una semana. La tormenta en su recorrido formó una cola, dejando a su paso la capa nubosa altamente perturbada, y rodeando la zona latitudinal en 55 días (Figura 2.6) (Sánchez-Lavega et al., 2011). Se observó el mismo comportamiento dinámico en *la gran mancha blanca* aparecida en la zona ecuatorial en 1990.

Nubes convectivas y relámpagos

La convección es el mecanismo principal por el cual la atmósfera tropical en la Tierra transporta energía desde la superficie calentada por la radiación solar hasta la atmósfera superior, donde el calor es irradiado al espacio. Lo mismo ocurre con la atmósfera de Saturno, con la excepción de que la energía transportada se origina en el interior del planeta.

Las nubes convectivas son las características visibles más sobresalientes de Saturno, se

*Instrumento científico de ondas de radio y plasma, RPWS por sus siglas en inglés. Sensor directo y remoto que recibe y mide señales de radio provenientes de Saturno, incluyendo las ondas de radio producidas por la interacción del viento solar con la magnetosfera de Saturno. El instrumento es capaz de medir campos magnéticos y eléctricos en el medio interplanetario y la magnetosfera planetaria, <http://saturn.jpl.nasa.gov/spacecraft/cassiniorbiterinstruments/nstrumentscassinirpws/>.



Figura 2.6: Imagen del 25 de Febrero del 2011, aproximadamente 12 semanas después de comenzada la tormenta. Se puede observar el rastro turbulento en la capa nubosa latitudinal como consecuencia de la evolución de la tormenta (tomada de NASA/JPL/Space Science Institute).

identifican por su alto brillo (indicando altas densidades ópticas) y gran contraste respecto a las nubes vecinas y las nieblas, pero sobretodo, por su rápida evolución temporal.

Hay dos tipos de características convectivas en Saturno, las más frecuentes son estructuras que parecen nubes esponjosas, que principalmente se sitúan en las bandas cercanas al ecuador, siendo comunes también en las regiones polares. Las otras estructuras son menos frecuentes pero de mayor intensidad, un ejemplo de éstas es *la gran mancha blanca*. En la Figura 2.7 se puede observar un esquema de la convección entre las nubes visibles y la capa

de nubes de condensación del agua. De todos los compuestos que se pueden condensar y formar nubes, el más importante es el agua, no solo por ser el más abundante, si no por ser el que libera la mayor cantidad de energía, la cual al condensarse calienta los compuestos que la rodean generando un fuerte impulso vertical.

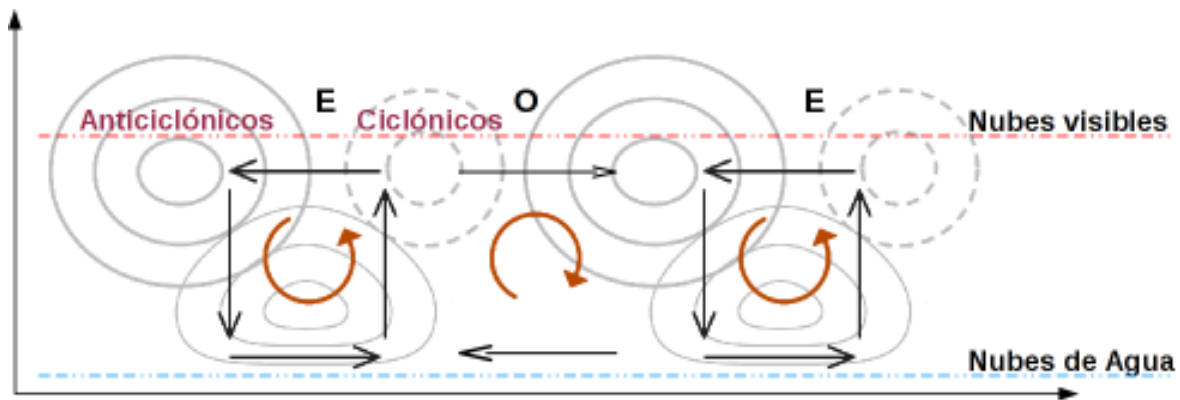


Figura 2.7: Esquema de la sección transversal atmosférica mostrando el proceso de convección entre las capas de nubes visibles y las capas de nubes de agua, se observa que la convección es parte de la formación del patrón de bandas y la dirección latitudinal de los vientos al Este (E) y al Oeste (O).

Desde la misión *Viajero* se habían detectado emisiones de radio procedentes de las tormentas en Saturno, semejante actividad eléctrica se asociaba directamente con la convección en las capas nubosas de agua. Aún cuando las naves espaciales cuentan con instrumentos de medición altamente sofisticados, las emisiones de radio, mejor conocidas como "descargas electrostáticas de Saturno" (SEDS) no ha sido sencilla su medición, esto en parte, a que se localizan entre los niveles de presión de 10 y 20 bares. Desde la llegada de *Cassini* a Saturno en 2004 ha sido difícil ver relámpagos debido a que el planeta es muy brillante. La luz solar reflejada en los anillos hace que incluso el lado nocturno de Saturno sea más brillante que una Luna llena en la Tierra.

Tras esperar años a que Saturno presentase las condiciones adecuadas para poder registrar dicho fenómeno, el 30 de Noviembre del 2009, en la zona conocida como el *corredor de tormentas*, los instrumentos de *Cassini* lograron confirmar la actividad eléctrica. Los destellos duraron menos de un segundo y las imágenes muestran una nube de 3,000 kilómetros de largo, siendo las regiones iluminadas por los destellos de los rayos, regiones de aproximadamente 300 kilómetros de diámetro.

2.2. Atmósfera

Tormentas ciclónicas y anticiclónicas

La atmósfera de Saturno es el hogar de cientos de tormentas, estructuras circulares que, como en la atmósfera terrestre, se dividen en dos clases: ciclones y anticiclones. Los primeros giran en dirección de la rotación del planeta en sentido antihorario en el hemisferio norte y horario en el hemisferio sur, mientras que, los segundos giran en dirección contraria. Sin embargo, una diferencia importante con la atmósfera de la Tierra es que, en la atmósfera de Saturno, más del 90 % de las tormentas de más de 2,000 km de diámetro son anticiclones. Se ha observado que la mayor concentración de tormentas se da en latitudes $\sim 47^\circ$ (Del Genio et al., 2009).

En la Figura 2.7 podemos observar que dentro de los movimientos convectivos en las capas nubosas de la atmósfera de Saturno, se forman estructuras ciclónicas y anticiclónicas de acuerdo con la estructura de bandas, siendo *la gran mancha blanca*, un ejemplo de una tormenta anticiclónica.

Tormentas en los polos

Las proyecciones del polo norte realizadas por la misión *Viajero*, revelaron una estructura nubosa hexagonal rodeando el polo a una latitud planetocéntrica de 76° Norte. Dentro de la estructura hexagonal se encontró una tormenta anticiclónica oval (NPS), centrada en la parte sur de uno de los lados del hexágono. Al medir la velocidad de las capas nubosas, se encontró que el patrón hexagonal contenía una corriente de chorro con dirección hacia el Este, de ~ 100 m/s. Sin embargo, la estructura hexagonal permanecía estacionaria en el polo. Una década después del descubrimiento del *hexágono del polo norte* por *Viajero*, el telescopio espacial *Hubble* y los telescopios en la Tierra, observaron este patrón hexagonal.

Entre 1996 y 2009, la latitud en la que se encuentra el patrón hexagonal en el polo norte fue inobservable, sin embargo, pudo ser detectada térmicamente por los instrumentos VIMS y CIRS de *Cassini*, encontrando que el *hexágono del polo norte* es una típica corriente de chorro (“jet”), excepto por su forma hexagonal. La estructura se localiza cerca de los 78° norte, y está compuesta de algunas bandas nubosas hexagonales, anidadas y alternantes, cuyos lados miden aproximadamente 13,800 km de largo. Cerca del polo, existen bandas concéntricas y alternantes, formadas por nubes densas y cuya densidad óptica es mayor que las que forman el patrón hexagonal, extendiéndose hasta una latitud $\sim 87^\circ$ Norte. Cerca del polo, se localiza una nube estacionaria rodeada por un estrecho anillo nuboso de forma circular (Figura 2.8). La estructura completa se encuentra rotando con un periodo de 10 horas 39 minutos y 24 segundos, el mismo periodo de las emisiones de radio kilométricas de Saturno (SKR), el cual

se presume es igual al periodo de rotación del interior.

En el otro lado del planeta, en el polo sur de Saturno, mediante observaciones realizadas por telescopios en la Tierra, se había descubierto una gran estructura oscura en forma de disco, centrada en el polo y desplegada hasta una latitud planetocéntrica de 88° Sur (Figura 2.8). Con el arribo de *Cassini*, se confirmó lo observado previamente, encontrándose una gigantesca tormenta centrada en el polo Sur. Dichas observaciones revelaron una estructura similar a los huracanes terrestres, con un *ojo* central oscuro y rodeado por un anillo (*paredes del ojo*) formado por nubes altas y densas situadas en latitudes $\sim 89^\circ$ Sur y dos brazos de nubes extendiéndose desde el anillo central. La altura de las paredes del ojo se estima entre 40 y 70 km.

El uso de términos tales como *ojo* y *paredes del ojo* para la estructura de nubes en el polo sur de Saturno, evoca a los huracanes en la Tierra, los cuales se forman con flujos de aire húmedo entrante a través de la superficie del océano, levantándose verticalmente y liberando una pesada lluvia alrededor del círculo interior de aire descendente, el cual es el ojo de la tormenta. Aunque se desconoce si tales características mueven la tormenta en Saturno, el *ojo* oscuro, las nubes en la *pared del ojo* y los brazos espirales juntos, parecen formar un sistema similar al de un huracán, aunque la tormenta saturniana difiere de éste en dos puntos importantes: se encuentra fija en el polo, y no existe un océano donde se gesta la interacción atmosférica necesaria para la convección de nubes.

2.2.5. Estructura de bandas y perfil de velocidades de la capa nubosa

Hasta la llegada de las naves espaciales *Viajero 1* y *2* en 1980 y 1981 a Saturno, los datos acerca de las nubes y de sus movimientos eran realmente escasos. Usando las imágenes de alta resolución de estas naves, se pudo medir con detalle el movimiento de más de 2,000 trazadores nubosos, entre las latitudes 81° Norte y 71° Sur (Sánchez-Lavega et al., 2000), encontrándose un patrón simétrico latitudinal de bandas nubosas, desde el ecuador hasta los polos del planeta. En la Figura 2.9 se muestra el patrón de bandas latitudinales conocido, el cual está formado por bandas claras y oscuras alternantes conocidas como zonas y cinturones respectivamente.

Este patrón muestra adicionalmente *la corriente de chorro ecuatorial* mencionada anteriormente, donde la capa nubosa alcanza velocidades mayores a los 450 m/s con dirección hacia el este, extendiéndose desde el ecuador hasta latitudes cercanas a los 30° norte y sur. En latitudes mayores (entre 30° y 80°), se encontraron entre 4 y 5 corrientes hacia el este con velocidades desde 60 m/s hasta 160 m/s. Es notorio que el perfil de velocidades de las

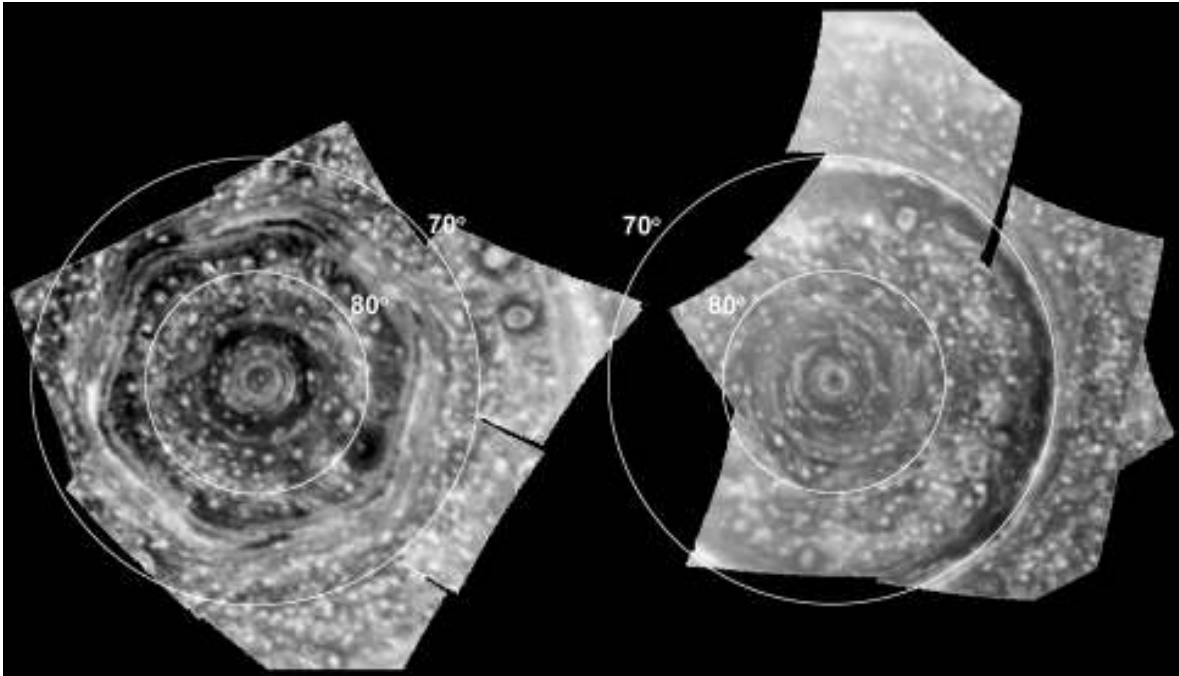


Figura 2.8: Proyecciones ortográficas del polo norte (izquierda) y sur (derecha), registradas entre el 15 y el 16 de Junio del 2008 por el instrumento VIMS de *Cassini*. El polo norte se encuentra rodeado por una estructura hexagonal que se extiende 12,000 km desde el polo, y cuyas nubes alcanzan velocidades cercanas a los 500 km/h. El polo sur, fotografiado algunas horas después que el polo norte, muestra una tormenta ciclónica compuesta por un ojo central, rodeado de un anillo de nubes extendiéndose 15,000 km desde el polo (tomada de NASA/JPL/Space Science Institute).

capas nubosas muestra la casi total ausencia de vientos hacia el oeste, lo que nos indica que los movimientos al este dominan la dinámica de la atmósfera en Saturno.

Los perfiles de velocidades más recientes, realizadas a partir de imágenes obtenidas con el telescopio espacial *Hubble* y con los instrumentos VIMS e ISS* de *Cassini*, muestran algunos cambios de las mediciones realizadas anteriormente por la nave *Viajero*. El más notorio de ellos es la disminución en la velocidad de *la corriente de chorro ecuatorial* en más de 100 m/s entre las latitudes $\pm 20^\circ$. Otra diferencia interesante es la simetría en el perfil de velocidades encontradas en regiones cercanas a los polos sur y norte, correspondiendo con las velocidades de dos grandes estructuras, el *hexágono del polo norte* y la *tormenta del polo sur* mencionados con anterioridad.

*Subsistema científico de imágenes, ISS por sus siglas en inglés. Instrumento capaz de capturar imágenes en el espectro de luz visible, en el ultravioleta y en el infrarrojo mediante el uso de filtros. El ISS ha tomado cientos de miles de imágenes de Saturno, de sus satélites y de sus anillos, enviándolas a la Tierra por medio de ondas de radio <http://www.ciclops.org/iss/iss.php?js=1>.

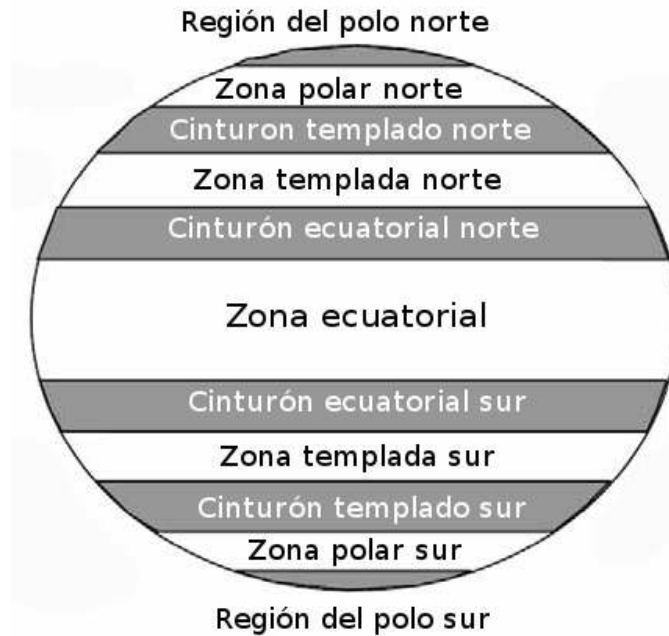


Figura 2.9: Dibujo de la estructura de bandas latitudinales en Saturno, dividida en zonas y cinturones (adaptada de Irwin Patrick G. J., 2009).

2.2.6. Modelos de dinámica atmosférica

Reproducir la estructura de vientos alternantes con la latitud mostrada en la Figura 2.10, ha sido de suma importancia para la reconstrucción teórica de la dinámica atmosférica en Saturno. Para ello, se han construido modelos que parten de las mismas características generales ya conocidas, radio, masa, velocidad de rotación, entre otras, y suponiendo diferentes fuentes de energía que determinan el control de los movimientos en la atmósfera. Existen básicamente dos grupos de modelos: los modelos de tipo superficial, que basan la generación de los vientos en la energía recibida por el Sol, y los modelos de tipo profundo, donde el calor interno del planeta es el responsable de la dinámica atmosférica.

Modelos de capas superficiales

Este tipo de modelos se basa en el principio de que la energía solar absorbida por las nubes superiores, principalmente en la Troposfera, es la que controla los vientos de la capa nubosa en la estructura de zonas y cinturones latitudinales, sin considerar participación alguna de la energía generada en el interior del planeta. En general, según estos modelos, las corrientes en las bandas se generan sobre una capa muy delgada, del orden de un centenar de kilómetros, de forma que la dinámica atmosférica será la misma que rige la atmósfera terrestre, ya que

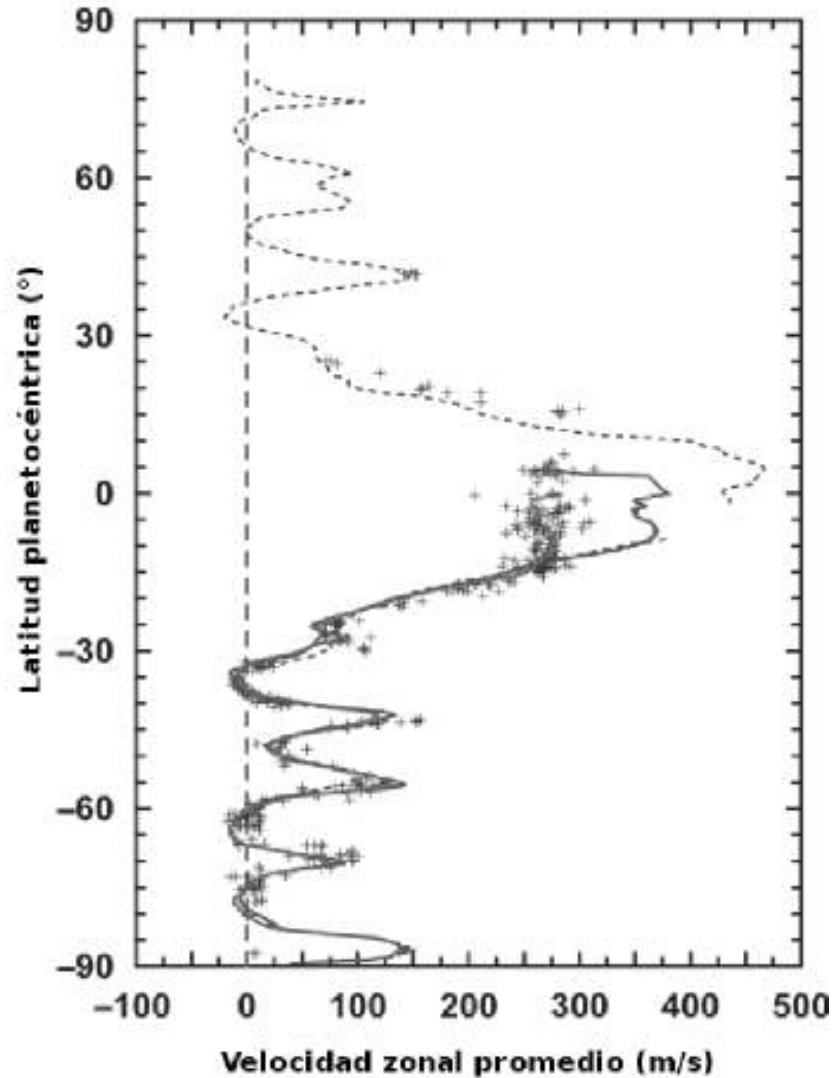


Figura 2.10: Comparación de los perfiles de velocidades de las capas nubosas en Saturno obtenidos por *Viajero* (línea punteada), *Hubble* (cruces) y *Cassini* (línea sólida) (adaptada de Del Genio et al., 2009).

estos modelos fueron una adaptación de los utilizados en la reproducción de la atmósfera de la Tierra.

Para ello, se utilizan las mismas ecuaciones de movimiento, parametrizadas a las condiciones de un planeta gaseoso, de rotación rápida, donde la capa atmosférica tiene un espesor mucho menor que el radio del planeta. En este tipo de modelos, la diferencia de temperaturas entre la zona ecuatorial y la polar generan movimientos turbulentos de pequeña escala (remolinos), que terminan agrupándose hasta formar estructuras rotantes gigantescas (tormentas), siendo estas últimas las responsables de transmitir el movimiento a las corrientes en zonas y cinturones. Un gran problema en estos modelos es que *la corriente de chorro ecuatorial*

fluye hacia el oeste (en dirección contraria a lo observado), prediciendo en general movimientos ecuatoriales al oeste, por lo que es necesario introducir hipótesis *ad hoc* para revertir el sentido del movimiento.

Los modelos de capas superficiales favorecen la aparición de movimientos anticiclónicos y la disminución de los ciclónicos, como se ha observado en los planetas gaseosos, sin embargo, las observaciones indican que el movimiento atmosférico es más profundo de lo estimado por este tipo de modelos. En la figura 2.11 se muestra una modelo numérico basado en los modelos de capas superficiales.

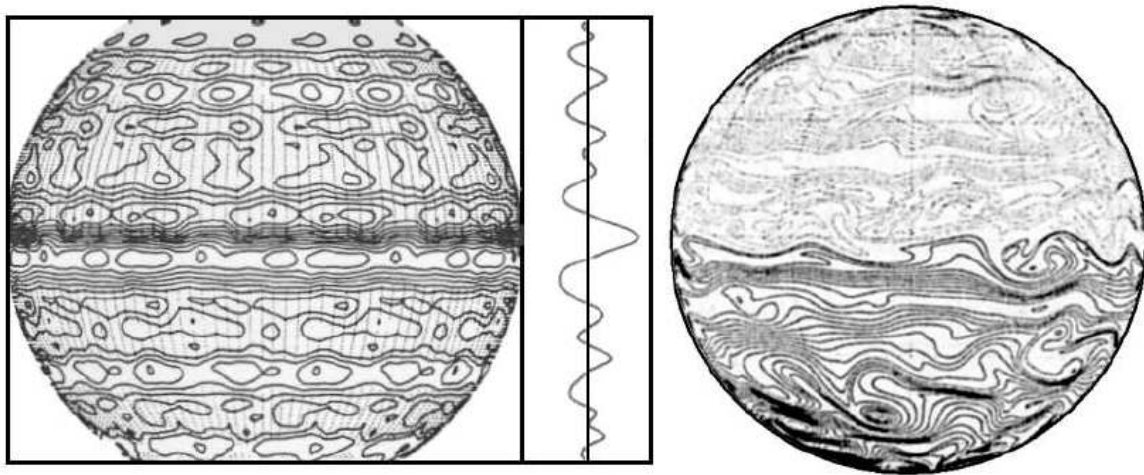


Figura 2.11: Modelo numérico de circulación general atmosférica, basado en las ecuaciones que rigen la circulación de la atmósfera terrestre (Modelo de capa superficial). Las líneas equivalen en su trazado al flujo (izquierda) y vorticidad (derecha) que describirían las nubes superiores en la atmósfera planetaria. Adicionalmente en la imagen de la izquierda se representa el perfil meridional de los vientos zonales, (adaptada de Sánchez-Lavega et al., 2004).

Modelos de cilindros profundos y concéntricos

Los modelos de circulación profunda suponen que es la energía interna la que rige la dinámica en la atmósfera, y se fundamentan en el hecho de que el transporte de energía mediante convección en un fluido no viscoso, es organizado por la intensa rotación en un movimiento de columnas paralelas al eje de rotación del planeta de acuerdo con el teorema postulado por Taylor-Proudman. Estas columnas generan un movimiento secundario de cilindros rotantes, concéntricos y alternantes en su sentido de rotación. Cuando los cilindros llegan a la capa superior de nubes forman las corrientes zonales alternantes hacia el este y oeste.

2.2. Atmósfera

Los cilindros se generan sobre la capa de hidrógeno molecular, ya que la región de hidrógeno metálico resulta impenetrable. La generación de este tipo de movimientos ha sido observada en diferentes experimentos de laboratorio, incluyendo una en el espacio durante la misión *Skylab*^{*}, y ha sido corroborada a través de cálculos analíticos y numéricos realizados con potentes computadoras (Figura 2.12).

Este tipo de modelos predicen elegantemente la estructura simétrica con la latitud de zonas y cinturones, además de predecir la ruptura de la estructura zonal en altas latitudes donde es remplazada por movimientos turbulentos. Según los modelos, esto ocurre cerca de la frontera donde los cilindros son tangentes a la transición entre las fases molecular y metálica del hidrógeno en el interior, para Saturno esta latitud es aproximadamente de 65° , sin embargo, las observaciones recientes muestran que existen fenómenos atmosféricos superficiales sin relación aparente con el interior planetario, donde la cantidad de vórtices observados es menor que los predichos por los modelos.

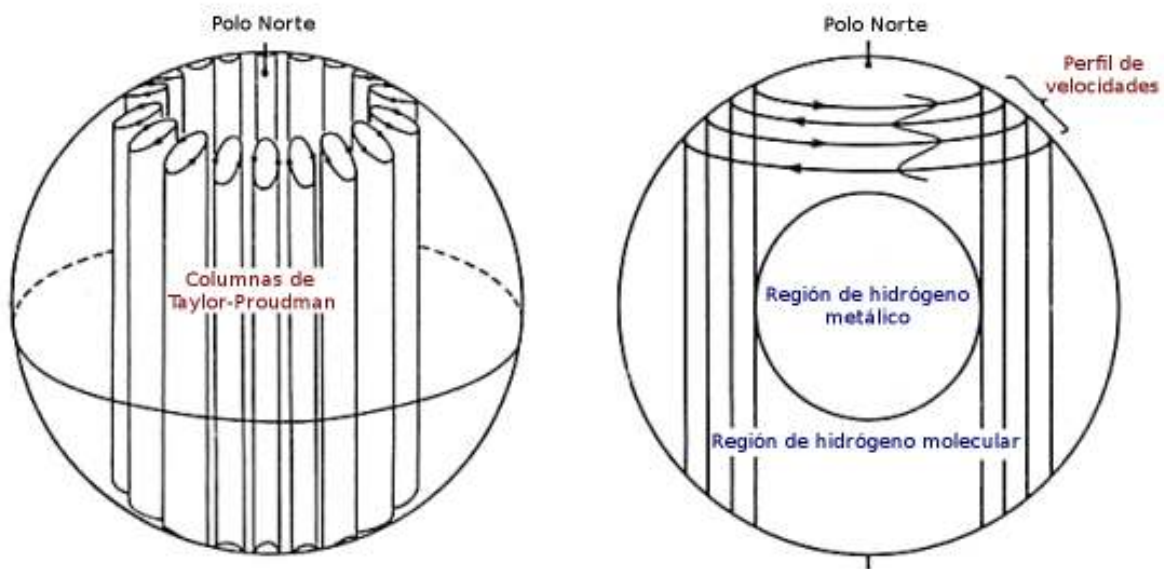


Figura 2.12: Esquema de modelos de circulación profunda, mostrando las columnas de Taylor-Proudman (izquierda) y los cilindros concéntricos generados (derecha). También se pueden observar las regiones de hidrógeno metálico y molecular donde se desarrollan los cilindros, y una representación del perfil de velocidades en las capas zonales latitudinales (adaptada de Sánchez-Lavega et al., 2004).

Debido a que ambos tipos de modelos realizan predicciones de ciertas estructuras atmosféricas, pero al mismo tiempo fallan en la descripción de otras, o muestran el comporta-

^{*}Fue la primera estación espacial de experimentación, lanzada y operada por la NASA, orbitando la Tierra desde 1973 hasta 1979, incluía entre otros instrumentos un laboratorio y un observatorio solar <http://www.nasa.gov/missionpages/skylab/>.

miento contrario entre sí, se ha trabajado para recrear modelos mixtos que contengan lo mejor de ambos tipos. En el artículo de Del Genio et al. (2009), se muestran diversos modelos mixtos donde, por ejemplo, para un modelo profundo se considera una transición suave entre la región de hidrógeno molecular y la de hidrógeno metálico, modificando la profundidad de las columnas de Taylor-Proudman.

En la Figura 2.13 se puede observar un resumen de las características principales de la atmósfera de Saturno, también se muestra la ubicación de las estructuras tormentosas de acuerdo a la zona latitudinal correspondiente, así como, una comparación en el perfil de velocidades obtenida por las misiones *Viajero* y *Cassini*, y por el telescopio espacial *Hubble*.

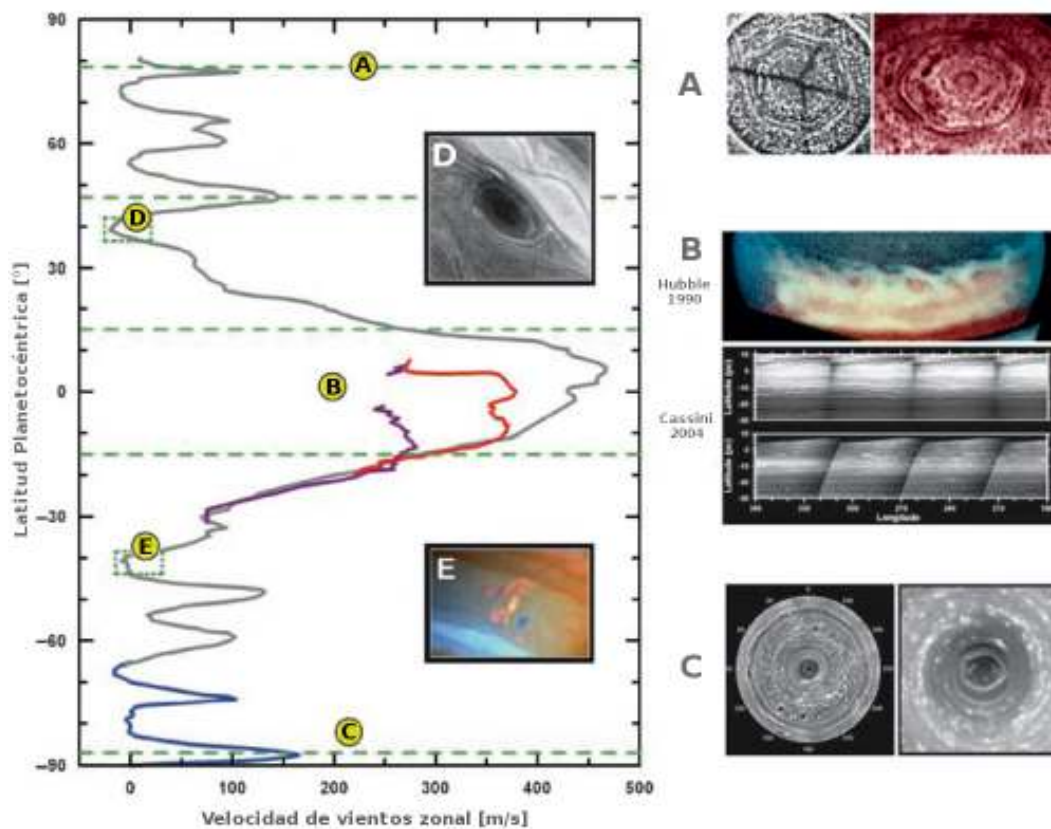


Figura 2.13: Circulación general de Saturno y características relevantes en su atmósfera. El perfil de velocidades trazado por *Viajero* (línea verde), datos del hemisferio sur (azul) y región ecuatorial con diferentes filtros (violeta y rojo) obtenidas por *Cassini*. Las estructuras meteorológicas relevantes aparecen como: (A) Hexágono del Polo Norte en el espectro visible (*Viajero*) e infrarrojo (*Cassini*); (B) la gran mancha blanca aparecida en 1990 en la región ecuatorial (*Hubble*) y el estado de la misma región ecuatorial vista por *Cassini* en 2004 en la banda de absorción del metano y filtros continuos; (C) la tormenta del polo sur con un acercamiento a su ojo (derecha); (D) tormentas anticiclónicas (*Viajero* 1); (E) tormentas convectivas vistas por *Cassini*. La ubicación de las regiones de mayor convección aparecen marcadas por recuadros verdes de línea punteada (adaptada de Guillot et al., 2009).

2.3. Campo magnético y magnetosfera

2.3.1. Campo magnético

Como se vió en la sección 2.1, la estructura interna de Saturno se forma de un núcleo rocoso cubierto por una región de hidrógeno, en la cual el material rota y presenta movimientos convectivos, liberando energía del interior hacia la superficie del planeta. Esta energía genera movimiento en la región de hidrógeno en su fase metálica, produciendo una zona de conducción eléctrica que finalmente origina un campo magnético. El campo magnético de Saturno está sustentado en el mecanismo de dínamo hidromagnético, propuesto originalmente por Joseph Larmor para explicar el campo magnético del Sol y sus manchas (Larmor, 1919). La teoría del dínamo describe el proceso a través del cual un fluido eléctricamente conductor con movimientos de rotación y convección, genera y sostiene un campo magnético intrínseco.

Previo al desarrollo de las misiones espaciales, se pensaba que Saturno podría tener un campo magnético, sin embargo, se desconocían las características del mismo ya que no se contaba con evidencia observacional. Con la aproximación de *Pionero 11* en septiembre de 1979 a $1.4 R_S^*$ de Saturno, se pudo confirmar la existencia del campo magnético y recabar información suficiente para caracterizarlo. Esta misión espacial estaba equipada con dos instrumentos para medir campos magnéticos: un Magnetómetro Vectorial de Helio y un Magnetómetro de Flujo de Campo HVM[†] y GSFC[‡] (por sus siglas en inglés respectivamente).

Las observaciones de Saturno realizadas por *Pionero 11* mostraron que el campo magnético podía aproximarse por un dipolo, con momento dipolar de $0.20 \text{ G } R_S^3$, y donde los polos magnéticos coincidían con los polos geográficos. Una característica sobresaliente del campo magnético revelada por estos instrumentos fue que el eje magnético se encontraba alineado con el eje de rotación de Saturno, siendo una gran sorpresa ya que se conocía que los campos magnéticos del Sol, la Tierra y otros planetas se encontraban inclinados respecto a sus ejes de rotación. Por otra parte, este resultado contradecía el teorema fundamental antidínamo propuesto por T. G. Cowling, mediante el cual demostraba que un campo magnético semejante, conocido como axisimétrico, no podía sustentarse mediante el mecanismo de dínamo (Cowling, 1933).

*Radio de Saturno, $1 R_S = 60268 \text{ km}$

†Este magnetómetro midió la estructura fina del campo magnético interplanetario y mapeó el campo magnético de Saturno registrando la interacción con el viento solar, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov>.

‡Este instrumento fue diseñado con sensores electrónicos capaces de medir campos magnéticos en el rango de 0.01 a 10 Gauss a lo largo de los ejes del campo, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/experimentSearch.do?spacecraft=Pioneer11>.

Posteriormente, las aproximaciones a Saturno por parte de las misiones *Viajero 1* (1980) y *Viajero 2* (1981) a $3.1 R_S$ y $2.7 R_S$ respectivamente, confirmaron las observaciones del campo magnético realizadas por el *Pionero 11*. Los estudios realizados por estas naves mostraron que el campo magnético de Saturno estaba bien representado por un dipolo con momento dipolar de $0.21 \text{ G } R_S^3$, y donde el eje del dipolo magnético se encontraba inclinado $\sim 0.8^\circ$ respecto a su eje de rotación, incorporando además la presencia constante de una *corriente de anillo* cuya intensidad calculada fue $\sim 10^7 \text{ A}$. La figura 2.14 muestra las trayectorias de las naves *Pionero 11*, *Viajero 1* y *Viajero 2* a su paso por Saturno, donde se indica la posición aproximada de sus satélites y la de la corriente de anillo.

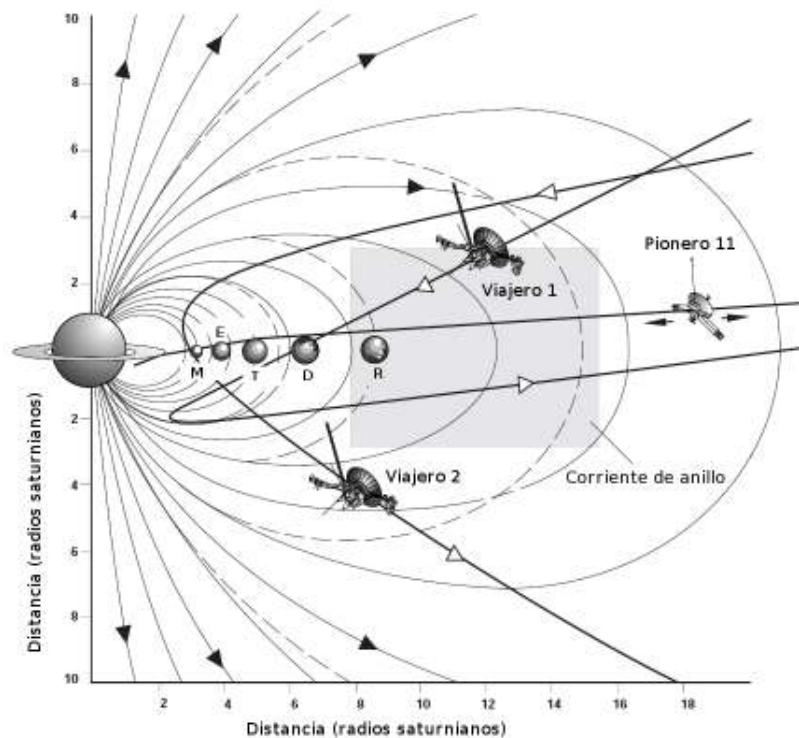


Figura 2.14: Trayectorias de *Pionero 11*, *Viajero 1* y *Viajero 2* en su aproximación a Saturno. Además de la trayectoria de las naves, se muestra la posición aproximada de los satélites Mimas(M), Encelado(E), Tetis(T), Dione(D), Rea(R) y la corriente de anillo. Las líneas del campo magnético de Saturno se muestran empleando un modelo de campo magnético dipolar (línea sólida) y un modelo dipolar más contribuciones al campo magnético por la corriente de anillo (línea punteada), y mostrando además, que las líneas del campo magnético se estiran debido a la corriente de anillo (región sombreada) (adaptada de Connerney et al., 1984).

En 2004, la misión *Cassini* no sólo se acercó al planeta si no que empezó a orbitarlo, (Figura 2.15), lo que ha permitido mapear el campo magnético de Saturno con mayor detalle. Además, *Cassini* cuenta con instrumentos mejor equipados para las mediciones de campo

2.3. Campo magnético y magnetosfera

magnético: el Magnetómetro de Técnica Dual, (MAG^{*}) y el Instrumento de Imágenes Magnetosféricas, (MIMI[†]).

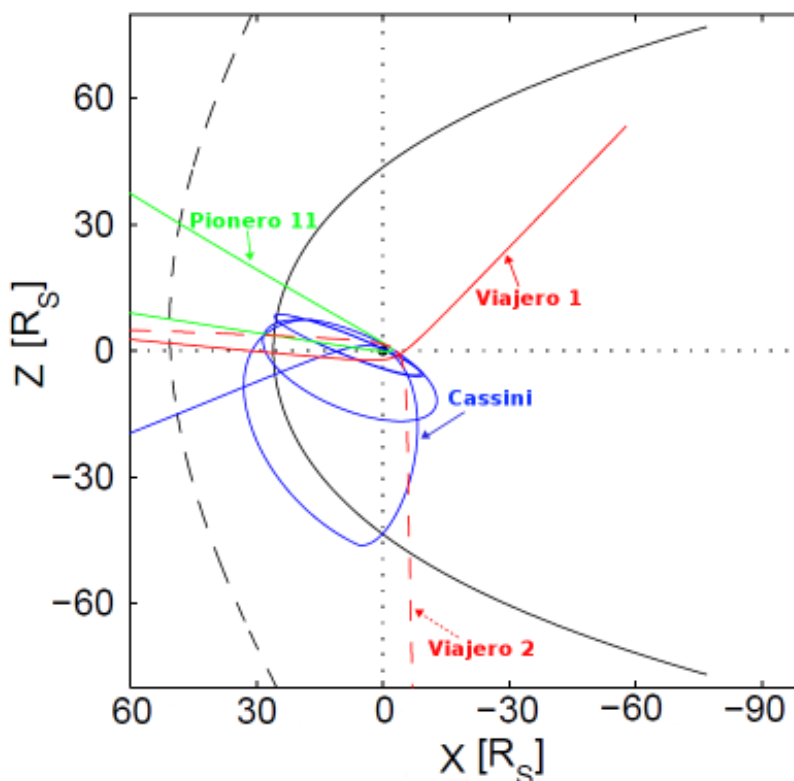


Figura 2.15: Trayectorias de *Pionero 11*, *Viajero 1*, *Viajero 2* y las cuatro primeras órbitas de *Cassini* en su aproximación a Saturno.

Las observaciones realizadas por *Cassini* han confirmado las características del campo magnético medidas por las naves *Pionero 11*, *Viajero 1* y *Viajero 2*; mostrando que el campo magnético puede ser representado principalmente por un dipolo con momento dipolar de 0.22 G R_S^3 , y con contribuciones cuadrupolares y octupolares de aproximadamente el 10%. También se confirmó que el eje magnético tiene una inclinación menor al 1° respecto al eje de rotación planetario. Un análisis de seis años de datos obtenidos con los magnetómetros de *Cassini* indican que el campo magnético de Saturno es altamente axisimétrico y tiene una

^{*}Instrumento que mide directamente la intensidad y dirección del campo magnético alrededor de Saturno. La información obtenida por MAG está siendo utilizada para realizar un modelo tridimensional de la magnetosfera de Saturno y determinar el estado magnético de Titán, los anillos y los satélites de hielo. <http://saturn.jpl.nasa.gov/spacecraft/cassiniorbiterinstruments/instrumentsscassinimag/>.

[†]Este instrumento es un sensor remoto y directo que produce imágenes y otros datos sobre las partículas atrapadas en el campo magnético y la magnetosfera de Saturno. <http://saturn.jpl.nasa.gov/spacecraft/cassiniorbiterinstruments/instrumentsscassinimimi/>.

inclinación de $\sim 0.06^\circ$ respecto a su eje de rotación (Cao et al., 2011).

2.3.2. Magnetosfera

La palabra magnetosfera fue acuñada por T. Gold en 1959 para describir la región por encima de la ionosfera en la cual el campo magnético de la Tierra controla el movimiento de partículas cargadas. Cualitativamente, una magnetosfera planetaria es aquella región del espacio en la cual el viento solar es excluido por el campo magnético del planeta.

En el caso terrestre, el campo geomagnético atrapa plasma formando los cinturones de Van Allen, que son regiones con forma toroidal donde los electrones y iones altamente energéticos son desviados alrededor del planeta. El control de partículas cargadas por el campo geomagnético se extiende muchos radios terrestres (R_T) hacia el espacio, terminando a $\sim 10 R_T$ en dirección al Sol. A esa distancia, la magnetosfera es delimitada por la interacción entre el plasma de origen terrestre y el plasma solar (formado principalmente por protones, iones de helio y en menor cantidad electrones), que fluye radialmente desde el Sol a velocidades supersónicas. Similarmente al caso terrestre, Saturno posee una gran dinámica magnetosférica aunque con algunas diferencias respecto al caso de la Tierra. La mayoría del plasma en la magnetosfera de Saturno es de origen interno y la presión del viento solar que llega a Saturno es dos órdenes de magnitud más débil que aquella que se mide a 1 UA (órbita de la Tierra).

Fuentes de Plasma

Uno de los problemas fundamentales de la física magnetosférica es determinar las fuentes de plasma que pueblan una magnetosfera. En la Tierra se ha mostrado que las principales fuentes de plasma en su magnetosfera son el viento solar y la atmósfera superior terrestre.

En Saturno, por el contrario, existe un amplio conjunto de posibles fuentes de plasma. Las partículas que forman el plasma son poblaciones de iones, principalmente de H^+ , H_2^+ , W^+ (grupo de iones de agua, definido como una combinación de H_2O^+ , O^+ , OH^+ y H_3O^+) y en menor proporción protones y N^+ . Las principales fuentes de plasma son los anillos (a una distancia menor a $3 R_S$), los satélites de hielo, destacando Encelado como fuente principal de iones de agua (de $3 R_S$ a $6 R_S$) y como fuentes menores Titán ($\sim 20 R_S$), la ionosfera de Saturno y el viento solar.

Para mantener un equilibrio en la población del plasma magnetosférico, la producción de plasma por estas fuentes debe ser balanceada por procesos de pérdida de material en la magnetosfera de Saturno, donde los principales procesos de pérdida son la reconexión magnética, la absorción por materiales neutros, y la dispersión a través de la atmósfera.

2.3. Campo magnético y magnetosfera

Tamaño y estructura de la magnetosfera

La estructura y el tamaño de una magnetosfera planetaria es determinado por la localización de la región donde la presión dinámica del viento solar se iguala a la presión del campo magnético intrínseco del planeta (Chapman y Ferraro, 1931). Debido a que el viento solar es un flujo supersónico, delante de la magnetosfera se forma una onda de choque o *choque de proa** (lado día). El choque es descrito, desde el punto de vista de la hidrodinámica, como una discontinuidad en los parámetros del viento solar; en el cual se conservan la masa, el momento y la energía. Esta discontinuidad se forma frente al planeta a una distancia suficientemente lejana para que el viento solar comprimido fluya alrededor del planeta.

En el choque, el viento solar se desacelera, se desvía y se calienta aún antes de alcanzar al campo magnético planetario, donde la capa de viento solar deflectado detrás del choque se conoce como *magnetofunda* y la frontera entre la magnetosfera y el plasma solar es llamada *magnetopausa*, que es una superficie conductora. En el lado noche (el lado opuesto al Sol), el viento solar estira las líneas del campo magnético originando una cola como la de un cometa, llamada *magnetocola*.

En Saturno, la presión dinámica del viento solar es de 0.015 nPa, que comparado con la presión de 1.5 nPa en la magnetosfera de la Tierra, indica que el viento solar que alcanza a Saturno está diluido. Aún así, el viento solar incidente forma un choque de proa a una distancia de $\sim 27 R_S$ de Saturno (Gombosi et al., 2009). La magnetopausa se forma a una distancia de entre 16 y 27 R_S , dependiendo de la presión del viento solar, donde el valor promedio utilizado es de $\sim 22 R_S$. Entre el choque de proa y la magnetopausa se encuentra la región llamada magnetofunda (Figura 2.16).

En el lado noche del planeta, el viento solar estira las líneas del campo magnético de Saturno en una larga magnetocola que se extiende radialmente a partir de $\sim 20 R_S$ (Mitchell et al., 2009), compuesta por dos lóbulos, con el campo magnético en el lóbulo norte en dirección opuesta a Saturno y el lóbulo sur, apuntando hacia él. Estos lóbulos están separados por una capa delgada llamada hoja de corriente. Al igual que en la magnetosfera terrestre, la magnetocola de Saturno es un canal a través del cual el plasma solar penetra en las regiones internas de la magnetosfera de Saturno, y al mismo tiempo, funciona como vehículo mediante el cual el plasma interno es liberado hacia el exterior de la magnetosfera.

La magnetosfera de Saturno está poblada de partículas energéticas (con energías que van desde cientos de KeV hasta decenas de MeV), similares a aquellas encontradas en los cin-

*A este tipo de choques que se forman enfrente de los obstáculos en el camino del viento solar se les llama *choques de proa* pues es el mismo fenómeno que ocurre enfrente de la proa de un barco o una lancha que se desplazan en el agua a velocidad superior a la velocidad de las ondas en la superficie del agua.

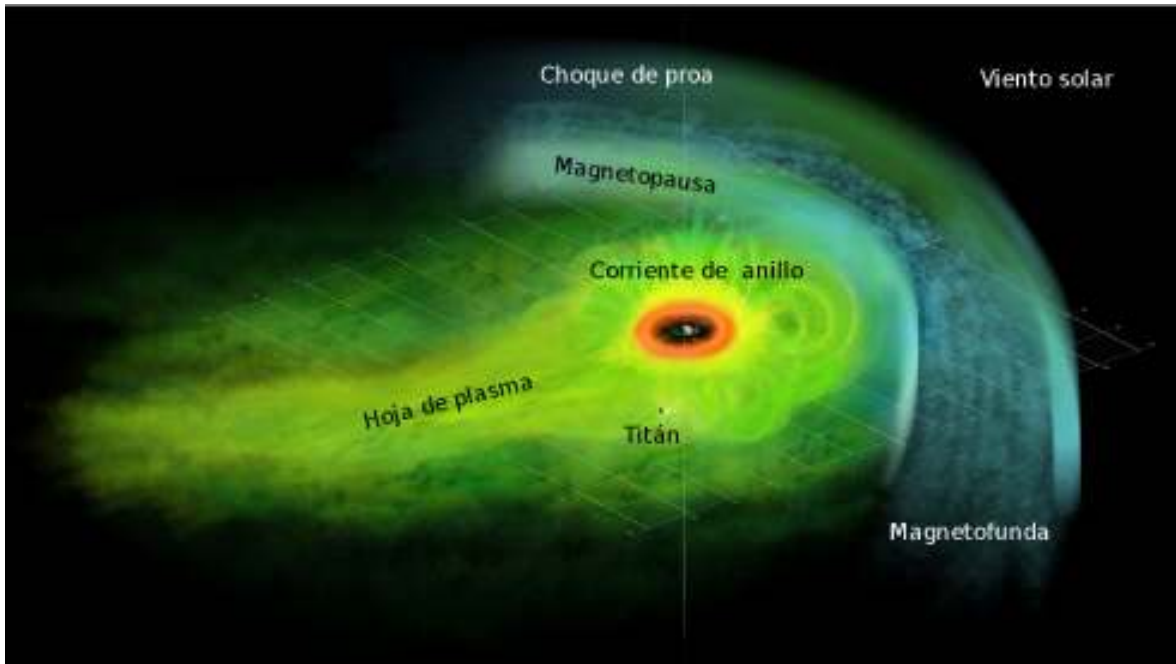


Figura 2.16: Representación esquemática de las regiones de plasma en Saturno. Saturno se encuentra en el centro, rodeado por un anillo de color rojo representando *la corriente de anillo* compuesto principalmente por iones de hidrógeno y oxígeno. Después de esta región anular, hay iones energéticos que pueblan la región llamada *hoja de plasma* (tomada de <http://www.nasa.gov>).

turones de Van Allen terrestres. Estas partículas son atrapadas por el campo magnético de Saturno y se desplazan a lo largo de las líneas del campo en órbitas helicoidales (Figura 2.17 [a]).

Durante el trayecto, las partículas son reflejadas en puntos cercanos al planeta (puntos espejo), retornando en sentido opuesto a lo largo de la misma línea del campo. Esto sucede por una combinación entre la intensidad del campo magnético de Saturno y la velocidad de las partículas, por lo cual, las partículas se encuentran atrapadas en movimiento de “rebote” a lo largo de una misma línea (Figura 2.17 [b]). Los cinturones de radiación de Saturno están formados por varias poblaciones de partículas energéticas en movimiento a lo largo de las líneas del campo, estas partículas pueden cambiar de trayectorias (órbitas) debido a las colisiones con material neutro de la magnetosfera o a las fluctuaciones de los campos magnéticos y eléctricos del plasma (Figura 2.18).

Las partículas atrapadas en los cinturones de radiación derivan alrededor del planeta como producto de las inhomogeneidades del campo magnético, donde los iones derivan en un sentido y los electrones en sentido contrario (Figura 2.17 [b]), dando lugar a la corriente de anillo que modifica el campo magnético planetario.

2.3. Campo magnético y magnetosfera

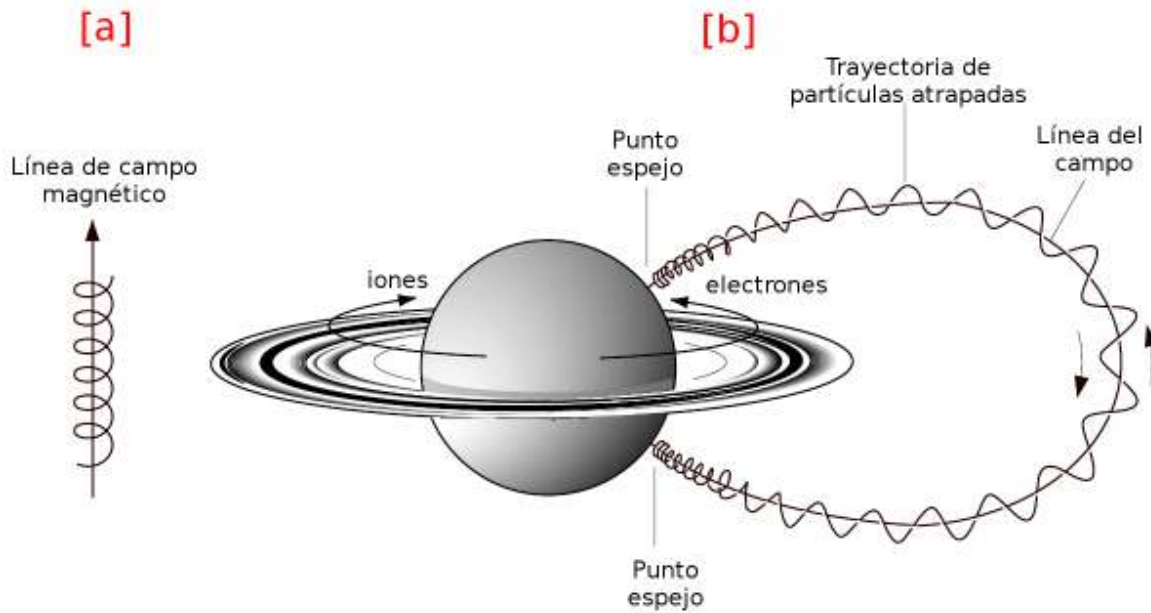


Figura 2.17: Trayectoria de partículas cargadas a lo largo de las líneas del campo magnético. [a] En un campo magnético uniforme las partículas se mueven a lo largo de las líneas del campo magnético en órbitas helicoidales. [b] En un campo magnético dipolar, las partículas también se mueven a lo largo de las líneas del campo en órbitas helicoidales, pero en algún punto cercano al planeta rebotan y retornan en su trayectoria a lo largo de la misma línea del campo. En el plano ecuatorial del planeta, las partículas cargadas se mueven en trayectorias circulares debido a inhomogeneidades en el campo magnético, provocando que los iones se muevan en una dirección y los electrones en otra (tomada de NASA/JPL-Caltech).

Regiones magnetosféricas

A partir de datos obtenidos por las misiones *Cassini* y *Viajero*, la magnetosfera de Saturno se divide generalmente en cuatro regiones que incluyen algunos procesos asociados al plasma (André et al., 2008).

Fundamentalmente, estas regiones son:

1. **El Sistema de anillos**, a una distancia menor a $3 R_S$. Región donde se localizan los anillos y los cinturones de radiación, poblada principalmente por iones de oxígeno y donde el campo magnético es estrictamente dipolar.
2. **El toro de plasma frío**, localizada entre 3 y $6 R_S$, llamada la magnetosfera interna. Contiene una estructura toroidal de plasma originada por los satélites de hielo principalmente, por el satélite Encelado. El campo magnético en esta región es primordialmente dipolar.
3. **La hoja de plasma**, es la tercera región localizada entre 6 y 12 a $14 R_S$. El campo

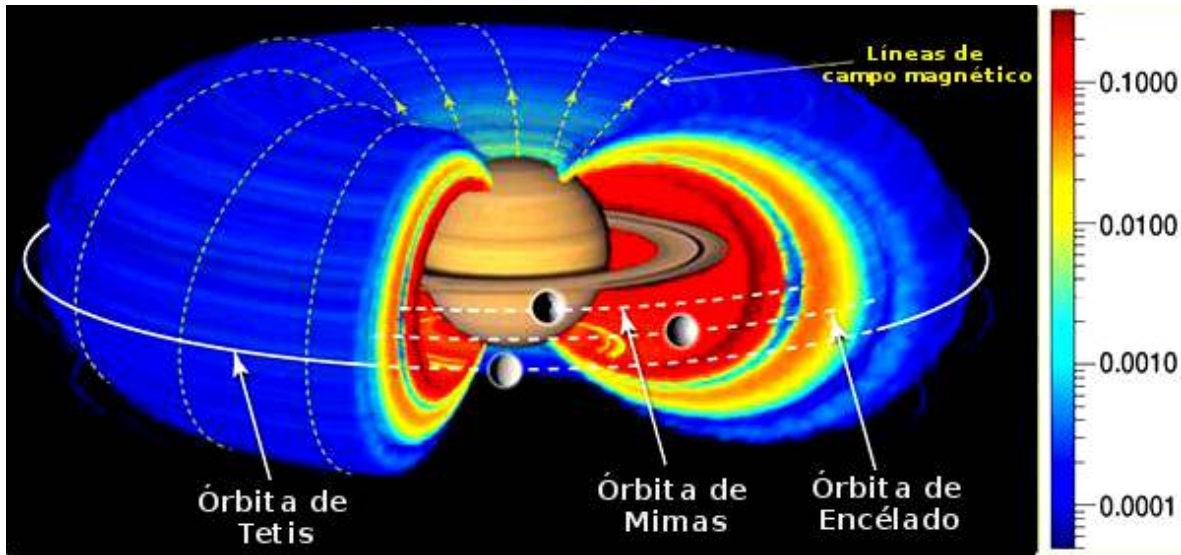


Figura 2.18: La imagen muestra la estructura en forma toroidal de los cinturones de radiación de Saturno, construida a partir de los datos obtenidos por el instrumento MIMI de *Cassini*. La escala de color indica la energía de los iones que pueblan los cinturones de radiación, donde las zonas rojas equivalen a partículas con alta energía (12-59 MeV), y las zonas azules corresponden a partículas con baja energía. Los cinturones de radiación se extienden desde la región interna de los anillos hasta la órbita de Tetis (tomada de NASA/JPL-Caltech/MPS/JHUAPL).

magnético en esta región pierde su característica dipolar. El plasma se confina en una capa ecuatorial muy delgada llamada *hoja de plasma*.

4. La última región se localiza a partir de $15 R_S$ y continúa hasta la frontera con la magnetopausa. Se caracteriza por contener un plasma de baja densidad y un campo magnético principalmente no dipolar debido a la influencia del viento solar.

Entre los 15 y los $20 R_S$, el campo magnético en el plano ecuatorial es comprimido formando una estructura llamada *magnetodisco*. La estructura se extiende hasta la magnetopausa en el lado día (lado frente al Sol) y hasta la magnetocola en el lado noche.

Uno de los descubrimientos más recientes realizados por *Cassini* es haber mostrado que la *hoja de plasma* en la magnetosfera de Saturno tiene forma de tazón, no observada en ninguna otra magnetosfera planetaria (Figura 2.19). La forma de tazón se origina por el ángulo de interacción entre la dirección del viento solar en la órbita de Saturno y la inclinación de su eje de rotación (Gombosi et al., 2009).

2.3. Campo magnético y magnetosfera

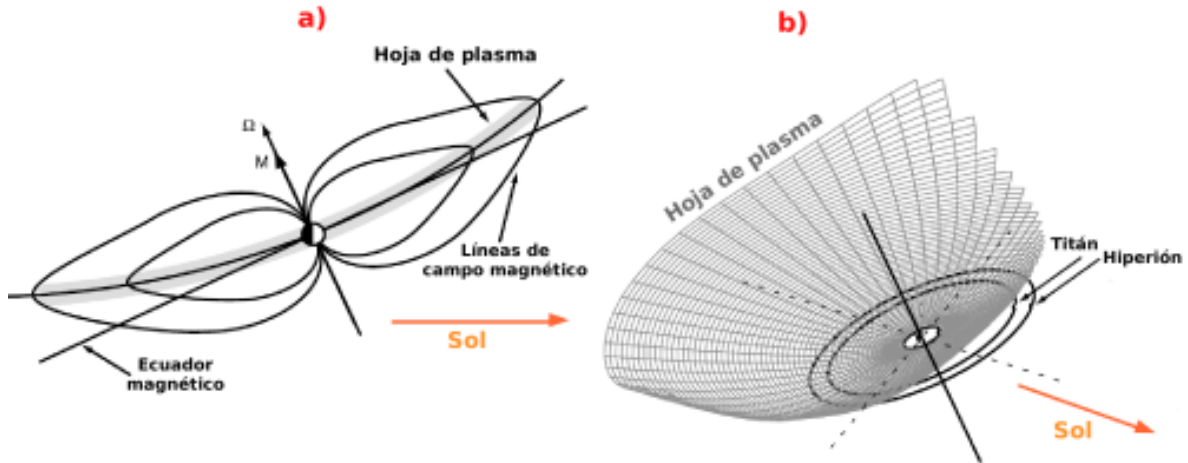


Figura 2.19: Ilustración de la distorsión de la magnetosfera de Saturno. (a) La *hoja de plasma* y las líneas del campo magnético distorsionados. (b) Vista tridimensional de la distorsión y la resultante *hoja de plasma* en forma de tazón. Las órbitas de los satélites Hiperión y Titan se muestran para indicar que se encuentran sumergidos en la *hoja de plasma* (adaptada de Gombosi et al., 2009).

En la Figura 2.20 se observa una imagen artística de la magnetosfera de Saturno indicando las principales características que la forman. Se muestra la ubicación aproximada del choque de proa, la magnetopausa, la hoja de plasma y la corriente de anillo, además de presentar las regiones correspondientes a los anillos, los satélites y el toro de plasma de Titán.

También se ilustra la región donde se produce la radiación kilométrica de Saturno (SKR), que es una radiación con frecuencias en rangos de 10 a 1300 kHz, cuya potencia está modulada por la rotación del planeta y por los cambios de la presión del viento solar. Similarmente se muestran algunas zonas donde se han detectado los átomos neutros energéticos (ENA). Los ENA se generan a partir del intercambio de carga por las colisiones entre partículas ionizadas y átomos neutros de la región donde se encuentran los anillos y los satélites.

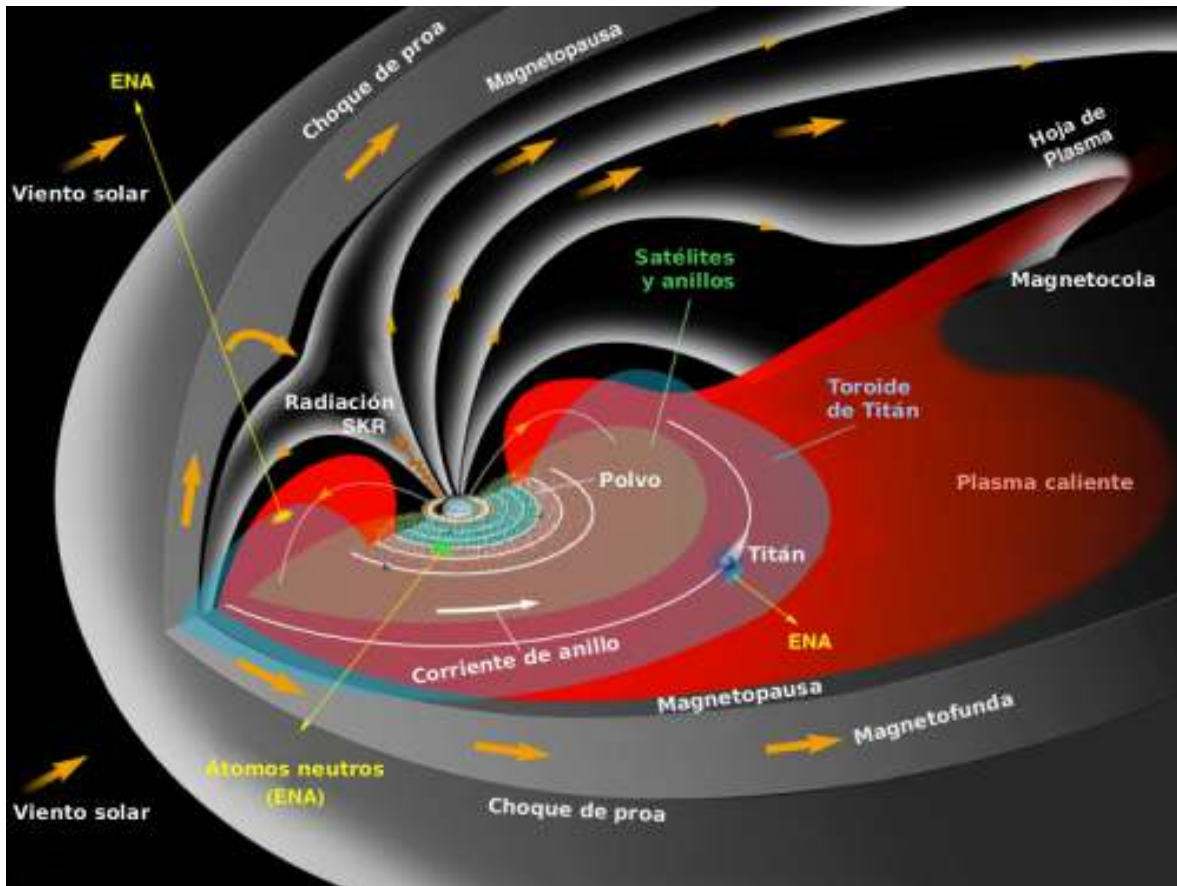


Figura 2.20: Imagen artística de la magnetosfera de Saturno. Se observan las estructuras principales que la forman, así como algunos fenómenos dinámicos asociados a ella, (adaptada de Krimigis et al., 2004).

2.3. Campo magnético y magnetosfera

Capítulo 3

Satélites

3.1. Introducción

El término satélite, fue utilizado por primera vez por Johanes Keppler en 1611, en su panfleto *Narratio de Observatis Quatuor Jovis Satellitibus*, en el cual describió sus observaciones en torno a los cuatro satélites galileanos. Oficialmente un satélite es un objeto sólido que gira alrededor de un planeta, de un planeta enano o de un cuerpo pequeño.

Saturno tiene un conjunto muy grande de satélites con diferentes características y tamaños, que van desde pequeñas lunetas con diámetros menores a 1 km, hasta el enorme Titán con aproximadamente 5,000 km de diámetro, y que se compara en tamaño con Mercurio y con el satélite terrestre, la Luna.

3.2. Descubrimiento de los satélites de Saturno

El 25 de marzo de 1655, utilizando un telescopio diseñado por él mismo y con un aumento de 50X (figura 3.1), Christiaan Huygens descubrió el más grande de los satélites de Saturno, al cual nombró simplemente *Luna Saturni*, renombrado posteriormente como Titán. Huygens nacido en Holanda en 1629, provenía de una familia acaudalada que le proporcionó una vasta educación. Debido a que Holanda se convirtió en esa época en el país con los mayores adelantos en la fabricación de telescopios, este famoso astrónomo rápidamente se volvió un experto en la fabricación de lentes de alta calidad. En las primeras observaciones realizadas con su telescopio, Huygens identificó una estrella a 3 minutos de arco de Saturno. Varios astrónomos ya habían notado la presencia de dicho objeto, y concluido que se trataba de una estrella más. Afortunadamente Huygens continuó realizando observaciones y llegó a calcular el periodo y la órbita de la estrella, publicando sus hallazgos en forma de anagrama el 13 de junio de 1655, para luego editarlos como panfleto con el título *De Saturni luna Observatio*

3.2. Descubrimiento de los satélites de Saturno

Nova y, finalmente publicarlos en su obra *Systema Saturnium* en julio de 1659.

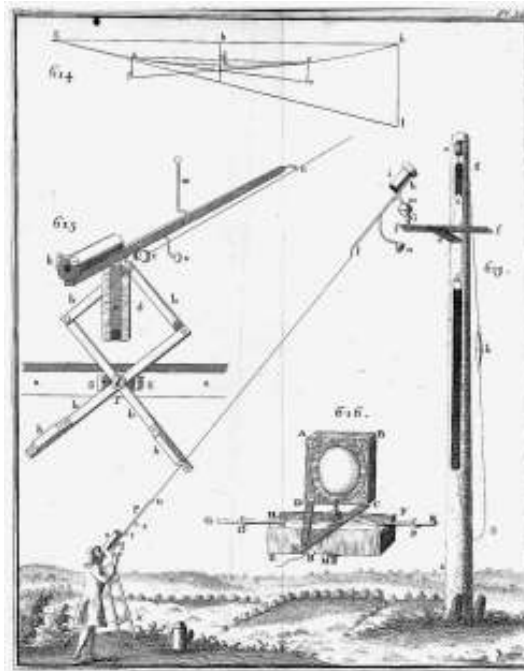


Figura 3.1: Huygens en su telescopio, Observatorio de París.

Varios años después, Giovanni Domenico Cassini, en el Observatorio de París, descubrió otros dos satélites de Saturno: Japeto el 25 de octubre de 1671, y Rea el 23 de diciembre de 1672. Cassini fue el primero en observar que Japeto le muestra siempre la misma cara a Saturno, y que la superficie de éste, contiene una cara oscura y una brillante. El 21 de marzo de 1684, Cassini descubrió Tetis y Dione. Estos cuatro satélites recibieron el nombre de *Siderea Lodoicea* o estrellas luisianas, en honor al Rey Luis XIV. En relación a este evento Cassini escribió:

Los satélites de Saturno son más complicados de observar (en comparación con los Siderea Medicaea de Galileo), y son dignos de llevar el nombre de Luis el Grande, ya que se han descubierto en el glorioso reinado de Su Majestad, y por la extraordinaria ayuda brindada a los astrónomos, en el observatorio de París, debemos nombrarlos justamente Siderea Lodoicea.

Para distinguirlos de los satélites encontrados previamente en Saturno, Cassini los numeró de acuerdo con su distancia al planeta, siendo el satélite más cercano (Tetis) Saturno I, (Dione) Saturno II, (Rea) Saturno III, Titán descubierto primero por Huygens como Saturno IV y el más alejado (Japeto) Saturno V.

El 28 de Agosto de 1789, William Herschel descubrió el sexto satélite (Saturno VI), posteriormente nombrado Encelado, y el 17 de septiembre del mismo año, observó el séptimo satélite, Mimas.

Debido a que los satélites encontrados por Herschel se ubicaban más cerca de Saturno que los observados por Cassini y Huygens, la numeración de éstos debió modificarse, causando una gran confusión en la comunidad científica. Para aclarar la confusión causada por el renombramiento, John Herschel, hijo de William Herschel, sugirió en 1847 que los nombres de los satélites de Saturno deberían llevar los nombres mitológicos de los Titanes, hermanos y hermanas de Cronos (Saturno) (van Helden , 1994). La sugerencia de Herschel fue recibida con entusiasmo, quedando los siete satélites con los nombres conocidos en la actualidad (Mimas, Encelado, Tetis, Dione, Rea, Titán y Japeto).

El octavo satélite de Saturno fue descubierto el 16 de septiembre de 1848, por William Lassell y William Cranch Bond. Siguiendo la sugerencia de John Herschel, Lassell propuso el nombre de Hiperión, dios de la vigilancia y la observación y el 16 de agosto de 1898, William Henry Pickering observó el noveno satélite de Saturno, asignándole el nombre de Febe, una titánide hermana de Saturno según la mitología griega.

A principios del siglo XX (1905), Pickering afirmó haber descubierto un décimo satélite orbitando entre Titán e Hiperión, sin embargo nunca fue comprobada dicha observación. De igual forma, en 1961 y desde el observatorio de París, Hermann Goldschmidt anunció haber descubierto un satélite orbitando entre Titán e Hiperión al cual nombró Quirón. Al igual que lo observado por Pickering en 1905, no se confirmó la existencia de dicho objeto.

Utilizando el telescopio de Pic du midi localizado en los pirineos franceses, el 15 de diciembre de 1966, Audouin Dollfus descubrió un nuevo satélite de Saturno, al que se le asignó el nombre de Jano. El 18 de diciembre de ese mismo año, Stephen Larson, John Fountain y Richard Walker realizaron hallazgos similares en fotografías obtenidas en la Universidad de Arizona, llamando a este satélite Epimeteo. Posteriormente, Larson, Fountain y Walker afirmaron que lo observado por Dollfus y el cuerpo fotografiado por ellos eran objetos diferentes, concluyendo que se trataban de satélites en una misma órbita, es decir, satélites coorbitales. Dicha hipótesis fue confirmada en 1980 por la sonda *Viajero 1*.

Desde la propuesta realizada por John Herschel en 1848 hasta 1972, en la mayoría de los casos los satélites encontrados fueron nombrados por sus descubridores. A partir de 1973, la asignación oficial de los nombres de los satélites naturales es responsabilidad de la Union Astronómica Internacional (IAU), y en particular, del Grupo de Trabajo para la Nomenclatura del Sistema Planetario (WGPN).

3.2. Descubrimiento de los satélites de Saturno

El 1 de marzo de 1980, B. Laques y colegas descubrieron un satélite coorbital en Dione, designado provisionalmente como S/1980 S6, y nombrado Helena en 1988. El 8 de Abril de 1980, Brad Smith, S. Larson y Harold Reitsema descubrieron un satélite coorbital de Tetis, nombrado provisionalmente S/1980 S13 y designado con el nombre de Telesto en 1982. El 13 de agosto de ese mismo año, otro satélite coorbital de Tetis fue descubierto por Dan Pascu, P. K. Seidelmann, W. Baum y D. Currie, con el nombre provisional de S/1980 S25, nombrado Calipso en 1982.

Entre 1980 y 1981, algunos satélites de Saturno fueron descubiertos en fotografías tomadas por las sondas *Viajero*. Los satélites S/1980 S26 y S/1980 S27, satélites pastores del anillo F, fueron descubiertos por S. Collins. En 1985 a estos satélites se les nombró como Pandora y Prometeo respectivamente. En octubre de 1980, Richard Terrile descubrió en fotografías tomadas por *Viajero 1*, el satélite S/1980 S28, satélite pastor del anillo A, nombrado Atlas en 1983.

El 16 de julio de 1990, durante un análisis de las fotografías obtenidas por el *Viajero 2*, Mark Showalter de la NASA identificó un satélite predicho anteriormente cuya órbita se encontraba dentro de la División de Encke, y al que se le nombró Pan en 1991.

Durante el año 2000, el número de satélites de Saturno aumentó considerablemente, doce satélites nuevos fueron descubiertos a través de observaciones con telescopios desde la Tierra. Los primeros tres fueron descubiertos el 7 de agosto por Brett J. Gladman y colegas en el observatorio La Silla en Chile, estos fueron S/2000 S1 (Ymir), S/2000 S2 (Paaliaq) y S/2000 S5 (Kiviuq). El 23 de septiembre, este mismo grupo de astrónomos, utilizando el observatorio de Mauna Kea en Hawai, descubrieron ocho satélites: S/2000 S3 (Siarnaq), S/2000 S4 (Tarvos); S/2000 S6 (Ijiraq), S/2000 S7 (Thrymr); S/2000 S8 (Skathi), S/2000 S9 (Mundilfari); S/2000 S10 (Erriapus) y S/2000 S12 (Suttungr). El doceavo satélite fue descubierto el 9 de noviembre por Matthew Holman, el S/2000 S11 (Albiorix).

Debido a que la mayoría de estos satélites son irregulares, los descubridores acordaron que los nombres de éstos deberían desviarse de los nombres tradicionales asignados a los satélites de Saturno. La mayoría de los astrónomos involucrados en los descubrimientos son originarios de países con una cultura en común, la nórdica, y bajo esta premisa, los satélites observados fueron nombrados con base en los dioses y las diosas de las mitologías Inuit, Celta y Nórdica.

Durante la misión histórica de la nave *Cassini*, los astrónomos utilizaron los instrumentos a bordo para seguir buscando nuevos objetos orbitando a Saturno. En agosto de 2004, Sebastien Charnóz y el equipo de imágenes de Cassini liderados por Carolyn C. Por-

co (<http://www.ciclops.org/>) descubrieron dos pequeños satélites entre Mimas y Encelado, S/2004 S1 y S/2004 S2, nombrados posteriormente como Metone y Palene.

El 24 de octubre de 2004, el equipo de imágenes de Cassini anunció haber descubierto otro satélite coorbital de Dione, S/2004 S5 (Pólux); y en mayo del 2005, anunció el descubrimiento de un satélite orbitando entre Pan y Atlas, S/2005 S1 o Dafne, nombre sugerido por Carolyn C. Porco.

Entre diciembre de 2004 y febrero de 2007, se descubrieron 24 nuevos satélites utilizando el telescopio Subaru en Mauna Kea Hawai. La mayoría de estos satélites tienen órbitas retrógradas y pertenecen al grupo de satélites irregulares. Los nombres de estos satélites se relacionan con las culturas Inuit, Celta o Nórdica.

El 30 de Mayo de 2007, el equipo de imágenes de Cassini, anunció el descubrimiento de un nuevo satélite orbitando entre Metone y Palene, provisionalmente se le asignó el nombre de S/2007 S4 y posteriormente se le nombró Antea. Metone, Palene y Antea forman un pequeño grupo de lunetas llamadas Alciónides, caracterizadas por compartir la hipótesis de que su origen se debió a la fragmentación de un protosatélite, (Figura 3.2), (Porco et al., 2007).

Ese mismo año también fueron detectados diversos objetos formando una hélice dentro del anillo A, prueba de la existencia de lunetas orbitando en los anillos de Saturno, lo cual favorece la hipótesis de la creación de los anillos vía la desintegración de algún cuerpo mayor. En octubre de 2007, fueron detectados ocho nuevas lunetas formando parte de hélices (propellers) según las imágenes del anillo A, con radios entre los 30 y los 70 m y concentrados en una región de 300 km de ancho a una distancia de 130,000 km de Saturno (Sremčević et al., 2007).

Es indudable que la nave *Cassini* ha permitido detectar continuamente nuevos cuerpos orbitando a Saturno, en particular, pequeñas lunetas que van de los 4 a los 400 m de diámetro, y que son objetos indetectables para telescopios desde la Tierra. El número de satélites de Saturno aceptado por la IAU actualmente es de 62, de los cuales 53 tienen un nombre asignado y trece de los 62 tienen diámetros mayores a 50 km.

3.3. Clasificación de los satélites por grupos orbitales

Como se vió en la sección anterior, los satélites de Saturno son numerosos y muy diversos, aunque se podrían clasificar en torno a cualquiera de las características físicas que los componen, el conjunto numeroso encontrado en las imágenes capturadas por Cassini, motivó a la IAU a realizar una clasificación general con base en sus características orbitales.

3.3. Clasificación de los satélites por grupos orbitales

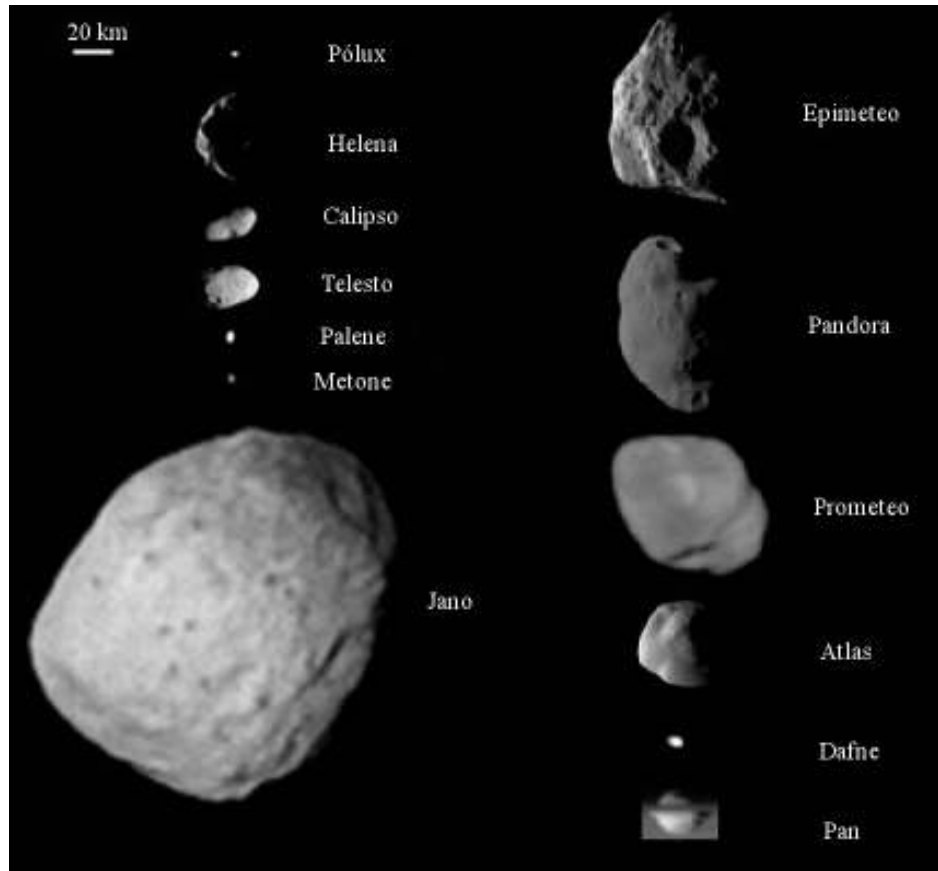


Figura 3.2: Imágenes en alta resolución de los satélites pequeños de Saturno, obtenidas por el equipo de imágenes de Cassini en 2004. Se muestran las imágenes de todos los satélites pequeños, excepto Antea (orbitando entre Metone y Palene), bajo la misma escala y ordenados de acuerdo a su distancia a Saturno. Pan se encontraba transitando a Saturno, ocultada parcialmente por los anillos vistos de lado (imagen adaptada de Porco et al., 2007).

3.3.1. lunetas de los anillos

A partir del 2007, las imágenes de los anillos capturadas por Cassini han sido utilizadas para identificar lunetas orbitando dentro de los anillos A, B, F y G. Una característica de estos objetos es la interacción con el material que forma los anillos, generando una estructura en forma de hélice (propellers), la cual es identificada en las imágenes por su peculiar forma. Las lunetas son muy pequeñas, con diámetros desde los 40 m hasta los 500 m. Se estima que el anillo A contiene 7,000 a 8,000 lunetas con tamaños cercanos a los 0.8 km, y posiblemente millones con tamaños cercanos a los 0.25 km (Tiscareno et al., 2007).

3.3.2. Satélites pastores

Los satélites pastores son pequeños cuerpos que orbitan dentro, o un poco más allá, de un sistema de anillos planetarios. Tienen la función de esculpir los anillos, dándoles bordes afilados y creando divisiones entre ellos. Los satélites pastores en Saturno son: Pan (división de Encke), Dafne (división de Keeler), Atlas (anillo A), Prometeo (anillo F) y Pandora (anillo F). Se estima que estos satélites se formaron por la acreción de material anular sobre un núcleo denso. Estos núcleos, tenían un tamaño de entre un tercio y un medio del tamaño actual de los satélites, y pudieron originarse por la desintegración de un cuerpo de mayor tamaño (Porco et al., 2007).

3.3.3. Satélites coorbitales

Como se vió en la sección previa, Jano y Epimeteo fueron descubiertos casi simultáneamente, al principio se pensó que eran el mismo objeto, pero posteriormente se confirmó que se trataba de dos satélites diferentes que compartían la misma órbita. Estos satélites son casi del mismo tamaño, y las órbitas de éstos son diferentes sólo en algunos kilómetros en sus semiejes mayores, tan cercanos entre si, que podrían colisionar si pasaran uno junto al otro. Este efecto no ha sucedido debido a la interacción gravitacional entre ellos, de tal forma que intercambian órbitas cada cuatro años (Spitale et al., 2006).

3.3.4. Alciónides

Los Alciónides son tres pequeños satélites orbitando entre Mimas y Encelado ($\sim 3 R_S$): Metone, Antea y Palene, cuyo radio medio es ~ 1.6 km, ~ 1 km y ~ 2.5 km respectivamente. Fueron nombrados en relación con la historia mitológica del rey Alcioneo y sus hijas. En las imágenes obtenidas por *Cassini* se han observado arcos anulares muy tenues en sus órbitas (Figura 3.3), Se piensa que semejantes estructuras en los satélites es polvo eyectado por el impacto de micrometeoroides en sus superficies, y este polvo ha formado una tenue estructura semi anular en sus órbitas.

3.3.5. Satélites troyanos

Al igual que los satélites coorbitales, los satélites troyanos son cuerpos que comparten la misma órbita, la diferencia radica en que además comparten la órbita con un tercer cuerpo de mayor tamaño. Estos cuerpos se sitúan en los puntos lagrangianos L_4 y L_5 del cuerpo mayor.

3.3. Clasificación de los satélites por grupos orbitales

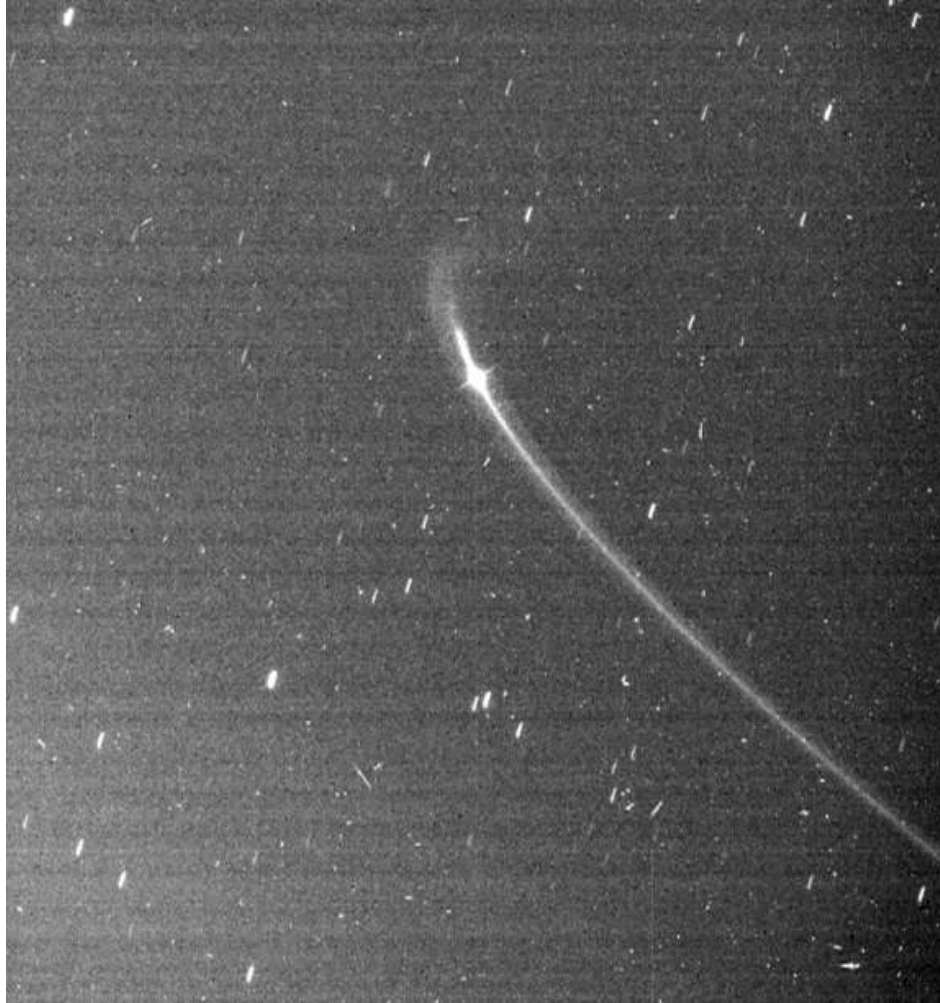


Figura 3.3: Imagen obtenida por el equipo de imágenes de Cassini en 2008, donde se revela un arco tenue de material en la órbita del pequeño satélite Antea <http://www.ciclops.org/>.

En el caso de Saturno, existen dos pares de satélites troyanos asociados a los satélites Tetis y Dione. Tetis tiene asociados los satélites troyanos Telesto (L_4) y Calipso (L_5), mientras que Dione tiene como troyanos a Helena (L_4) y Pólux (L_5).

3.3.6. Satélites irregulares

Un satélite irregular es un cuerpo pequeño que orbita muy alejado del planeta al cual está ligado gravitacionalmente, se caracteriza por tener una órbita con una inclinación considerable y generalmente posee movimiento orbital retrógrado. Se estima que los satélites irregulares fueron capturados gravitacionalmente, a diferencia de los satélites regulares que se formaron in situ, y es frecuente que provengan de una misma familia de colisión (Jewitt y

Haghighipour, 2007).

Las mediciones espectrales realizadas en los satélites irregulares indican que estos presentan rasgos distintivos en el espectro visible, infrarrojo cercano y en la banda de absorción del agua. Las propiedades ópticas de las superficies varían desde el color neutro (color del Sol) hasta tonalidades rojizas similares a los asteroides tipo C, tipo P y tipo D (Grav y Bauer, 2007).

Con base en estas características se ha agrupado a los satélites irregulares de Saturno en tres grupos:

Grupo Inuit

Este grupo está formado por los satélites Ijiraq, Kiviuq, Paaliaq, Siarnaq y Tarqeqcon. Presentan movimiento prógrado, se sitúan a una distancia entre $186 R_S$ y $297 R_S$, y tienen inclinaciones orbitales entre 45° y 50° . El satélite de tamaño mayor de este grupo es Siarnaq, con un diámetro medio de 40 km.

Grupo Celta (Gallic)

Este grupo está formado por los satélites Albiorix, Bebhionn, Erriapus y Tarvos. Con movimiento prógrado, se sitúan a una distancia entre $207 R_S$ y $302 R_S$, con inclinaciones orbitales entre 35° y 40° . Tarvos es el satélite con movimiento prógrado más alejado de Saturno. El de mayor tamaño en este grupo es Albiorix con un diámetro medio de 32 km. Las observaciones recientes realizadas por *Cassini*, revelaron que Albiorix presenta variaciones en el color de su superficie que sugieren la presencia de un cráter de impacto de grandes dimensiones, y por lo cual se piensa que Erriapus y Tarvos pudieron haber surgido de la colisión de Albiorix con otro cuerpo de ~ 1 km de diámetro (Grav y Bauer, 2007).

Grupo Nórdico

Este grupo está formado por 29 satélites con movimiento retrógrado, situados a una distancia entre $215 R_S$ y $395 R_S$, con inclinaciones orbitales entre 136° y 175° . A diferencia de los grupos Inuit y Celta, los parámetros orbitales de los satélites que lo componen son muy variados, de tal forma que se podrían dividir en subgrupos con parámetros físicos y orbitales homogéneos.

Febe, de 214 km de diámetro, es el satélite irregular de mayor tamaño en el Grupo Nórdico y del sistema de satélites de Saturno, las características físicas y orbitales de Febe se presentan

3.3. Clasificación de los satélites por grupos orbitales

en la siguiente sección. Después de Febe, el satélite de mayor tamaño en el grupo es Ymir con un diámetro medio de 18 km.

Los satélites que forman este grupo son: Aegir, Bergelmir; Bestla, Farbauti; Fenrir, Fornjot; Greip, Hati; Hyrrokkin, Jarnsaxa; Kari, Loge; Mundilfari, Narvi; Febe, Skathi; Skoll, Surtur; Suttungr, Thrymr; Ymir, S/2004 S7; S/2004 S12, S/2004 S13; S/2004 S17, S/2006 S1; S/2006 S3, S/2007 S2 y S/2007 S3.

3.3.7. Satélites grandes

Este grupo está integrado por los primeros satélites descubiertos en Saturno (Mimas, Encelado, Tetis, Dione, Rea, Titán, Hiperión, Japeto y Febe), recibieron nombres relacionados con los titanes y las titánides, hermanos y hermanas de Saturno, hijos de Urano y de Gea (excepto Titán), derivados de la historia mitológica griega (Blunck, 2010). Por lo mismo se les denomina **Los Titanes**, ya que son los cuerpos más grandes del sistema de satélites de Saturno. Las características físicas de estos satélites pueden verse en el Cuadro 3.1.

Propiedades	Mimas	Encelado	Tetis	Dione	Rea	Titán	Hiperión	Japeto	Febe
Radio medio (km)	198.2±0.25	253.10±0.10	533.00±0.70	561.70±0.45	764.30±1.10	2575.5±2.0	135.00±4.00	735.6±1.5	106.60±1.00
Semiejes (km)									
a	207.8±0.5	256.6±0.3	538.4±0.3	563.4±0.6	765.0±0.7	–	180.1±2.0	745.7±2.9	109.4±1.4
b	196.7±0.5	251.4±0.2	528.3±1.1	561.3±0.5	763.1±0.6	–	133.0±4.5	745.7±2.9	108.5±1.6
c	190.6±0.3	248.3±0.2	526.3±0.6	559.6±0.4	762.4±0.6	–	102.7±4.5	712.1±1.6	101.8±1.3
Masa (10 ¹⁹ kg)	3.749±0.03	10.802±0.01	61.7449±0.01	109.545±0.01	230.6518±0.04	1345.2±0.2	0.561±0.005	180.563±0.037	0.8292±0.001
Densidad (g/cm ³)	1.150±0.004	1.608±0.003	0.973±0.004	1.476±0.004	1.233±0.005	1.88±0.004	0.545±0.048	1.083±0.007	1.634±0.046
Fracción de silicatos	0.27	0.57	0.06	0.50	0.33	0.5 a 0.7	–	0.20	0.5 a 0.7
Semieje mayor (km)	185540	238040	294670	377420	527070	1221870	1500880	3560840	12947780
Periodo orbital (días)	0.942	1.370	1.888	2.737	4.518	15.945	21.28	79.33	550.31
Albedo geométrico	0.6	1	0.8	0.6	0.6	0.22	0.3	0.6	0.081±0.002
Excentricidad	0.0196	0.0047	0.0001	0.0022	0.0010	0.0288	0.0274	0.0283	0.1635
Inclinación (grados)	1.572	0.009	1.091	0.028	0.331	0.348	0.630	7.489	175.986
Oblicuidad (grados)	0.001	0.001	0.002	0.005	0.029	0.270	0.461	14.968	26.891

Cuadro 3.1: Características físicas y dinámicas de los nueve satélites grandes de Saturno (Adaptada de Matson et al., 2009 y Thomas, 2010).

Mimas

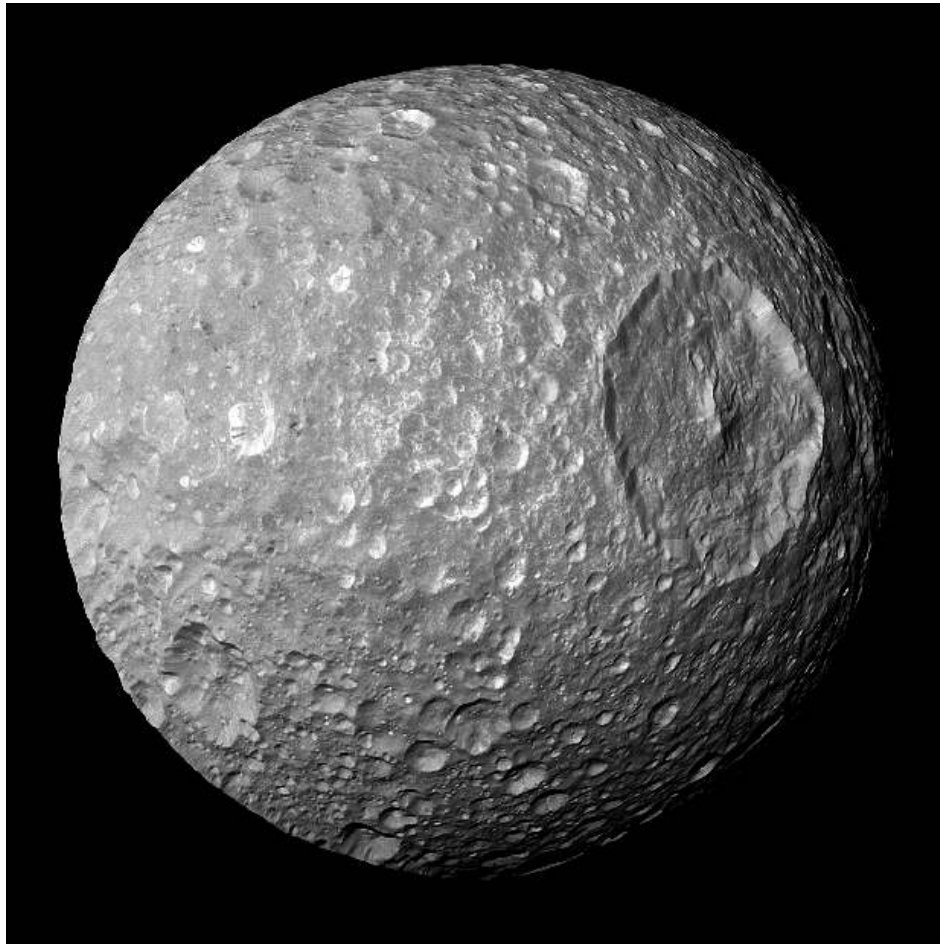


Figura 3.4: Imagen de Mimas obtenida por *Cassini* el 13 de febrero de 2010 a una distancia aproximada de 9,500 km de la superficie (imagen tomada de <http://ciclops.org/>).

Mimas (Figura 3.4), fue descubierto por William Hershel el 17 de septiembre de 1789, su nombre se deriva del gigante mitológico Mimante, hijo de Urano (el Cielo) y Gea (la Tierra) (Blunck, 2010). Es uno de los tres satélites más pequeños de los satélites grandes de Saturno, con un radio medio de 198.2 km y orbita a una distancia promedio de $3.1 R_S$ (Cuadro 3.1).

Una cantidad de estructuras importantes en los anillos de Saturno está relacionada con las resonancias orbitales del material de los anillos con Mimas. Es responsable por el aclaramiento de material en la División de Cassini, una brecha entre los anillos A y B. El material en la brecha Huygens que se localiza en la orilla interior de la división de Cassini se encuentra en resonancia orbital 2:1 con Mimas. Similarmente, la frontera entre los anillos C y B está en resonancia orbital 3:1 con Mimas. Mimas se encuentra en resonancia orbital con los satélites

Tetis (2:1) y con el satélite pastor Pandora (2:3).

La baja densidad de este satélite indica que su composición es en su mayoría hielo de agua con una cantidad menor de roca (27 %), (Cuadro 3.1). Debido a fuerzas de marea, la forma de Mimas es de un elipsoide triaxial achatado en los polos (Thomas, 2010). Se estima que el interior de Mimas está diferenciado, conteniendo un núcleo rocoso cubierto por un manto de hielo. El radio del núcleo sería de $\sim 44\%$ del radio de Mimas, con una densidad de $3.5 \pm 0.08 \text{ g/cm}^3$, mientras que la densidad del manto se estima en $0.96 \pm 0.08 \text{ g/cm}^3$ (Dermott y Thomas, 1988).

En la superficie de Mimas se encuentran tres tipos de características geológicas principales: cráteres de impacto, cadenas de cráteres de impacto (Catena) y valles (Chasma), (Figura 3.5).

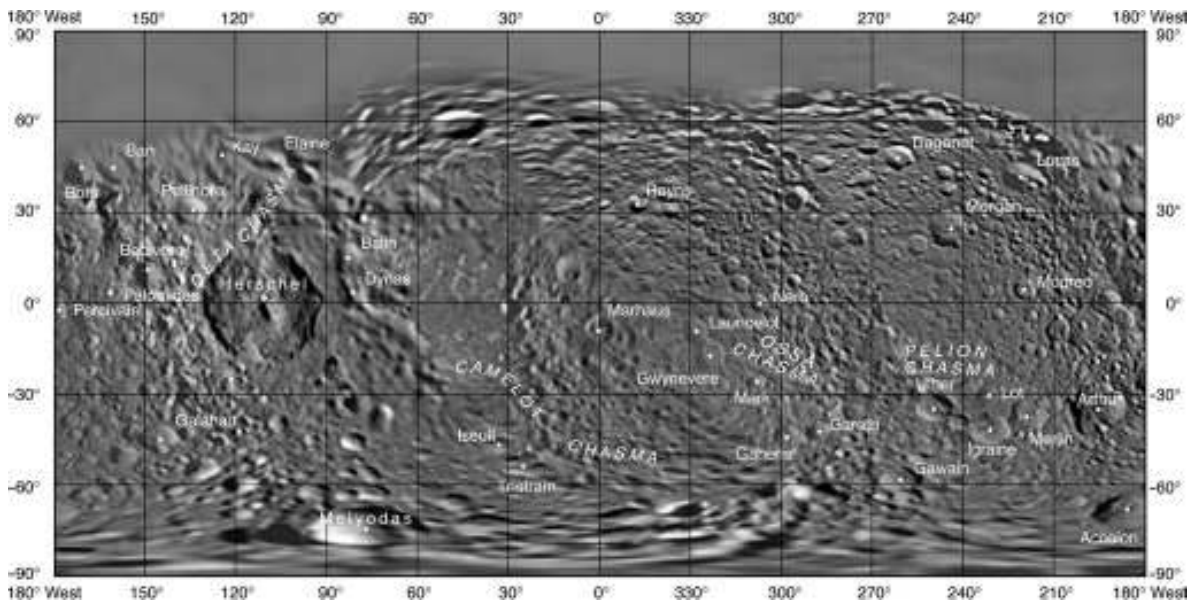


Figura 3.5: Mapa topográfico de Mimas con una escala de 0.43 km/píxel (imagen tomada de Roatsch et al., 2009).

La superficie se encuentra altamente craterizada, los cráteres de impacto identificados con la nomenclatura oficial de la IAU, van desde algunas decenas de kilómetros de diámetro, hasta el impresionante cráter Herschel con un diámetro de 139 km. El cráter Herschel es uno de los cráteres de impacto más grandes en el Sistema Solar en relación con el tamaño del cuerpo impactado, la profundidad de las paredes del cráter alcanzan los 10 km, y el pico central es de aproximadamente 6 km de altura (Figura 3.4).

Encelado

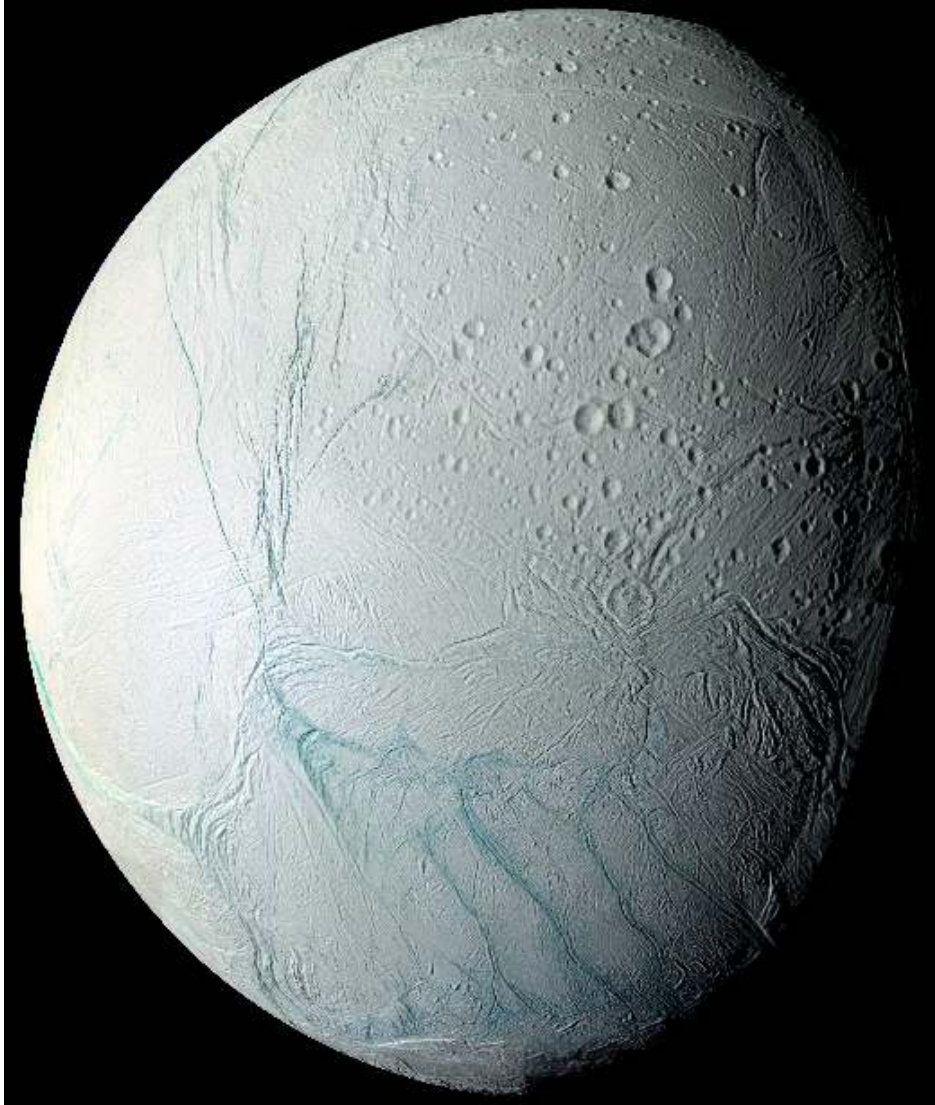


Figura 3.6: Imagen de Encelado obtenida por *Cassini* el 14 de junio de 2005 a una distancia aproximada de 61,300 km de la superficie (imagen tomada de <http://ciclops.org/>).

Encelado (Figura 3.6), fue descubierto por Frederick William Herschel el 28 de agosto de 1789, durante las primeras observaciones realizadas con su telescopio de 1.2 m de diámetro, en ese entonces el telescopio más grande del mundo. El nombre de Encelado se deriva del gigante mitológico de cien brazos Enceladus, hijo de Urano y de Gea (Blunck, 2010).

Encelado orbita Saturno a una distancia de 238,040 km ($3.9 R_S$), requiriendo 32.9 hrs en completar la órbita. Al igual que Mimas, Encelado interactúa gravitacionalmente con otros cuerpos del sistema de Saturno, en particular se encuentra en resonancia orbital 2:1 con Dio-

ne, la cual ayuda a mantener la excentricidad de su órbita (0.0047) (Cuadro 3.1).

Encelado orbita dentro de la parte más densa del anillo E (Figura 3.7), el más alejado de los anillos de Saturno, un disco muy ancho compuesto de material microscópico de hielo y polvo que inicia en la órbita de Mimas ($3 R_S$) y probablemente termina en la órbita de Rea ($8 R_S$), (las características de los anillos de Saturno, se muestran en el capítulo siguiente de este trabajo). De acuerdo con las mediciones recientes realizadas por *Cassini*, este satélite es la fuente principal de partículas que forman este anillo (Kempf et al., 2008).

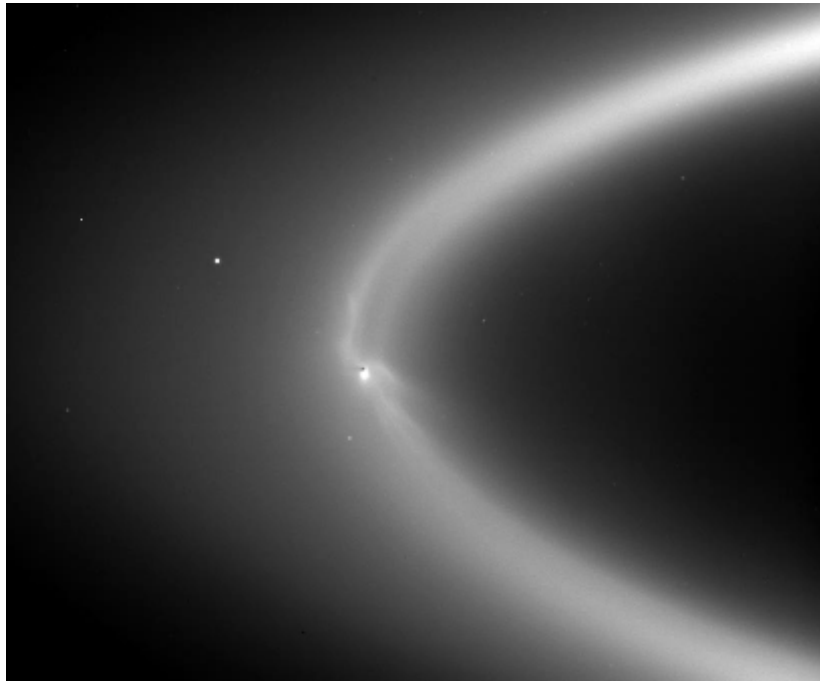


Figura 3.7: Imagen de Encelado orbitando en la parte más densa del anillo E, obtenida por *Cassini* el 15 de septiembre de 2006 a una distancia aproximada de 2.1 millones de kilómetros de Encelado (imagen tomada de <http://ciclops.org/>).

Encelado tiene la forma de un elipsoide triaxial achatado en los polos, con el semieje más grande apuntando hacia Saturno (Cuadro 3.1). Estas dimensiones están en concordancia con un cuerpo en equilibrio hidrostático, y al igual que la mayoría de los satélites grandes, su rotación es sincrónica.

Existen diversos modelos que describen la estructura interna de Encelado, los que más concuerdan con las observaciones predicen un interior diferenciado, con un núcleo rocoso entre 150 y 190 km de radio (fracción de silicatos de 57%), cubierto por un manto de hielo de agua con un grosor entre 60 y 100 km. Este manto a su vez, podría contener una región de agua líquida en su interior (Postberg et al., 2009).

3.3. Clasificación de los satélites por grupos orbitales

Sobrevuelos de *Cassini* en Encelado han localizado que, en la región alrededor del polo sur, hay actividad criovolcánica. El material eyectado (plumas) en dicha región, aproximadamente 200 kg/s, se compone principalmente de agua (90 % a 94 %), dióxido de carbono (5 %); metano (0.9 %) y amoniaco (0.8 %), y en menor cantidad argón, ácido sulfídrico y sodio (Porco et al., 2006). Esta mezcla de materiales en las plumas de Encelado apoya la hipótesis de la existencia de un océano bajo la superficie, y concuerda con el material del cual está compuesto el anillo E (Figura 3.8).

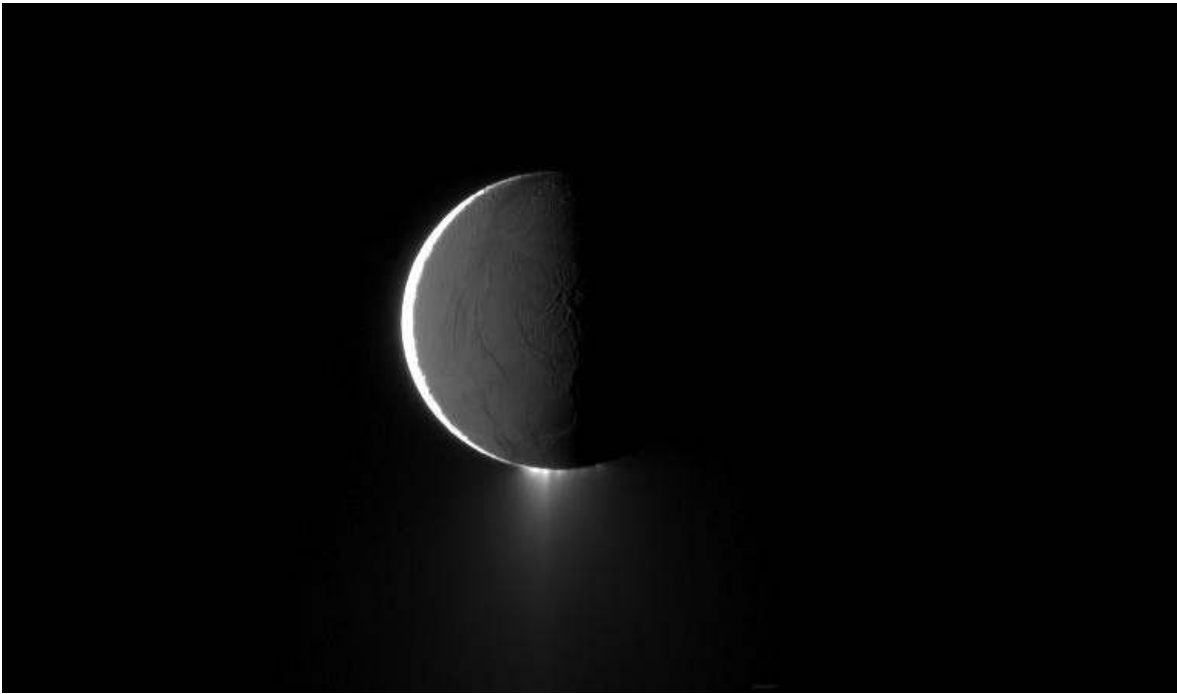


Figura 3.8: Imagen obtenida por *Cassini*, en el espectro de luz visible, el 13 de octubre de 2009, donde se observan las plumas de material eyectado en el hemisferio sur de Encelado a una distancia aproximada de 431,000 km. La escala de la imagen es de 3 km/píxel (imagen tomada de <http://ciclops.org/>).

La superficie de Encelado es diferente a la observada en otros satélites grandes, ya que se puede separar en dos regiones con características topográficas diferentes.

El hemisferio norte es una región donde las estructuras geológicas están compuestas principalmente por cráteres de impacto, cordilleras (Dorsum) y depresiones (Fosae). Por otro lado, el hemisferio sur está dominado por llanuras (Planitia) y surcos paralelos (Sulcus) (Figura 3.9). Esta diferencia en la topografía del satélite indica que las eyecciones de material (plumas) renuevan constantemente la superficie de Encelado y, que a diferencia de otros cuerpos, ocultan las estructuras geológicas y los posibles cráteres de impacto. Además del material eyectado en el hemisferio sur, en Encelado se han observado estructuras geológicas

relacionadas con actividad tectónica, y que posiblemente pudieran modificar las características de la superficie (Spencer et al., 2009).

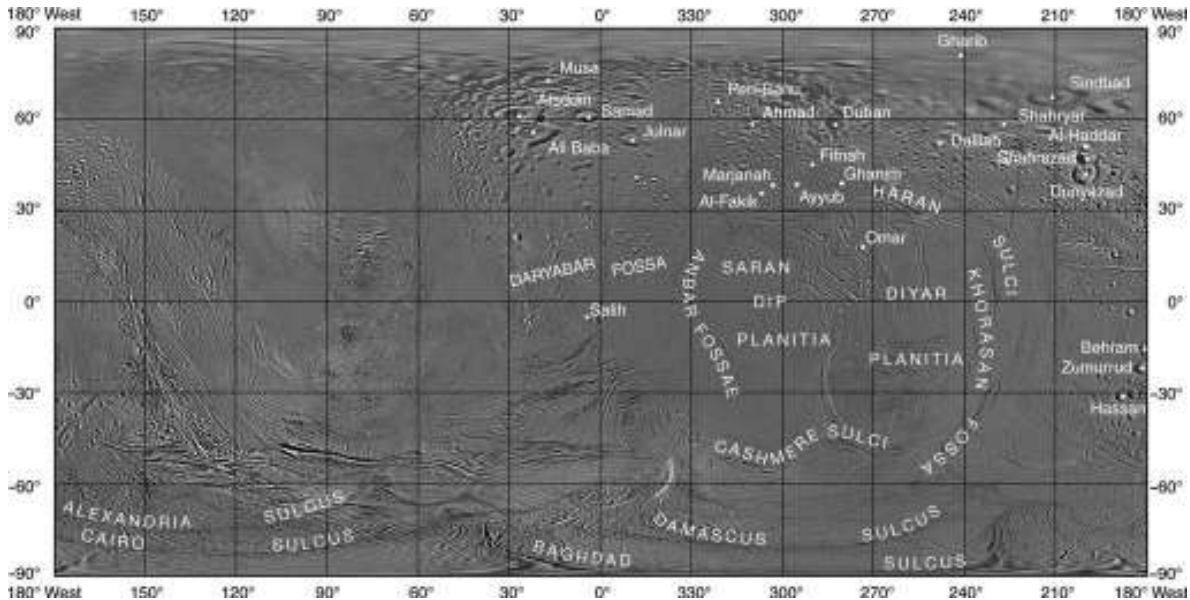


Figura 3.9: Mapa topográfico de Encelado con una escala de 0.11 km/píxel (imagen tomada de Roatsch et al., 2009).

Las imágenes obtenidas por *Cassini*, en julio de 2005, revelaron una región deformada tectónicamente rodeando el polo sur de Encelado. En esta región, que va de los 60° sur hasta el polo, se observan fracturas tectónicas y crestas semiparalelas (Sulcus) llamadas comúnmente las *rayas de tigre* por su singular apariencia. Estas estructuras, identificadas con los nombres de las ciudades Alejandría, Cairo, Bagdad y Damasco, son fisuras gigantescas en la litósfera, las cuáles tienen una longitud de ~ 130 km de largo, ~ 2 km de ancho y ~ 500 m de profundidad (Figura 3.10). Es indispensable destacar que en las rayas de tigre es donde se ha observado la eyección o plumas de material en el hemisferio sur de Encelado. Algunas imágenes en los espectros visible e infrarrojo obtenidas por *Cassini* muestran que es en estas estructuras donde se registra la mayor actividad geológica superficial (geísers) (Figura 3.11).

3.3. Clasificación de los satélites por grupos orbitales

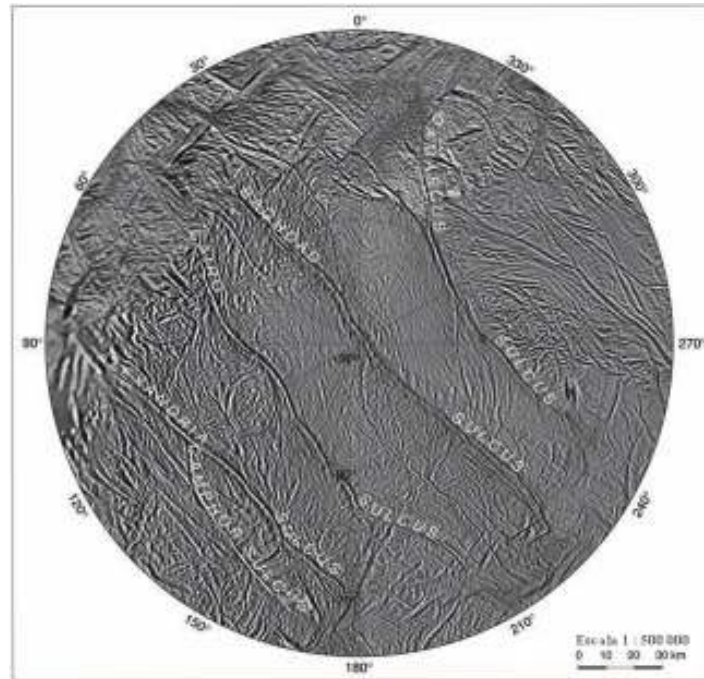


Figura 3.10: Mapa topográfico del hemisferio sur de Encelado donde se observan las fisuras geológicas conocidas como las rayas de tigre (imagen tomada de Roatsch et al., 2009).

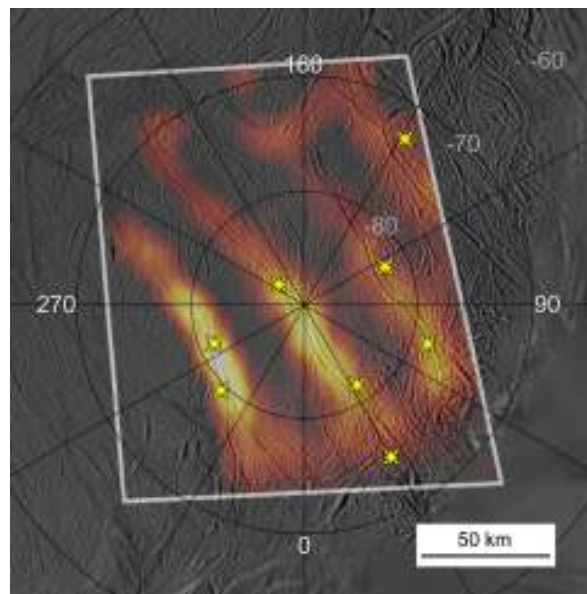


Figura 3.11: Imagen sobrepuesta del mapa topográfico del polo sur de Encelado, y mediciones espectrales de las rayas de tigre. Los colores indican la temperatura superficial (180 K, en las zonas amarillas), y las estrellas amarillas señalan la posición de las eyecciones (geísers) de material (imagen tomada de <http://cirs.gsfc.nasa.gov/>).

Tetis

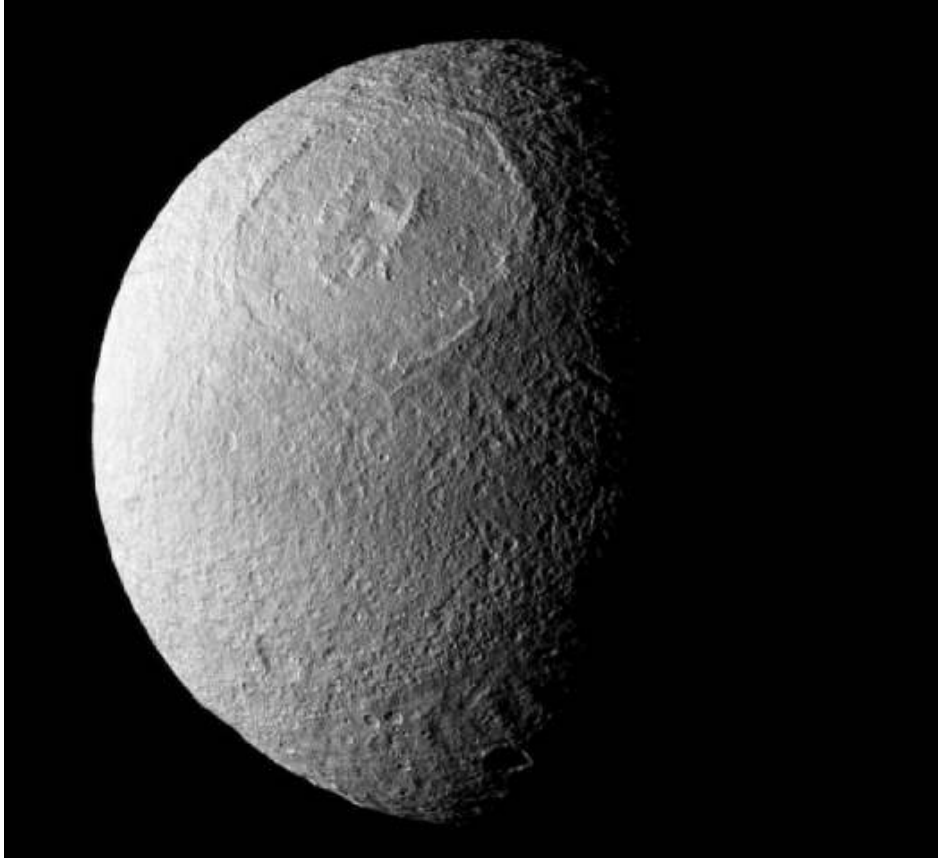


Figura 3.12: Imagen de Tetis obtenida por *Cassini* el 3 de febrero de 2010 a una distancia aproximada de 178,000 km de la superficie, (imagen tomada de <http://ciclops.org/>).

Tetis (Figura 3.12), fue descubierta por Giovanni Domenico Cassini el 21 de marzo de 1684, utilizando un telescopio aéreo en el Observatorio de París. Su nombre se deriva de Tetis, titánide y diosa del mar en la mitología griega (Blunck, 2010).

Tetis orbita Saturno a una distancia de $\sim 295,000$ km ($4.9 R_S$), requiriendo 45.3 hrs en completar la órbita, tiene una rotación sincrónica (Cuadro 3.1). Como se vio anteriormente con Mimas, Tetis y Mimas están anclados en una resonancia orbital de 1 a 2, sin embargo, para Tetis esta interacción no manifiesta ningún efecto en su órbita, ya que su excentricidad es muy pequeña, ni en la conversión de energía gravitacional en térmica, producto de las fuerzas de marea (Matson et al., 2009).

Tetis tiene asociados dos satélites troyanos: Telesto y Calipso, localizados en los puntos lagrangianos L_4 y L_5 , es decir, 60° por delante y 60° atrás en la órbita de Tetis respectivamente.

3.3. Clasificación de los satélites por grupos orbitales

Dada la baja densidad estimada para Tetis, se piensa que su interior está compuesto principalmente por hielo de agua y en menor proporción de roca (Cuadro 3.1). Tiene forma de un elipsoide triaxial, correspondiendo con un interior no diferenciado. Es probable que su interior sea una mezcla homogénea de ambos materiales. Las mediciones espectrales de la superficie confirman la presencia de regolita de hielo de agua como componente principal, contaminada por pequeñas cantidades de material oscuro que no ha sido totalmente identificado; se piensa que este material podría ser hematita (Jaumann et al., 2009).

La superficie de Tetis es una de las más brillantes del sistema solar, con un albedo de Bond de 1.22 (albedo geométrico de 0.8). Este albedo tan grande es el resultado del recubrimiento por material eyectado en las plumas de Encelado que es depositado en la superficie de Tetis, donde el hemisferio delantero tiene un albedo 15 % mayor que el albedo del hemisferio trasero (Verbiscer et al., 2007).

La superficie de Tetis alberga tres tipos de estructuras geológicas principales: cráteres de impacto, valles (Chasma) y montañas (Montes) (Figura 3.13).

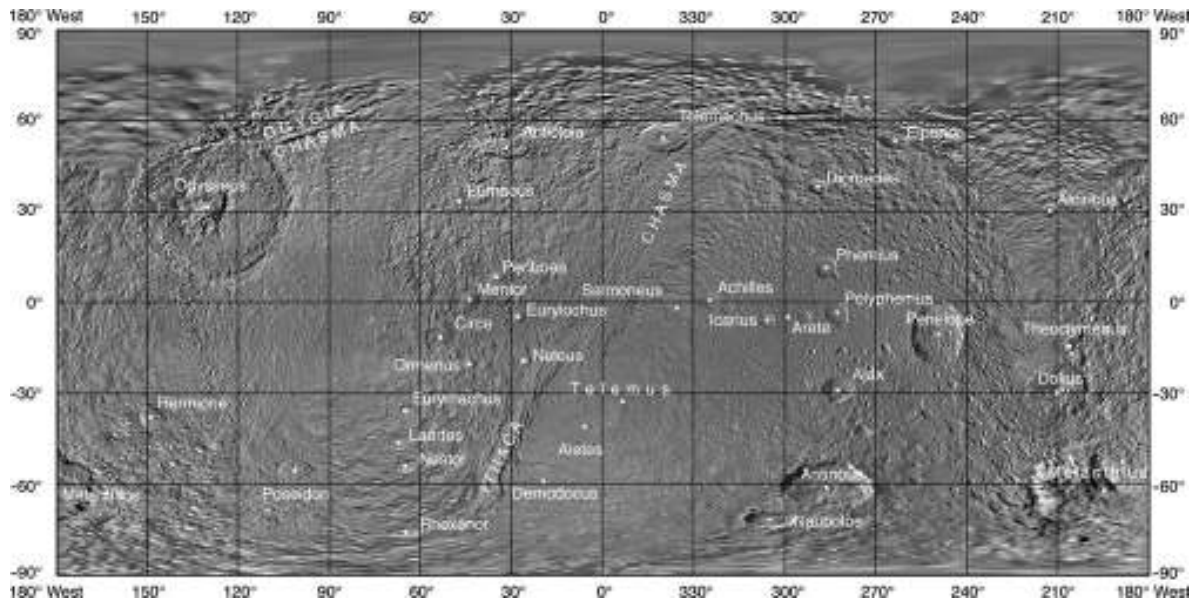


Figura 3.13: Mapa topográfico de Tetis con una escala de 0.29 km/pixel (imagen tomada de Roatsch et al., 2009).

Tetis tiene una superficie altamente craterizada (Figura 3.12), donde la mayoría de los cráteres de impacto nombrados por la IAU tienen más de 40 km de diámetro. El cráter de impacto que destaca es Odiseo con 450 km de diámetro y una profundidad de 8 km. El pico central de Odiseo está rodeado por una cadena de montañas con forma circular llamada Esqueria Montes, con diámetro de 185 km y alturas entre los 2 y los 4 km (Figura 3.14).



Figura 3.14: Imagen del cráter Odiseo en Tetis obtenida por *Cassini* el 24 de diciembre de 2005 (imagen tomada de <http://ciclops.org/>).

Rodeando a Odiseo se localiza un gran valle hundido llamado Ítaca chasma, tiene una longitud de $\sim 2,000$ km, un ancho de ~ 100 km y una profundidad de ~ 3 km, es la estructura geológica más grande después de Odiseo y cubre el $\sim 10\%$ de la superficie de Tetis. Se pensaba que el valle de Ítaca pudo haberse originado por el impacto que causó el cráter Odiseo, sin embargo, estudios recientes de la litósfera y medidas del flujo de calor en Ítaca determinaron que la edad del valle (4×10^9 años) es mayor que la edad calculada para Odiseo (Giese et al., 2007).

Dione



Figura 3.15: Imagen de Dione obtenida por *Cassini* el 12 de diciembre de 2011 a una distancia aproximada de 108,000 km de su superficie. En la imagen se observan los anillos vistos de lado, y los satélites Prometeo (por encima de los anillos) y Epimeteo, (imagen tomada de <http://ciclops.org/>).

Dione (Figura 3.15), fue descubierto el mismo día que Tetis por Giovanni Domenico Cassini, su nombre se deriva de la titánide griega Dione, diosa de la bondad y madre de Afrodita (Blunck, 2010). Con 1,122 km de diámetro, Dione es el cuarto satélite más grande de los satélites de Saturno. Orbita Saturno a una distancia de 377,000 km ($\sim 6.3 R_S$), tardando 65.7 hrs en completar la órbita, y presentando una rotación sincrónica (Cuadro 3.1). Al igual que los otros satélites grandes vistos anteriormente, Dione interactúa gravitacionalmente con otros cuerpos del sistema de Saturno, manteniendo resonancias orbitales con Encelado (1:2) y con Mimas (1:3). Dione tiene asociados los satélites troyanos Helena y Pólux, localizados en los puntos lagrangianos L_4 y L_5 respectivamente.

Debido a su forma elipsoidal triaxial y a su densidad (Cuadro 3.1), se estima que contiene

3.3. Clasificación de los satélites por grupos orbitales

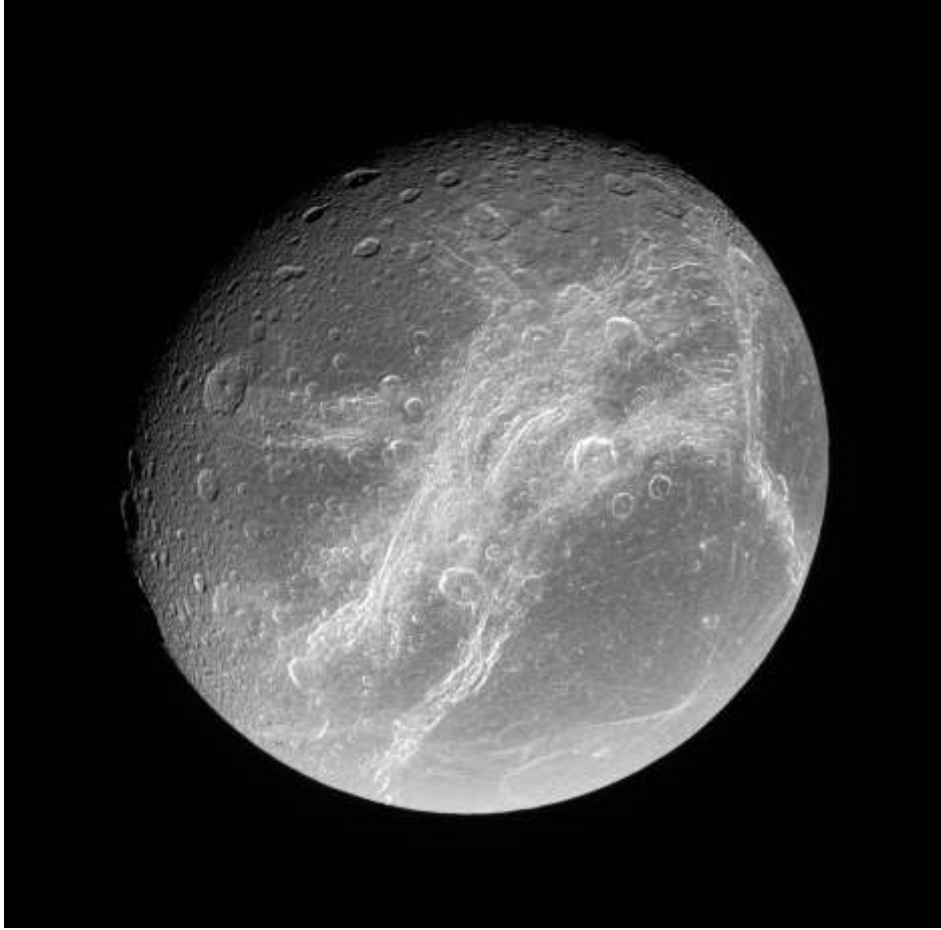


Figura 3.17: Imagen de los acantilados en el hemisferio trasero de Dione obtenida por *Cassini* el 24 de julio de 2006 (imagen tomada de <http://ciclops.org/>).

Recientemente, durante un sobrevuelo de *Cassini* el 7 de abril de 2010, el espectrómetro de plasma (CAPS) detectó la presencia de una delgada capa de iones de oxígeno molecular alrededor de Dione, lo cual implica la presencia de una exósfera más que una tenue atmósfera. La densidad de esta capa exosférica se estima entre los 0.01 g/cm^3 y los 0.09 g/cm^3 (Tokar et al., 2012). Se piensa que la presencia de las moléculas de oxígeno alrededor de Dione es producto de la colisión de partículas energéticas con la superficie, desprendiendo el oxígeno de las moléculas de agua del hielo superficial.

Rea

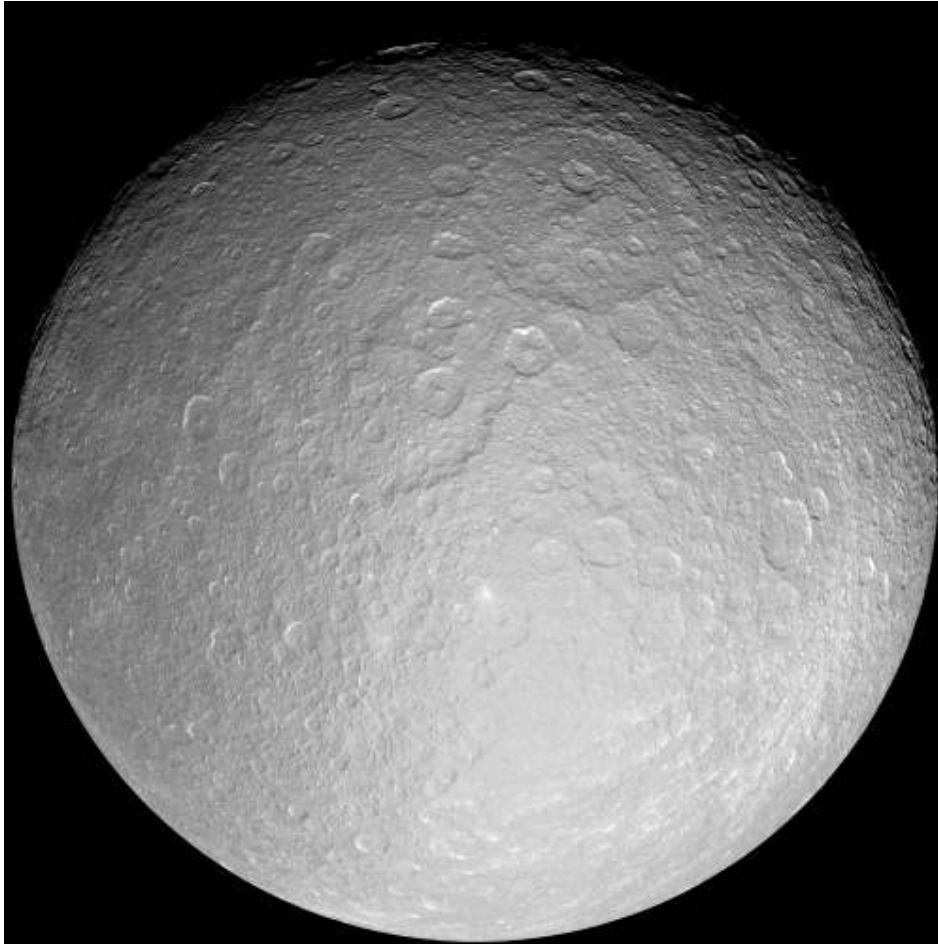


Figura 3.18: Imagen de Rea obtenida por *Cassini* el 26 de noviembre de 2005 a una distancia aproximada de 58,000 km de la superficie. En la parte superior central de Rea se observan los cráteres de impacto Tirawa (360 km de diámetro) y Mamaldi (480 km de diámetro) (imagen tomada de <http://ciclops.org/>).

Rea (Figura 3.18), es el segundo satélite más grande del sistema de satélites de Saturno, fue nombrado en honor a la titánide Rea, hija de Urano y Gea, madre de los Dioses y Diosas del Olimpo en la mitología griega (Blunck, 2010). Fue descubierto el 23 de diciembre de 1672 por Giovanni Domenico Cassini, en el observatorio de París.

Rea orbita Saturno a una distancia de 527,000 km ($\sim 8.7 R_S$), completando su órbita en 108.43 hrs, tiene una rotación sincrónica (Cuadro 3.1). Su forma es elipsoidal triaxial que corresponde con un cuerpo en equilibrio hidrostático. La densidad de Rea es de 1.23 g/cm^3 , lo que indica que está compuesto principalmente por hielo de agua y por roca (33 %).

De acuerdo con las observaciones realizadas por *Cassini* y la aplicación de modelos geodinámicos, se tienen diferentes modelos del interior de Rea, de los cuales destacan dos que

3.3. Clasificación de los satélites por grupos orbitales

describen su composición y estructura interna: el primero postula un interior diferenciado, que consiste en un núcleo rocoso con una densidad de $\sim 2.5 \text{ g/cm}^3$ rodeado por un manto de hielo con densidad de $\sim 1 \text{ g/cm}^3$. El otro modelo implica una mezcla homogénea de 75 % de hielo y 25 % de roca, en el cual, el material está distribuido en un núcleo de hielo tipo II (hielo más compacto y denso), rodeado de un manto de hielo tipo I_H (Castillo-Rogez, 2006), (Anderson y Schubert, 2007).

Al igual que Dione, la superficie de Rea tiene diferentes características topográficas en sus hemisferios delantero y trasero, de la misma forma que el albedo en el hemisferio delantero es mayor que el albedo en el hemisferio trasero (Matson et al., 2009).

La topografía de la superficie de Rea comprende las siguientes estructuras: cráteres de impacto, cadenas de cráteres de impacto (Catena), Valles (Chasma), depresiones (Fosae) y líneas (Lineae) (Figura 3.19). En el hemisferio opuesto a Saturno se localiza Tirawa, un cráter de impacto de 360 km de diámetro y $\sim 5 \text{ km}$ de profundidad. Se piensa que el cuerpo que impactó a Rea, formando el cráter Tirawa, reorientó el elipsoide inercial entre 1 y 2° , modificando sus propiedades gravitacionales (Ducci et al., 2012).

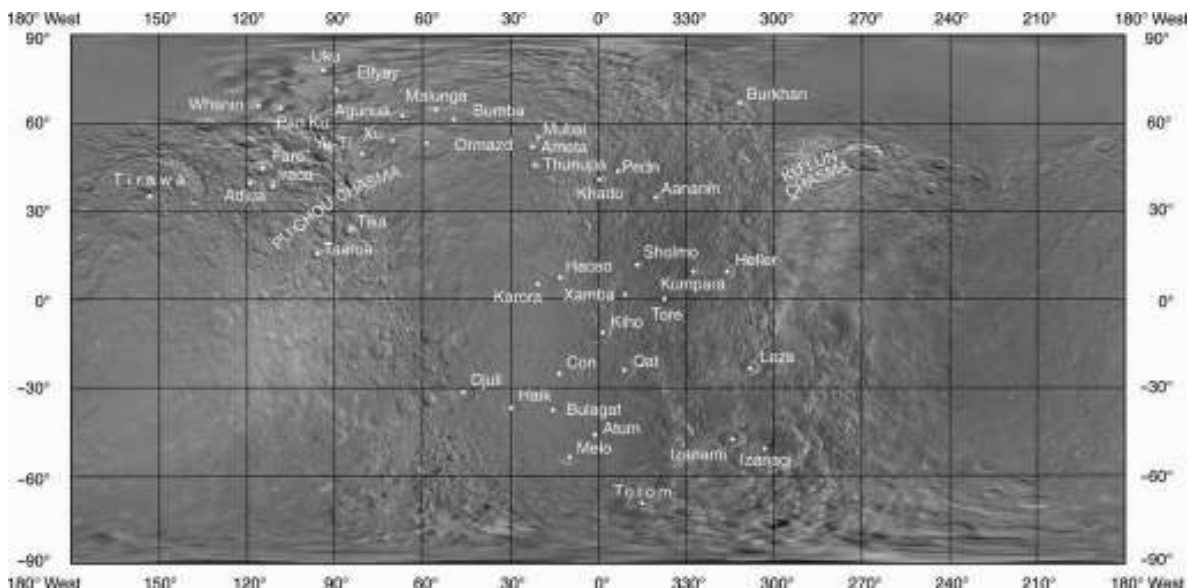


Figura 3.19: Mapa topográfico de Rea con una escala de 0.67 km/píxel (imagen tomada de Roatsch et al., 2009).

La superficie de Rea puede dividirse en dos regiones geológicamente diferentes basándose en la densidad de cráteres. La primera es una región con cráteres de impacto mayores a los 40 km de diámetro, y la otra región que se localiza en la zona ecuatorial y polar, se constituye por cráteres de menores dimensiones, sugiriendo que en algún momento ocurrió la renovación de

la superficie en esta región.

Similarmente a Dione, en un sobrevuelo de *Cassini* sobre Rea (7 de noviembre de 2010), utilizando el espectrómetro de masas de iones neutros (INMS), se detectó la presencia de una capa atmosférica muy delgada (exósfera), compuesta por una mezcla de 70 % de oxígeno molecular y 30 % de dióxido de carbono (Teolis et al., 2010).

Titán

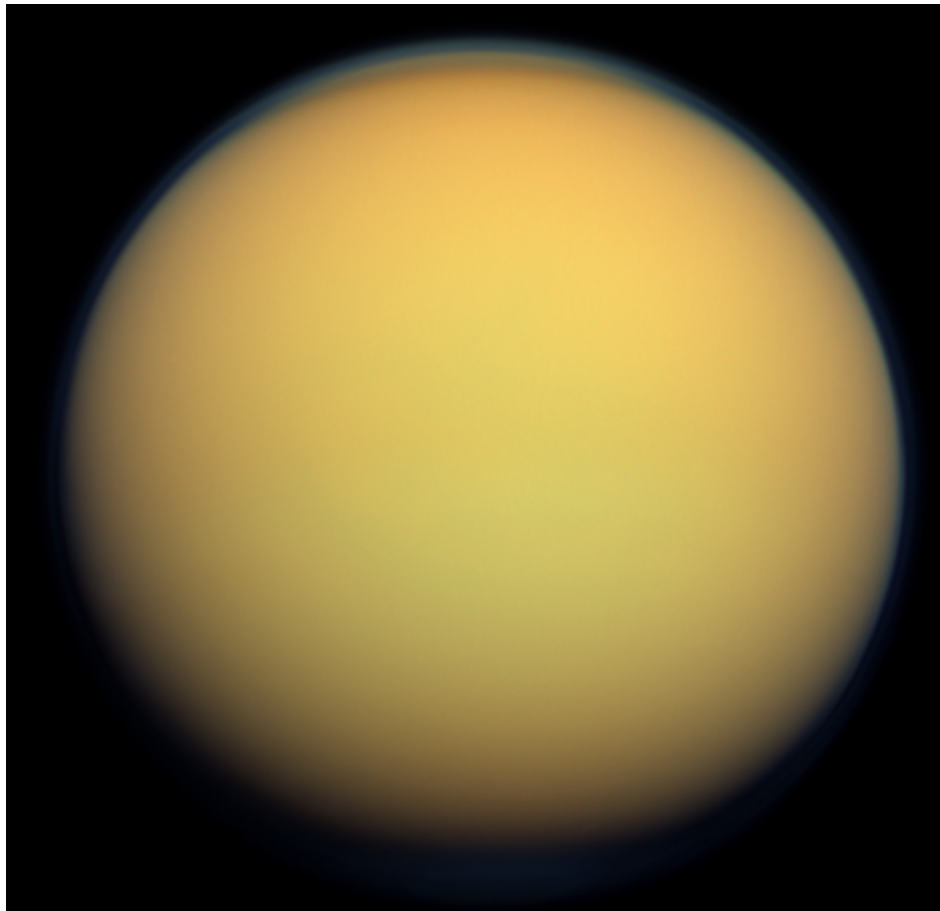


Figura 3.20: Imagen de Titán obtenida por *Cassini* el 30 de enero de 2012 a una distancia aproximada de 191,000 km de la superficie. Para esta imagen se utilizó una combinación de filtros espectrales rojo, verde y azul, para crear una vista natural de Titán (imagen tomada de <http://ciclops.org/>).

Titán (Figura 3.20), es el satélite más grande del sistema de satélites de Saturno, y también es el más masivo, su masa representa el 96 % de la masa contenida en los cuerpos orbitando a Saturno. Su nombre se origina de los Titanes, descendientes de Urano y de Gea, hermanos y hermanas de Kronos (Saturno). En la mitología griega, los Titanes eran deidades poderosas, que gobernaron el universo durante la legendaria edad de oro (Blunck, 2010).

3.3. Clasificación de los satélites por grupos orbitales

Fue descubierto el 25 de marzo de 1655, por el astrónomo holandés Christiaan Huygens, orbita Saturno a una distancia de 1,221,000 km ($\sim 20 R_S$) y tarda 15 días y 22 hrs en completar su órbita. Debido al acoplamiento de marea se encuentra en rotación sincrónica con Saturno y está acoplado a través de la resonancia orbital 4:3 con el satélite Hiperión; se se piensa que este acoplamiento contribuyó a que la órbita de Hiperión en el pasado fuera menos caótica que en la actualidad. Se piensa que Titán desvió los objetos que pudieron colisionar con un Hiperión en formación.

El diámetro de Titán es de aproximadamente 5,000 km, posee una densidad de 1.88 g/cm^3 y tiene la forma de un esferoide ligeramente achatado en los polos. Se estima que el interior de Titán está diferenciado en un núcleo de roca y metal de $\sim 1,900 \text{ km}$ de radio y densidad de $\sim 3.0 \text{ g/cm}^3$, rodeado por varias capas de diferentes formas cristalinas de hielo (Figura 3.21).

La capa de hielos tiene un grosor aproximado de 700 km y se compone de una capa de hielo tipo II (hielo comprimido por altas presiones) con una densidad de 1.31 g/cm^3 , cubierta por un océano de agua líquida de 200 km de profundidad con amoníaco disuelto en él (entre el 10 % y el 30 %) actuando como anticongelante y finalmente una corteza de hielo tipo I_h con un grosor entre 50 y 150 km y una densidad de 0.920 g/cm^3 (Tobie et al., 2005).

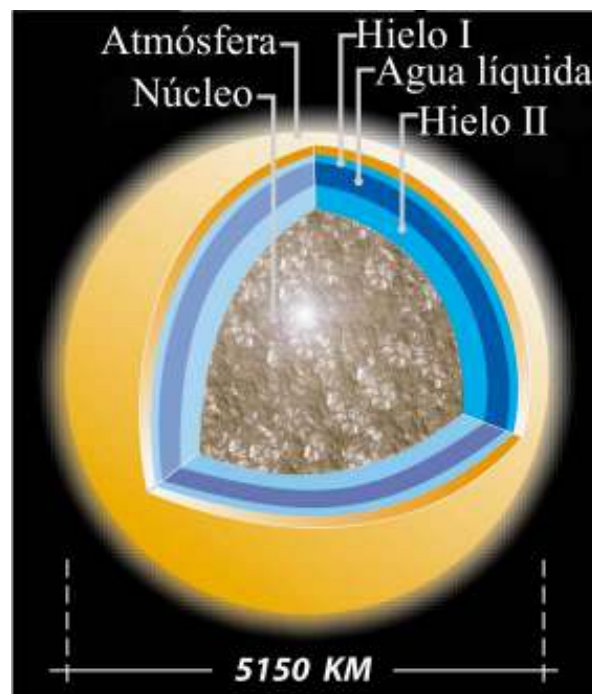


Figura 3.21: Imagen que representa un modelo de la estructura interna de Titán, correspondiente con la densidad de 1.88 g/cm^3 (imagen adaptada de Tobie et al., 2005).

Cassini ha podido medir una pequeña falta de sincronización en la rotación de Titán que

se interpreta como el resultado del desacoplamiento de la corteza con el interior a través de una capa líquida, confirmando la presencia de un océano en su interior (Lara, 2010).

A simple vista, Titán tiene la apariencia de una esfera anaranjada con una orilla violeta y difusa (Figura 3.20), esta apariencia anaranjada se deriva de una capa atmosférica rica en hidrocarburos. La presencia de una atmósfera en Titán fue propuesta por primera vez en 1903 por el astrónomo español José Comás i Solà, sin embargo, fue confirmada hasta 1944 cuando Gerard P. Kuiper realizó mediciones espectrales, resultando que la atmósfera es una mezcla de hidrocarburos dominados por el metano.

Actualmente la misión *Cassini-Huygens*, a través de los instrumentos a bordo del orbitador *Cassini* y la sonda de descenso *Huygens*, ha permitido conocer con mayor detalle la composición química, la meteorología y la climatología de la atmósfera de Titán. La similitud con la atmósfera terrestre es sorprendente: existe un ciclo similar al ciclo hidrológico, salvo que las nubes de convección y la lluvia son de metano y no de agua. La composición química en la estratosfera es 98 % nitrógeno, con el 1.6 % restante dividido entre metano (1.4 %) e hidrógeno (del 0.1 % al 0.2 %).

Dado que el metano en la atmósfera de Titán se condensa a grandes altitudes, los valores de metano por debajo de la tropopausa (a una altitud de 32 km) empiezan a aumentar hasta abundancias cercanas al 5 % en altitudes entre los 8 km y la superficie, habiendo trazas de otros hidrocarburos como el etano, diacetileno, acetileno, metacetileno y propano, además de los gases helio y argón (Strobel et al., 2009).

Se piensa que el tono anaranjado de Titán es la deposición de una capa de aerosoles, posiblemente tolines,* localizados en la parte superior de la atmósfera. Estos hidrocarburos, se forman al desintegrarse el metano por la luz ultravioleta solar, produciendo una capa gruesa de color naranja (Waite et al., 2007).

En septiembre de 2006, con los instrumentos de radar de *Cassini*, se observó un patrón de nubes de 2,400 km de diámetro a una altitud de 40 km sobre el polo norte de Titán (Figura 3.22). Estas nubes están formadas por partículas de tamaños entre 1 y 3 μm y su composición química corresponde a la del etano (Flasar et al., 2009). Este hallazgo contradice lo que se postuló con las mediciones espectrales de las naves *Viajero*, según las cuales estaban formadas de metano. *Cassini* también ha detectado nubes en el polo sur de Titán, en cantidades mucho menores, y se ha observado que los patrones nubosos solo se forman a ciertas latitudes.

*Sustancias químicas complejas ricas en nitrógeno que se forman al bombardear moléculas orgánicas simples, como metano y etano, con radiación ultravioleta o electrones en una atmósfera rica en nitrógeno.

3.3. Clasificación de los satélites por grupos orbitales



Figura 3.22: Patrón de nubes en el polo norte de Titán, detectadas con el instrumento VIMS de *Cassini* el 29 de diciembre de 2006 (imagen tomada de <http://www.vims.lpl.arizona.edu/>).

En las regiones polares, las nubes de etano aparecen por encima de la troposfera, mientras que a latitudes menores se encuentran esporádicamente nubes de metano entre los 15 km y los 18 km de altitud (Figura 3.23).

Una característica observada en la atmósfera de Titán es un efecto similar al efecto invernal terrestre, donde la capa de neblinas disminuye la temperatura en la atmósfera baja, mientras que el metano eleva la temperatura en la superficie. Se estima que la erupción de criovolcanes es la responsable de eyectar metano a la atmósfera, cayendo luego en forma de lluvias o lloviznas sobre la superficie, formando los lagos, los canales fluviales y los ríos. Los hallazgos de la sonda Huygens indican que en la atmósfera de Titán llueve metano líquido y otros compuestos orgánicos periódicamente sobre la superficie (Flasar et al., 2009).

La atmósfera de Titán es el doble de gruesa que la de la Tierra, esto implica que la superficie no pueda ser observada en el espectro de luz visible. Por esto mismo, el orbitador *Cassini* está utilizando instrumentos de observación en el espectro infrarrojo y radares de apertura sintética (SAR) y altimetría, para poder mapear porciones de la superficie en los sobrevuelos que está realizando sobre Titán.

De estos sobrevuelos se ha identificado una gran variedad de características topográficas

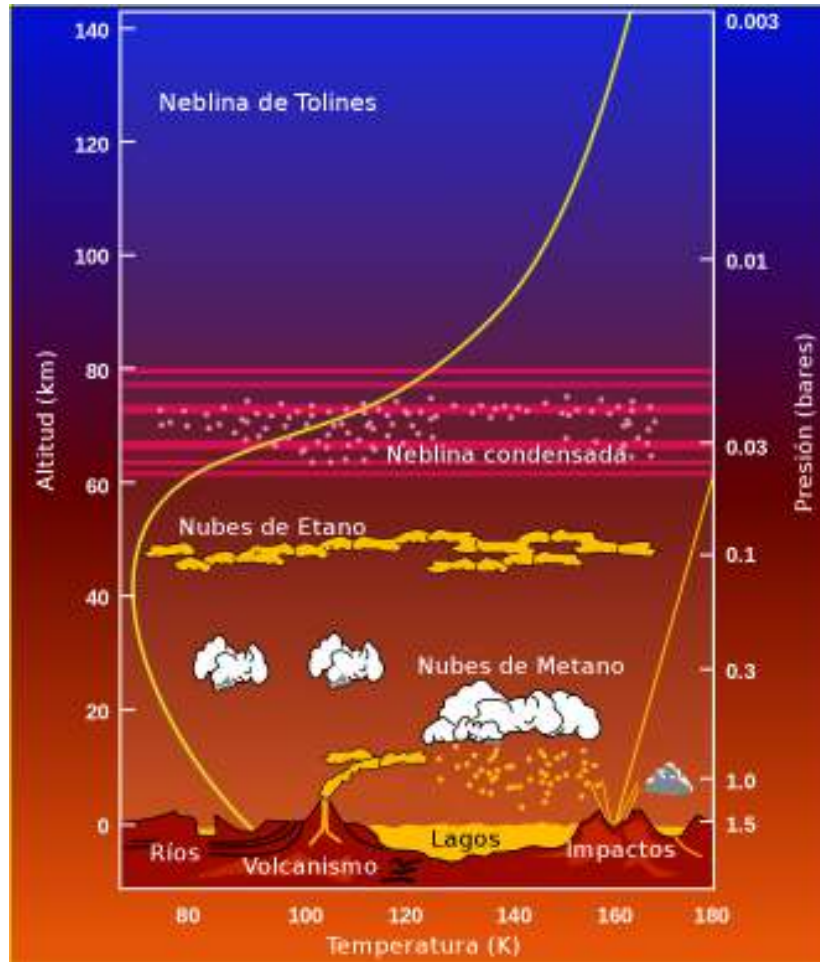


Figura 3.23: Esquema que ilustra la temperatura, presión y nivel de las nubes de la atmósfera de Titán (imagen adaptada de Lebreton y Matson, 2002).

(Figura 3.24) de las cuáles destacan amplias regiones (Regio) de terrenos brillantes y terrenos oscuros. Xanadu es una de estas regiones brillantes que tiene 3,400 km de diámetro y está ubicada en el hemisferio delantero de Titán. Las imágenes de radar tomadas por *Cassini* han revelado que Xanadu se compone de dunas, colinas, ríos y valles. Otra característica interesante son los cráteres de impacto, donde las observaciones de radar y las imágenes obtenidas por *Cassini* han revelado pocos cráteres de impacto en la superficie de Titán, lo que sugiere que la superficie es relativamente joven (Soderblom et al., 2009).

3.3. Clasificación de los satélites por grupos orbitales

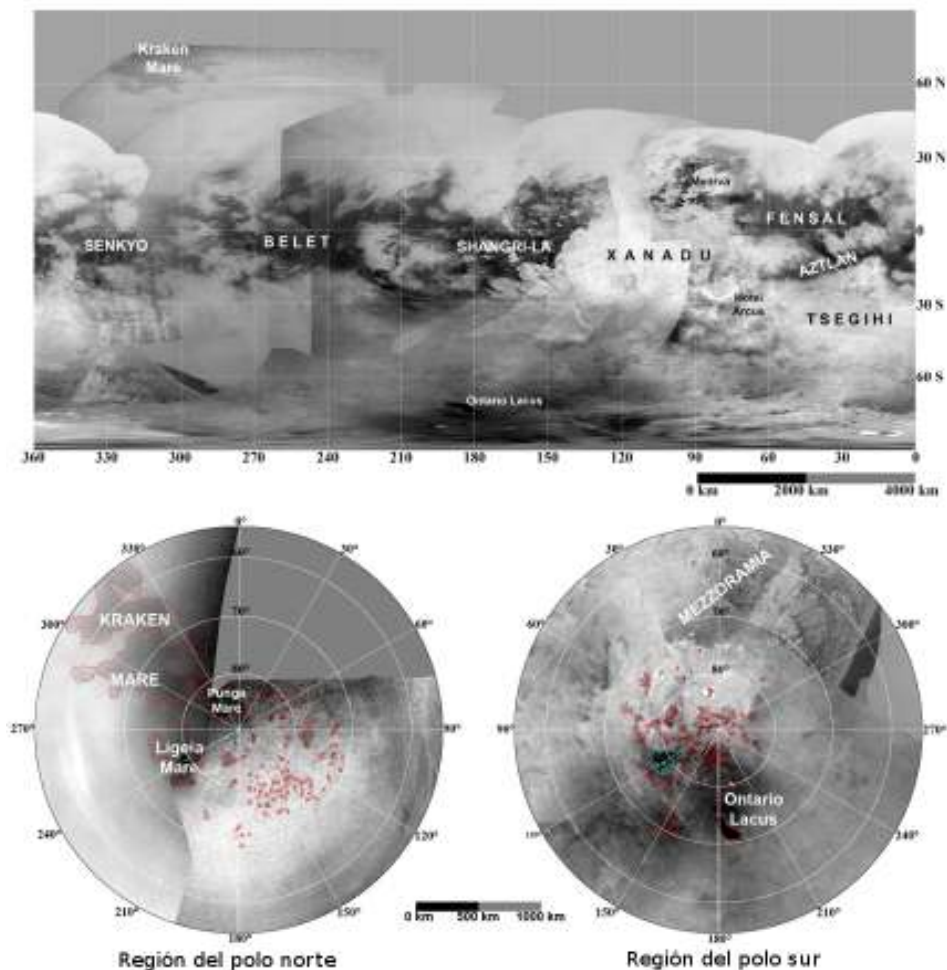


Figura 3.24: Mapa topográfico de Titán obtenido con el ISS de *Cassini* en 2009. Se muestra parte de la nomenclatura identificada y las regiones polares norte y sur (imagen tomada de <http://ciclops.org/>).

Algunos cráteres de impacto observados por el instrumento ISS de *Cassini* son: el cráter Menrva de 440 km de diámetro, y los cráteres Sinlap y Ksa de 60 km y 30 km de diámetro respectivamente. Una característica de los cráteres de impacto en Titán es que presentan bordes suaves, producto de la erosión por los vientos y líquidos fluviales del satélite (Jaumann et al., 2009).

Otro aspecto de la estructura topográfica de Titán, similar al terrestre, es la presencia de océanos (Mare), lagos (Lacus) y ríos (Flumen), mostrados en las regiones polares de la Figura 3.24. Estos depósitos de líquido están compuestos por hidrocarburos y no por agua, siendo los ingredientes principales el etano (75 %), el metano (10 %) y el propano (7 %), y en menores proporciones, el nitrógeno, el ácido cianhídrico, el butano y el argón.

Se ha especulado que las condiciones en Titán se parecen a las de una Tierra primitiva,

pero con temperaturas mucho más bajas. La detección de ^{40}Ar en la atmósfera en 2004, indicó que los volcanes han generado plumas de “lava”, formadas de agua y amoníaco. Los mapas de la distribución de lagos en la superficie de Titán revelaron que estos no albergan el metano superficial suficiente para dar cuenta de su presencia continua en la atmósfera, y por lo tanto, se cree que una parte importante debe ser añadida a través de los procesos volcánicos (Jaumann et al., 2009).

La sonda *Huygens* se planeó para que aterrizara en el hemisferio anti-Saturno de Titán, por debajo del ecuador y en la frontera entre un terreno brillante y uno oscuro (Shangri-la Regio). Utilizando la cámara de triple combinación (DIRS) a bordo de la sonda, se fotografió la superficie de Titán desde un ángulo cercano al nadir (8°), hasta un ángulo por encima del horizonte (96°), incluyendo fotografías del suelo de Titán (Figura 3.25).

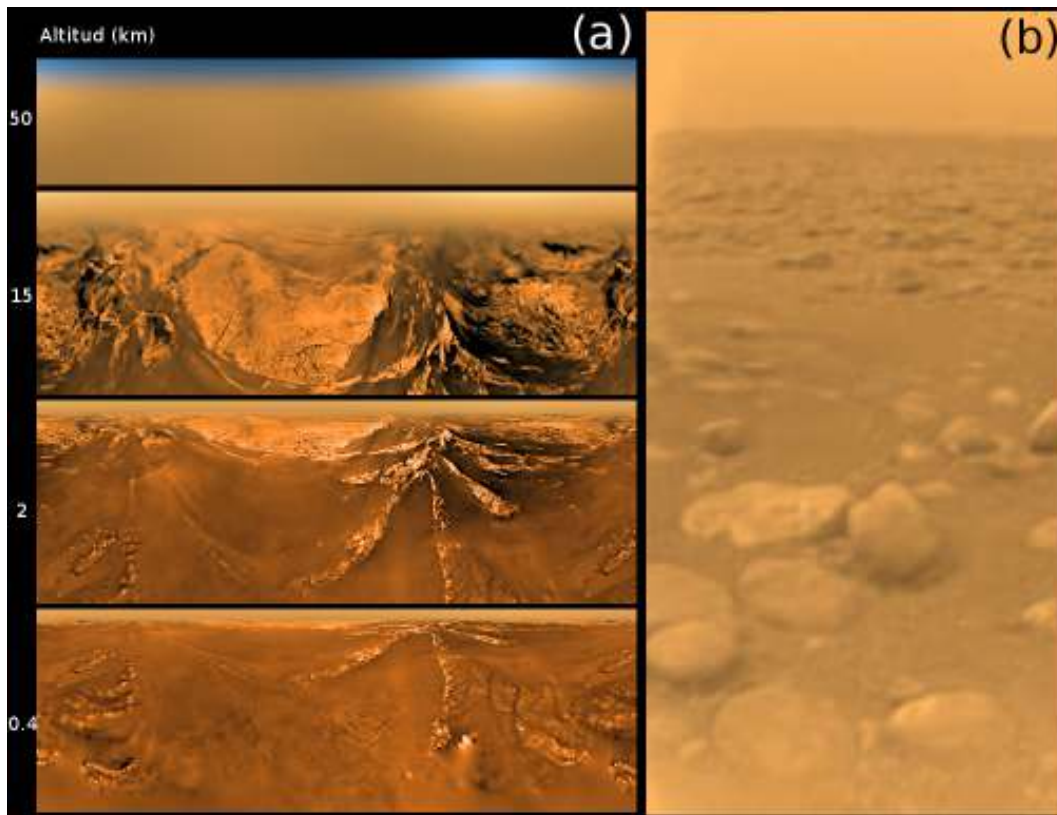


Figura 3.25: (a) Vista aérea de Titán en 4 diferentes altitudes capturada por la sonda *Huygens* en su descenso hacia la superficie. (b) Imagen del sitio donde “aterrizó” la sonda, en ella se observan formaciones rocosas redondeadas producto de la erosión por el transporte de un fluido. Las imágenes fueron obtenidas el 14 de enero de 2005 (imagen tomada de [NASA/JPL/ESA/UniversityofArizona](https://www.nasa.gov/jpl/esa/universityofarizona)).

Hiperión

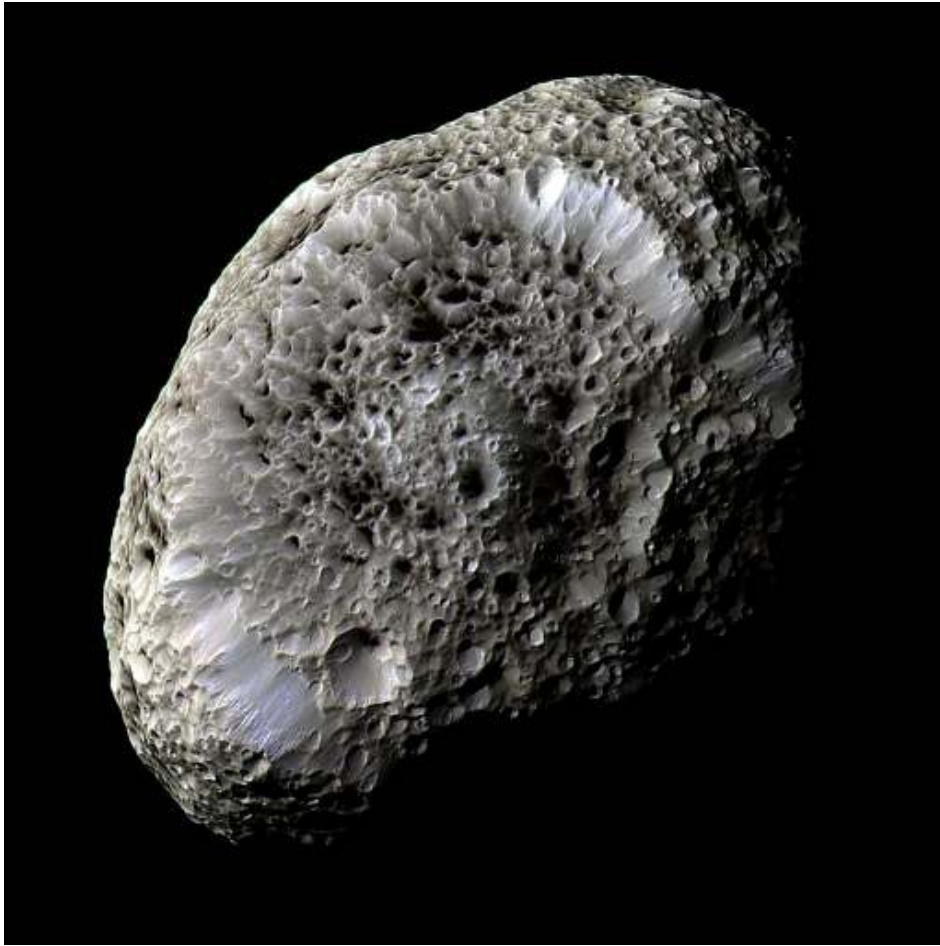


Figura 3.26: Imagen de Hiperión obtenida por *Cassini* el 26 de septiembre de 2005 a una distancia aproximada de 62,000 km de la superficie (imagen tomada de <http://ciclops.org/>).

Hiperión (Figura 3.26), fue descubierto el 16 de septiembre de 1848 por William Cranch Bond y su hijo George, y dos días después fue observado por William Lasell. Su nombre se deriva del titán Hiperión, hijo de Urano y de Gea, hermano mayor de Saturno, y dios de la vigilancia y la observación en la mitología griega (Blunck, 2010).

Hiperión orbita Saturno a una distancia de 1,500,000 km, tardando 21 días y 6 hrs en completar su órbita. Las imágenes obtenidas por el *Viajero 2* y los estudios de fotometría realizados en la Tierra, indican que la rotación de Hiperión es caótica, es decir, su eje de rotación se tambalea tanto que su orientación en el espacio es impredecible (Wisdom et al., 1984).

Hiperión es un cuerpo con forma irregular parecido al de una esponja de baño (Thomas et

al., 2007), siendo uno de los cuerpos con forma irregular más grandes en el sistema solar. Su forma puede aproximarse por las dimensiones de sus tres semiejes (Cuadro 3.1), siendo su diámetro medio de 270 km aproximadamente. Se piensa que esta forma irregular es resultado de la colisión con un asteroide. Los modelos evolutivos diseñados a la fecha predicen que Hiperión pudo haber sido un cuerpo con un diámetro entre 350 y 1,000 km.

La densidad calculada para Hiperión es de 0.542 g/cm^3 , este valor indica que Hiperión está constituido principalmente por hielo de agua con una fracción de roca muy pequeña, y se estima que tiene una estructura interna altamente porosa (46 %) (Thomas, 2010).

La superficie es de un color rojizo oscuro, de ahí que su albedo tenga un valor muy pequeño (0.3). Algunas teorías predicen que la capa de material oscuro en la superficie de Hiperión es polvo originado en la superficie del satélite Febe.

La superficie de Hiperión está cubierta por cráteres de impacto que en su interior contienen material oscuro (Figura 3.27). El cráter de mayores dimensiones es Helios con 140 km de diámetro. Otra característica topográfica en Hiperión es una cordillera montañosa (Dorsum) de 250 km de longitud llamada Bond-Lassell Dorsa.

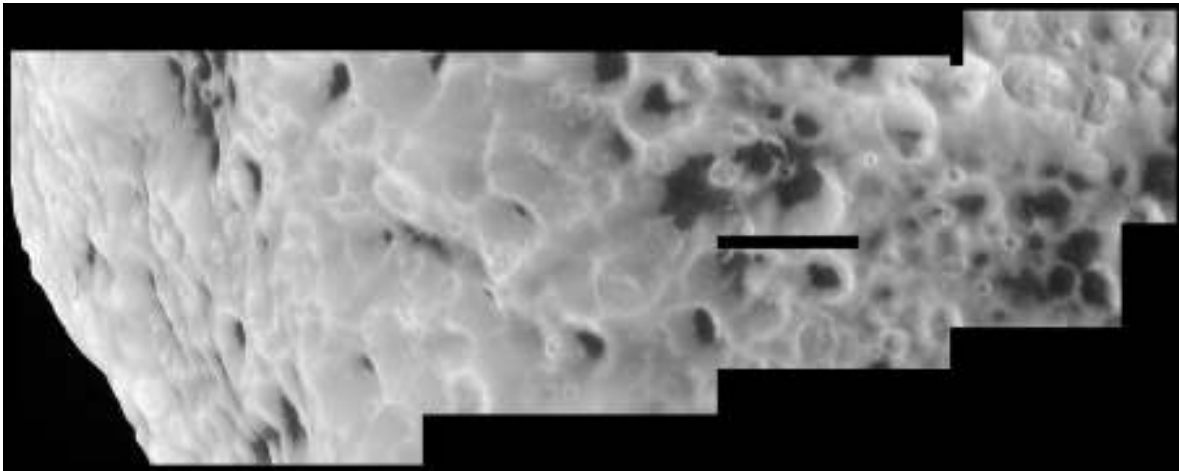


Figura 3.27: Imagen de Hiperión obtenida por *Cassini* el 26 de septiembre de 2005 a una distancia aproximada de 500 km de la superficie, (imagen tomada de <http://ciclops.org/>).

Japeto



Figura 3.28: Imagen en falso color del hemisferio delantero de Japeto obtenida por *Cassini* el 10 de septiembre de 2007 a una distancia aproximada de 73,000 km de la superficie (imagen tomada de <http://ciclops.org/>).

Su nombre se deriva del titán Jápeto, hermano de Kronos y padre de Atlas, Prometeo, Epimeteo y Menecio, (Blunck, 2010) (Figura 3.28). Fue descubierto por Giovanni Domenico Cassini el 25 de octubre de 1671, en el momento en el que se encontraba posicionado en el lado Oeste de Saturno. Giovanni Cassini continuó observando a Japeto tratando de localizarlo en el lado Este sin éxito alguno, hasta que en 1705 logró conseguirlo. Cassini supuso correctamente que Japeto tiene un hemisferio brillante y un hemisferio oscuro, y que tiene un acoplamiento de marea, el cual lo hace presentar siempre la misma cara hacia Saturno. Esto significa que el hemisferio brillante es visible desde la Tierra cuando Japeto está en el lado Oeste de Saturno, y que el hemisferio oscuro es visible cuando está en el lado Este. El hemisferio oscuro más tarde fue nombrado Cassini Regio en honor a este astrónomo (Harland,

2007).

Japeto orbita Saturno a una distancia de 3,556,000 km ($60 R_S$), tardando 79 días y 8 hrs en completar su órbita, y debido al acoplamiento de marea, se encuentra en rotación sincrónica con Saturno. Tiene la forma de un elipsoide achatado en los polos. Su densidad es de 1.08 g/cm^3 , por lo que se piensa que está primordialmente compuesto por hielo de agua con una pequeña fracción de roca (20 %). Los modelos de la estructura interna más aceptados indican que su interior podría ser homogéneo o parcialmente diferenciado (Castillo-Rogez et al., 2007).

En la superficie de Japeto se encuentran principalmente cuatro tipos de características geológicas: cráteres de impacto, montañas (Montes), regiones oscuras (Regio) y extensiones grandes de tierra (Terrae) (Figura 3.29).

Japeto está lleno de cráteres. Las imágenes de la superficie obtenidas por *Cassini* han revelado grandes cráteres de impacto, cinco de los cuales son de más de 350 km de diámetro. El más grande, Turgis, tiene un diámetro de 580 km y su borde es extremadamente empinado e incluye un escarpe de unos 15 km de altura.

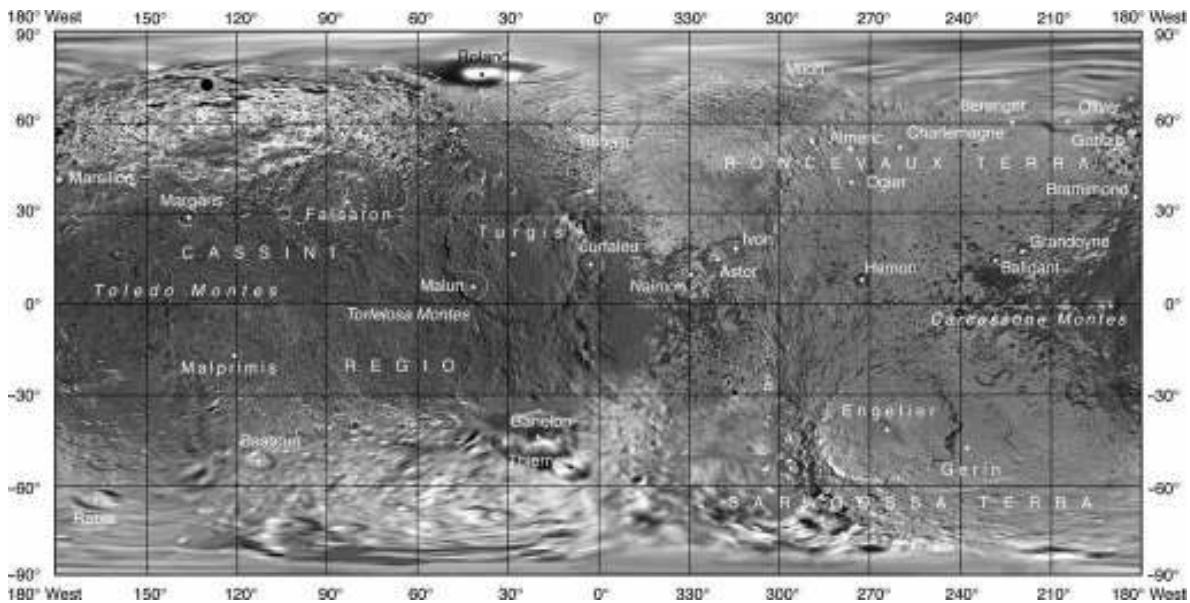


Figura 3.29: Mapa topográfico de Japeto con una escala de 0.8 km/píxel (imagen tomada de Roatsch et al., 2009).

Un misterio más de Japeto es la cordillera ecuatorial que recorre el centro de Cassini Regio, de 1,300 km de largo, 20 km de ancho y 13 km de altura. Fue descubierta cuando la nave *Cassini* fotografió Japeto el 31 de diciembre de 2004. Los picos de la cordillera se elevan más de 20 kilómetros sobre la llanura circundante, teniendo algunas de las montañas más

3.3. Clasificación de los satélites por grupos orbitales

altas del Sistema Solar (Figura 3.30). Existen varias hipótesis para explicar el origen de esta cordillera, dos proponen que esta estructura se formó o bien por el colapso gravitacional de un sistema de anillos presente durante la formación de Japeto (Ip, 2006), ó como remanente de la forma achatada de un Japeto joven, que se encontraba girando más rápido que en la actualidad (Castillo-Rogez et al., 2007).

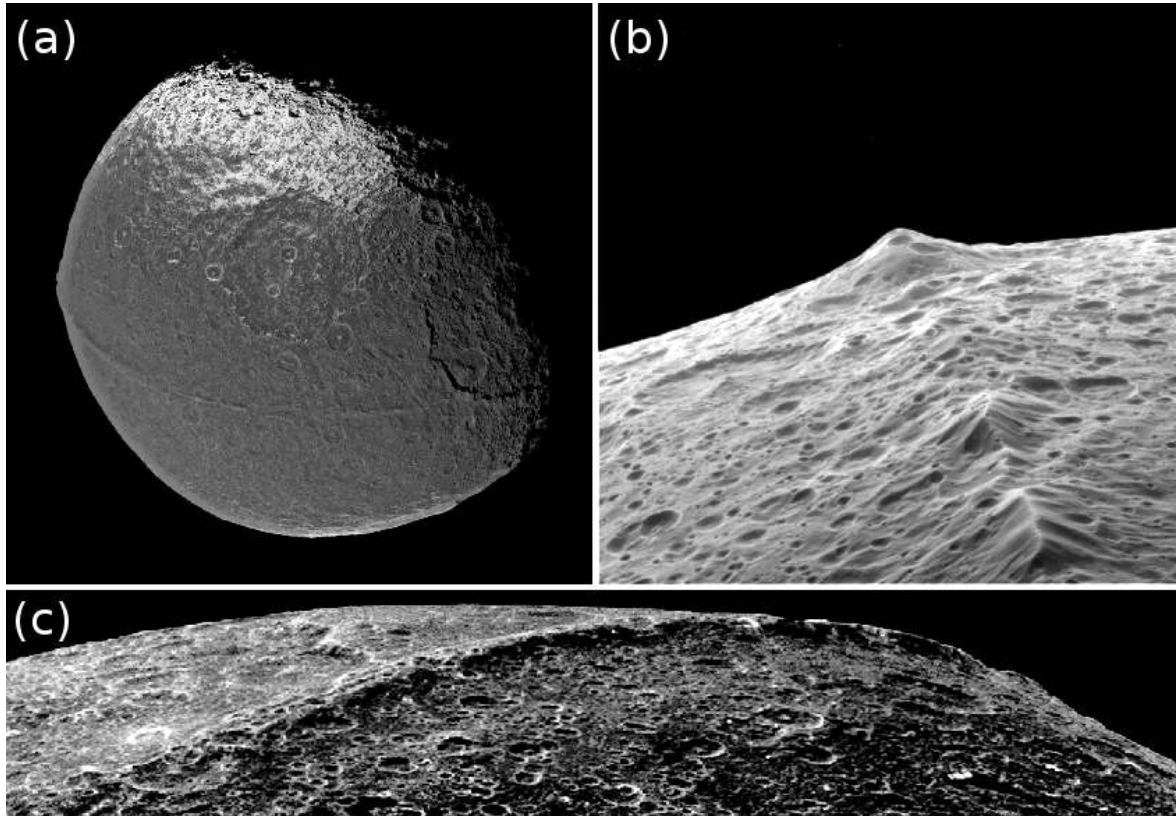


Figura 3.30: Mosaico de imágenes de la cordillera ecuatorial de Japeto obtenidas por *Cassini*. (a) Vista del polo norte capturada el 12 de noviembre de 2005. (b) Acercamiento a la cordillera ecuatorial, capturada en septiembre de 2007. (c) Vista panorámica capturada el 10 de septiembre de 2007 (imagen tomada de <http://ciclops.org/>).

Llama la atención la diferencia de coloración de los dos hemisferios de Japeto (Figura 3.28). El hemisferio delantero tiene un color rojizo oscuro con un albedo entre 0.03 y 0.05, mientras que el hemisferio trasero y los polos son regiones brillantes con un albedo entre 0.5 y 0.6. La región oscura tiene el nombre de Cassini Regio, y la región brillante está dividida en dos, la región del ecuador hacia el norte tiene el nombre de Roncevaux Terra y la región del ecuador al Sur se le llama Saragossa Terra.

Actualmente existen diversas teorías que explican la asimetría en el color de los hemisferios, una de ellas postula que el hemisferio trasero de Japeto es más brillante debido al

recubrimiento de la superficie por el polvo contenido en el anillo E (Mendis y Axford, 2008). Otra teoría sostiene que la diferencia de color en los hemisferios es ocasionada por la migración térmica del hielo de agua en la superficie, provocada por la deposición de material oscuro en el hemisferio delantero (Spencer y Denk, 2010).

Febe



Figura 3.31: Imagen de Febe obtenida por *Cassini* el 23 de junio de 2004 a una distancia de entre 12,422 km y 15,974 km de la superficie (imagen tomada de <http://ciclops.org/>).

Febe (Figura 3.31), fue descubierto por William Henry Pickering el 17 de marzo de 1899 a partir de las placas fotográficas tomadas el 16 de agosto 1898 en el observatorio de Boyden cerca de Arequipa, Perú, por DeLisle Stewart, convirtiéndose en el primer satélite en ser descubierto fotográficamente. Lleva el nombre de Febe, “la de la corona de oro”, titánide, hija de Urano y de Gea, hermana de Kronos en la mitología griega (Blunck, 2010).

Febe es clasificada dentro de los satélites irregulares de Saturno (ver sección anterior). Este grupo está compuesto por cuerpos capturados gravitacionalmente, y se caracterizan por

3.3. Clasificación de los satélites por grupos orbitales

tener en su mayoría movimientos orbitales retrógrados. Los estudios recientes indican que Febe es considerado un *Centauro*, es decir, uno de los muchos planetoides helados del cinturón de Kuiper que giran alrededor del Sol entre Júpiter y Neptuno (Johnson y Lunine, 2005).

Este satélite orbita Saturno a una distancia aproximada de 13 millones de kilómetros (215 R_S), con movimiento orbital retrógrado y una inclinación de 173° respecto al plano ecuatorial de Saturno. Rota sobre su eje cada nueve horas y completa una órbita alrededor de Saturno en aproximadamente 18 meses (Cuadro 3.1).

Se cree que en el pasado Febe no sólo era más caliente sino también era un cuerpo esférico con un interior diferenciado, sin embargo estas características se han perdido y actualmente es un cuerpo irregular con un diámetro promedio de 213 km y no se encuentra en equilibrio hidrostático (Figura 3.32).

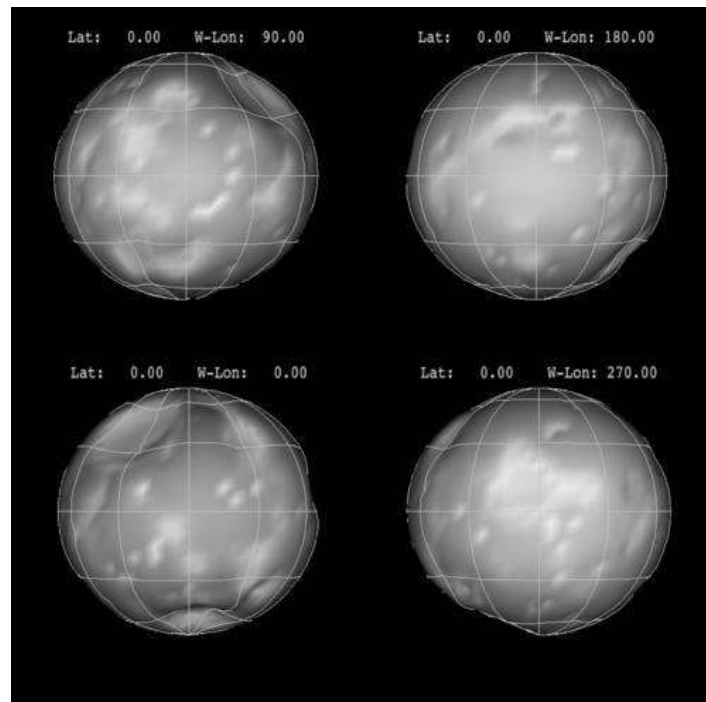


Figura 3.32: Grupo de imágenes mostrando la antigua forma esférica de Febe, las imágenes fueron capturadas por el instrumento ISS y procesadas por Equipo de Imágenes de *Cassini*. Cada imagen representa un giro de 90° (imagen tomada de <http://ciclops.org/>).

Tiene una densidad aproximada de 1.6 g/cm^3 , lo cual indica que está compuesto por hielo de agua con una fracción de roca de entre el 50 % y el 70 % y una porosidad de ~ 15 %. Las mediciones espectrales realizadas por *Cassini* muestran que la superficie está compuesta por una mezcla de materiales que le dan el tono rojizo oscuro, y que determinan su falta de brillo (albedo 0.08). Esta mezcla de materiales es una combinación de agua, dióxido de carbono,

carbono amorfo, minerales óxidos y algunos compuestos orgánicos.

Las imágenes de la superficie de Febe indican que los cráteres de impacto tienen una variación considerable en su brillo, por lo que se cree que la capa de material oscuro, que tiene un grosor entre 300 y 500 m, es una capa muy fina sobre la estructura interior de hielo de agua (Johnson y Lunine, 2005).

En la superficie de Febe se encuentran principalmente dos tipos de características geológicas: 24 cráteres de impacto tienen nomenclatura oficial, siendo Jason el cráter de diámetro mayor (101 km), (figura 3.34), y una amplia región geográfica llamada Leto Regio (Figura 3.33).

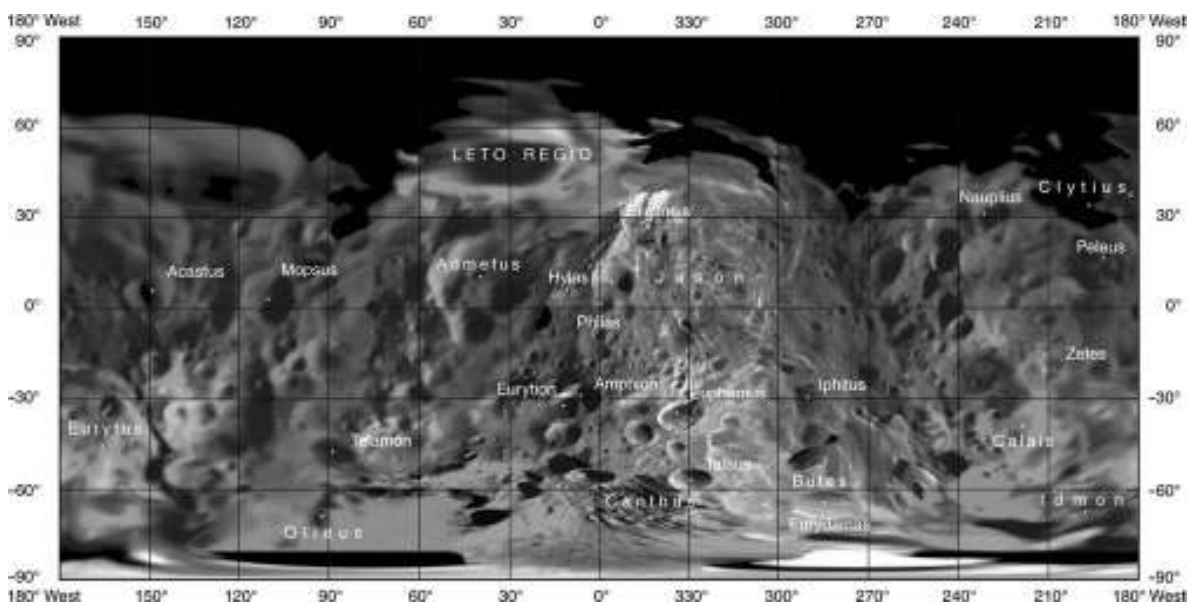


Figura 3.33: Mapa topográfico de Febe con una escala de 0.23 km/píxel (imagen tomada de Roatsch et al., 2009).

El 6 de octubre de 2009 se anunció el hallazgo de un disco tenue de material en el plano orbital de Febe, que se extiende desde los 128 R_S hasta los 207 R_S con un espesor máximo de 40 R_S . Debido a sus características, esta estructura sería el anillo más alejado de los anillos de Saturno. El material observado en el anillo es polvo compuesto de partículas con 10 μm de diámetro aproximadamente, conteniendo una masa de $\sim 3 \times 10^{11}$ kg. Se presume que las partículas que forman el anillo son originadas por el impacto de micrometeoritos en la superficie de Febe, ya que comparten la composición superficial y el movimiento orbital retrógrado (Verbiscer et al., 2009).

El material expulsado de la superficie de Febe por impactos de meteoritos microscópicos puede ser responsable de la superficie oscura de Hiperión y de la coloración en el hemisferio

3.3. Clasificación de los satélites por grupos orbitales

delantero de Japeto (Denk et al., 2010).

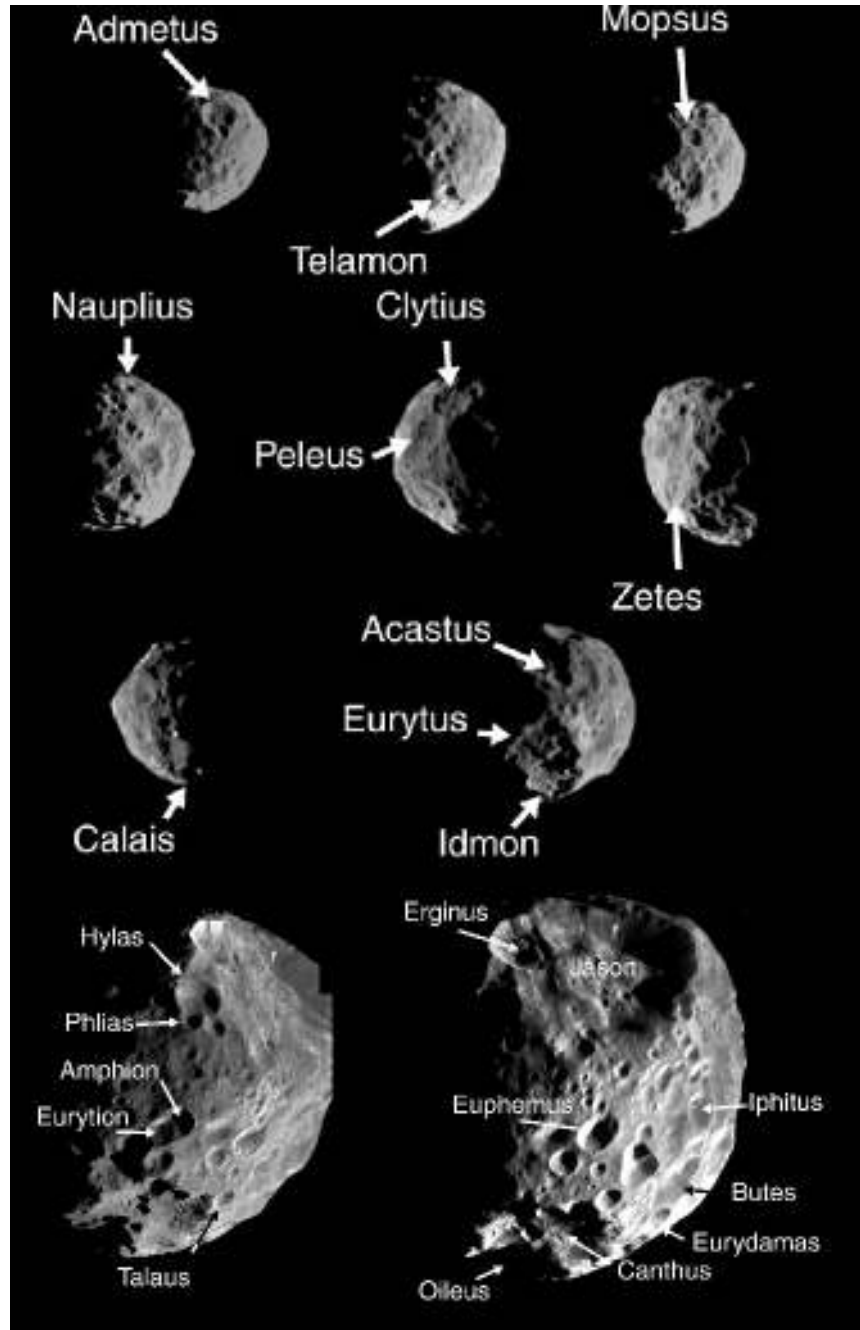


Figura 3.34: Imágenes de Febe que señalan la ubicación de los 24 cráteres de impacto nombrados por la IAU. Las imágenes fueron capturadas por *Cassini* en junio de 2004 (imagen tomada de <http://ciclops.org/>).

Capítulo 4

Anillos

4.1. Encuentro con los anillos

El nacimiento de la era espacial en 1957 tuvo un gran impacto en el estudio de los anillos planetarios. Por primera vez, los anillos de los planetas gigantes pudieron ser observados in situ, incluyendo datos e imágenes imposibles de obtener con telescopios en tierra. Una de las ventajas de la ubicación de estas naves es que el tamaño de las partículas que componen los anillos puede medirse analizando la dispersión de la luz solar por ellas: las partículas más grandes reflejan la luz solar, mientras que las pequeñas se hacen visibles desde una posición opuesta al Sol.

La primera nave espacial en visitar Saturno fue el *Pionero 11*, y alcanzó su máxima aproximación al planeta el 1 de septiembre de 1979. Desafortunadamente, el *Pionero 11* no contaba con una cámara fotográfica a bordo, pero sí con un fotopolarímetro de imágenes (IPP), que fue utilizado para obtener las primeras imágenes de Saturno y su sistema de anillos.

A pesar de la capacidad limitada de los instrumentos a bordo del *Pionero 11*, se realizaron grandes descubrimientos entre los que destacan los anillos F y G de Saturno. Con el IPP sólo se pudo detectar la parte más densa del anillo F, sin embargo, los datos obtenidos y analizados posteriormente mostraron que el anillo F tenía el doble de tamaño de lo observado. Además de los anillos F y G, el *Pionero 11* confirmó la existencia del anillo E, cuya predicción se había realizado años atrás (1967) (Figura 4.1).

Fuera del sistema principal de anillos, el *Pionero 11* detectó un anillo muy tenue, conocido actualmente como el anillo G. Por sí mismo, el IPP no fue capaz de detectar esta estructura, pero con el uso de otros instrumentos se confirmó la existencia del anillo.

Cuatro años después del lanzamiento del *Pionero 11*, se lanzaron las naves *Viajero 1* y *2*, y a diferencia de su predecesor, estas naves contaban con mejor instrumentación a bordo. Juntas, las naves *Viajero* descubrieron muchas características nuevas del sistema de anillos de

4.1. Encuentro con los anillos

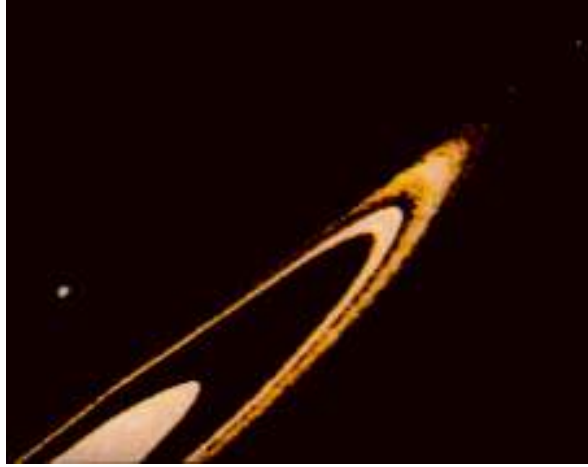


Figura 4.1: Imagen de los anillos de Saturno obtenida por el *Pionero 11* el 1 de septiembre de 1979. Los anillos se fotografiaron a una distancia de 941,000 km, aquí se puede observar el anillo F, descubierto a través de las observaciones realizadas por esta nave (<http://www.jpl.nasa.gov/>).

Saturno, entre las cuales figura el anillo D, que se extiende desde el borde interno del anillo C hasta el límite con la atmósfera de Saturno (Figura 4.2).

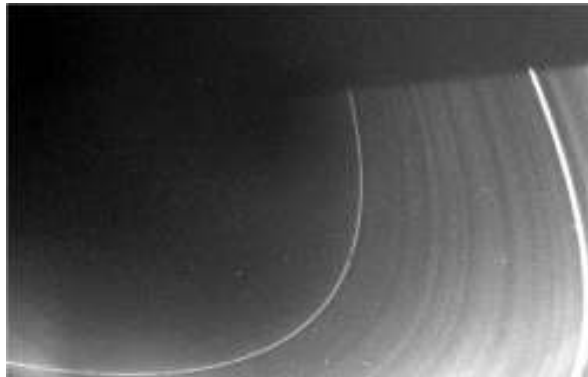


Figura 4.2: Imagen de los anillos obtenida por el *Viajero 2* el 25 de agosto de 1981, a una distancia de 195,400 km. En la imagen se puede observar la sombra proyectada de Saturno sobre los anillos. El anillo D se muestra como una estructura muy tenue (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/pia01388>).

El *Viajero 1* descubrió una estructura con forma de trenza en el anillo F. Se piensa que esta estructura enredada es producida por la interacción gravitacional entre el material que compone el anillo y los satélites pastores Prometeo y Pandora (Figura 4.3) (Miner et al., 2007).

Otro descubrimiento realizado con las naves *Viajero* fueron unas estructuras oscuras con forma radial (spokes) en el anillo B. Estas estructuras, compuestas por partículas micrométricas, posiblemente originadas de la colisión de micrometeoritos con material del anillo, giran



Figura 4.3: Imagen del anillo F obtenida por el *Viajero 1* a una distancia de 750,000 km. En la imagen se puede observar una estructura compleja en forma de trenza compuesta por dos anillos estrechos y brillantes que parecen trazar órbitas distintas, también se observan nudos que parecen ser el agrupamiento de material del anillo mismo, o bien, pequeñas lunetas (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/pia02283>).

alrededor del planeta con aproximadamente la misma velocidad que el campo magnético de Saturno, implicando que las partículas que forman estos “rayos” están cargadas eléctricamente (Figura 4.4).

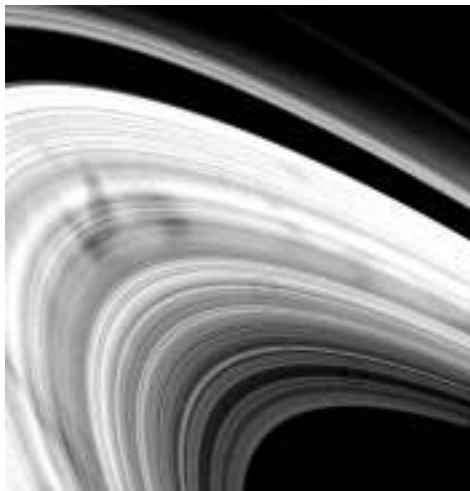


Figura 4.4: Imagen de los anillos obtenida por el *Viajero 2* a una distancia de 4,000,000 km. Se pueden observar las estructuras oscuras con forma de rayo (spokes) en el anillo B (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/pia02275>).

4.2. Sistema de anillos de Saturno

Al finalizar el encuentro de las naves *Viajero* con Saturno, el sistema de anillos de éste estaba más o menos definido, ya que con cierta precisión se conoció el número de anillos, su composición, su grosor y su estructura radial. Sin embargo, quedó una enorme lista de preguntas sin responder, y cuyas respuestas, tuvieron que esperar al análisis de los datos generados por las observaciones de las naves *Pionero* y los *Viajeros* a través de los años, y a la espera de una nave que permaneciera más tiempo orbitando al planeta.

Como se mencionó en los capítulos anteriores, la misión *Cassini-Huygens* se encuentra en la actualidad orbitando a Saturno. Desde su inserción orbital en 2004, el orbitador *Cassini* junto con la sonda de descenso *Huygens* nos han proporcionado imágenes y datos de alta resolución del planeta, sus satélites y su sistema de anillos. Los instrumentos que equipan la nave están diseñados para realizar observaciones en diversas longitudes de onda (extremo ultravioleta hasta infrarojo cercano), y bajo diferentes ángulos de visión. Las observaciones realizadas por los instrumentos de *Cassini* han permitido obtener una imagen más completa de la estructura, la composición, la temperatura, el tamaño y la forma de Saturno en general, y del material que compone los anillos en particular.

En las siguientes secciones se presentan algunas características principales del sistema de anillos de Saturno, a partir de la información obtenida por las naves antes mencionadas en los últimos 33 años, destacando las imágenes y los datos recabados recientemente por la misión *Cassini-Huygens*.

4.2. Sistema de anillos de Saturno

4.2.1. Composición, tamaño y forma de las partículas en los anillos

Los anillos de Saturno constituyen la estructura anular más grande y brillante de los sistemas de anillos en los cuatro planetas gigantes del sistema solar, y se estima que la masa contenida en ellos es de aproximadamente 3×10^{19} kg, similar a la masa del satélite Mimas (Esposito, 2006). Este sistema de anillos es una estructura altamente compleja, ya que el material que los compone está integrado por partículas que varían en tamaños que van de las micras (partículas de polvo) hasta las decenas de kilómetros de diámetro, como es el caso de las lunetas. Se ha observado que la distribución de partículas cuyos tamaños varían de centímetros hasta metros de diámetro puede ajustarse por una ley de potencias expresada como:

$$n(r) = n_0 r^{-q}, \quad \text{para } r_{min} < r < r_{max}, \quad (4.1)$$

donde n_0 es una constante, y r_{min} y r_{max} corresponden a los radios de las partículas más pequeñas y más grandes en la distribución. Los valores típicos para la potencia q son alrededor de 3, valor característico de cuerpos en el cinturón de asteroides y de una distribución de objetos fragmentados creada en los laboratorios (Cuzzi et al., 1984).

Las observaciones realizadas por las naves que han visitado Saturno han mostrado que las partículas que pueblan los anillos son muy numerosas y diferentes a los modelos de partículas esféricas y de tamaño uniforme que inicialmente se utilizaron para describir a los cuerpos que forman los anillos planetarios. Por el contrario, la forma y el tamaño de estos fragmentos es muy variado y en constante cambio debido a las colisiones que ocurren entre ellos. Como resultado de dichas colisiones, las partículas se desintegran en fragmentos de menor tamaño o crecen como producto de la atracción gravitacional o adherencia entre ellas, formando cuerpos agregados que se asemejan a pilas de escombros, llamados *cuerpos dinámicos efímeros* (DEB's) (Figura 4.5(a)).

En los anillos de Saturno el tiempo de acreción para fragmentos de metros de diámetro es de semanas, siendo propensos a desintegrarse por efecto de las colisiones con otras partículas (Weidenschilling et al., 1984) y por fuerzas de marea, ya que éstas se encuentran localizadas dentro del límite de Roche del planeta. El límite de Roche es la distancia mínima a la cual un cuerpo que orbita otro cuerpo de mayor masa, mantiene su estructura sin desintegrarse como producto de las fuerzas de marea producidas por el objeto mayor. Édouard Roche, fue el primero en calcular esta distancia cuya expresión es la siguiente:

$$d = 2.456 R \left(\frac{\rho_p}{\rho} \right)^{1/3}, \quad (4.2)$$

donde R y ρ_p corresponden al radio y densidad del planeta (cuerpo mayor), y ρ es la densidad del cuerpo que se encuentra orbitando. Por lo tanto, el límite de Roche depende principalmente de dos factores: de la aceleración gravitacional del planeta y de la estructura y composición del satélite o cuerpo que se encuentre orbitándolo. En Saturno, el límite de Roche para cuerpos cuya densidad es $\sim 1 \text{ g/cm}^3$ es de 147,000 km (2.44 R_S) aproximadamente.

Adicionalmente a las observaciones, mediante simulaciones numéricas se ha representado la distribución del material que forma los anillos (figura 4.5(b)). En estas simulaciones las partículas más pequeñas contienen del 2 al 20 % de la energía cinética de las partículas más grandes, y como consecuencia, las de mayor tamaño y de mayor masa, se confinan en una región muy delgada en el plano ecuatorial de Saturno, mientras que las partículas más pequeñas se distribuyen en altitudes mayores a este plano (Salo, 2001).

Debido a que no ha sido posible obtener una muestra del material que compone los ani-

4.2. Sistema de anillos de Saturno

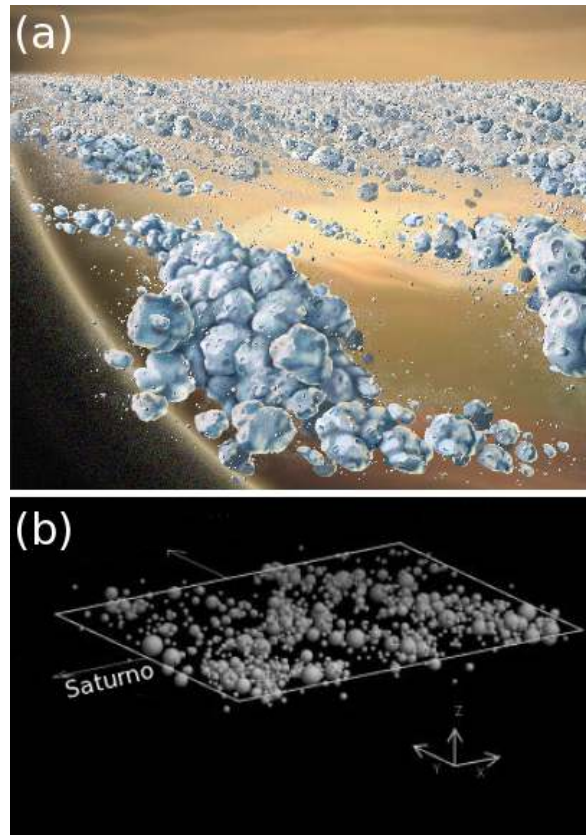


Figura 4.5: (a) Imagen artística que muestra el concepto de los cuerpos dinámicos y efímeros propuestos por (Weidenschilling et al., 1984) (tomada de <http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA10081>). (b) Imagen que muestra la simulación numérica local de la distribución de las partículas en los anillos, en este modelo se puede observar la aglomeración del material formando pilas de escombros (tomada de Salo, 2001).

llos, las naves han tomado mediciones que permiten inferir indirectamente su composición química, tales como el espectro y el color. Como resultado de estas mediciones, se estima que la composición de las partículas que forman los anillos es, en general, similar a la composición del material de la superficie de los satélites circundantes.

En Saturno, los anillos están compuestos principalmente por hielo de agua en estado muy puro y cristalino, sin embargo, las variaciones de color en los anillos indican que en algunas regiones el hielo se encuentra contaminado por otros materiales (Figura 4.6). Se piensa que el oscurecimiento del hielo podría estar relacionado con varios fenómenos, entre los cuales destacan: el bombardeo por el polvo interplanetario y la oxidación de las partículas producto de la interacción con gases que componen la atmósfera de los anillos (principalmente oxígeno molecular) (Cuzzi et al., 2009). Además, se ha observado que la superficie de las partículas que forman los anillos es rugosa y con densidades menores a la del hielo ($\rho < 1 \text{ g/cm}^3$), apoyando la hipótesis de las pilas de escombros mencionadas anteriormente (Esposito, 2006).

Las investigaciones recientes sugieren que el material oscuro que contamina el hielo de agua puede estar compuesto por algunos óxidos de hierro, como la hematita o la nanohe-
matita, o por ciertos hidrocarburos (Clark et al., 2010; Esposito, 2010). En estos estudios se
menciona también que, contrario a lo que se esperaba, la presencia de silicatos en la compo-
sición del material que compone los anillos es muy pobre o no existe, de tal forma que no es
posible determinar si las partículas se encuentran diferenciadas con núcleos más densos en
su interior.

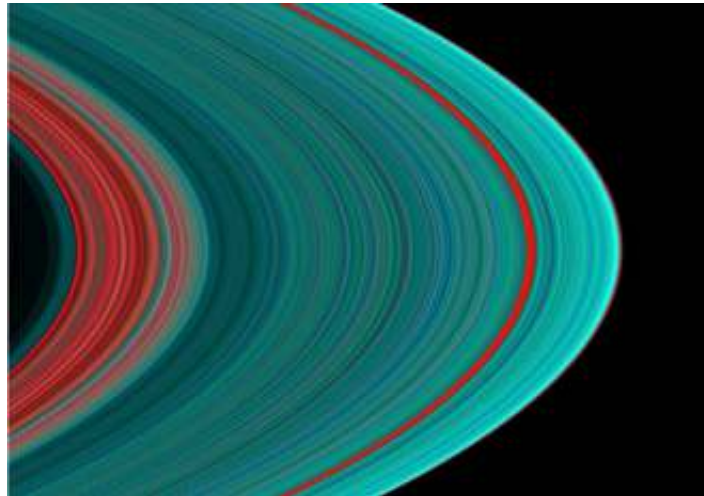


Figura 4.6: Imagen de los anillos principales en el espectro ultravioleta, obtenida por el instrumento UVIS de *Cassini* durante la inserción orbital de la nave el 30 de junio del 2004. En esta imagen se muestra la diferencia de color entre los anillos A y B (color turquesa) y el anillo C y la División de Cassini (color rojo), indicando que el material en el anillo C y la División de Cassini se encuentra más contaminado (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA05075>).

4.2.2. Estructuras en los anillos

Las estructuras más comunes en los anillos son ondas de densidad inducidas por el efecto gravitacional de los satélites cercanos. La mayoría de estas ondas son producidas por las resonancias en el movimiento orbital del material que compone los anillos y el de los satélites. Las más frecuentes son resonancias de Lindblad, llamadas así por el astrónomo Bertil Lindblad, y se producen cuando dos cuerpos tienen períodos de traslación cuya razón es una fracción de números enteros. Estas resonancias impulsan ondas longitudinales (density waves) y transversales (bending waves) en los anillos, y fueron utilizadas por primera vez para describir el movimiento espiral de las galaxias (Lin y Shu, 1964), y posteriormente aplicadas a los anillos planetarios (Goldreich y Tremaine, 1980).

4.2. Sistema de anillos de Saturno

Las resonancias amplifican la perturbación gravitacional del satélite produciendo efectos macroscópicos en los anillos. En particular, las interacciones colectivas entre las partículas de los anillos, debido a las colisiones o a la autogravedad, resultan en ondas espirales de decenas de kilómetros en dirección radial o transversal, lo que ha facilitado su detección por parte de las naves *Viajero* y *Cassini*. Las ondas transversales son arrugas en los anillos producidas por las resonancias con satélites cuyas órbitas se encuentran inclinadas respecto al plano de los anillos. En la Figura 4.7 se muestra un esquema que ilustra la forma que tomarían estas estructuras en un sistema de anillos planetarios.

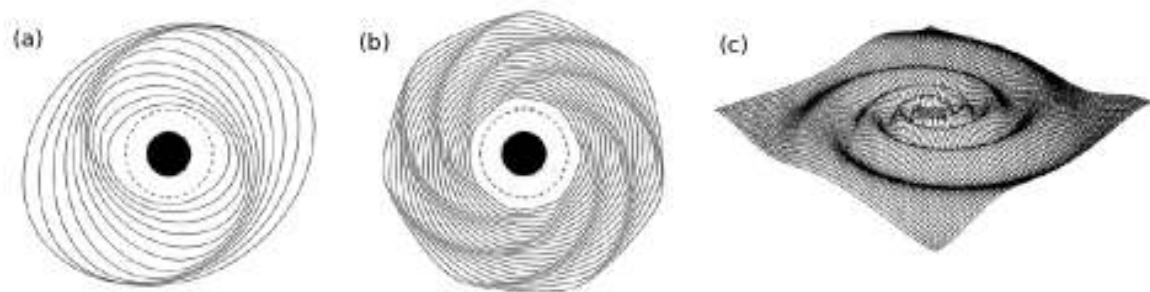


Figura 4.7: En esta imagen se muestra un esquema de las ondas espirales en los anillos producidas por las resonancias de Lindblad 2:1 (a) y 7:6 (b). En (c) se ilustra la forma que tomaría el material en los anillos cuando el satélite que induce la onda se encuentra fuera del plano ecuatorial del planeta, produciendo una onda transversal (imágenes tomadas y adaptadas de Murray y Dermott, 1999).

Adicionalmente a las ondas longitudinales y transversales, los satélites pueden crear bordes afilados y abrir brechas en los anillos. El mecanismo mediante el cual se forman estas estructuras es llamado *pastoreo*, y ocurre cuando las partículas en los anillos son perturbadas modificando la excentricidad de la órbita debido a la interacción con los satélites cercanos. La gravedad de estos satélites pastores mantiene un borde bien definido en los anillos, y donde el material que va a la deriva y se encuentra cercano a la órbita del satélite, es desviado hacia el cuerpo del anillo, o bien, es acretao por el propio satélite. Otro fenómeno observado es cuando los satélites pastores provocan un patrón ondulatorio alternante de regiones de mayor y menor densidad en los anillos, que permanece estacionario desde el sistema de referencia del satélite, y es conocido como estelas (wakes). En la Figura 4.8 se observa un ejemplo de varias de estas estructuras en la brecha de Encke y brecha de Keeler, situadas en el interior del anillo A.

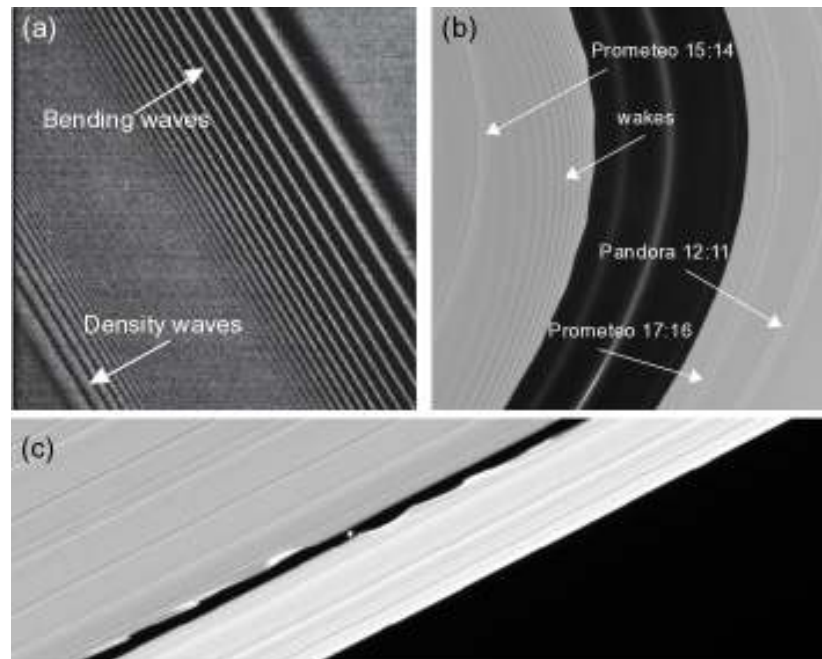


Figura 4.8: En esta imagen se muestran diversos fenómenos ondulatorios en el anillo A. (a) Ondas de densidad en el interior de la división de Encke. (b) Diversos fenómenos ondulatorios en la división de Encke inducidos por resonancias con los satélites Pan, Prometeo y Pandora. (c) Bordes ondulados en la brecha de Keeler generados por la interacción con la luneta Dafne (en la imagen) (imágenes tomadas y adaptadas de <http://photojournal.jpl.nasa.gov>).

4.2.3. Edad y evolución de los anillos

Determinar la edad y describir la evolución de los anillos planetarios en general, y del sistema de anillos de Saturno en particular, son cuestiones que aún se encuentran sin resolver. Existen diversas teorías que proponen el mecanismo mediante el cual se dio origen a los anillos planetarios, y de estas teorías, los modelos más destacados son aquellos que postulan que el origen del sistema de anillos se debió a: (a) los remanentes de la nebulosa solar (disco protoplanetario), (b) los escombros de la destrucción de un satélite y (c) los restos de la fragmentación de un cometa.

Algunos cálculos realizados para determinar la edad del anillo A de Saturno, afirman que si se toma en consideración la distribución del material en el anillo mediante las colisiones de las partículas, y el oscurecimiento del material por bombardeo de meteoroides, la edad atribuida al anillo A sería mucho menor a la edad del sistema solar (Cuzzi et al., 2009). Por lo tanto, una posible solución al enigma del origen de los anillos es que el material que los forma sea renovado constantemente, y por lo mismo, el material primordial en los anillos tendría que reciclarse cada cierto tiempo. Una implicación directa de esta teoría es que, la

4.3. Clasificación y características de los anillos de Saturno

masa de los anillos de Saturno sugerida por los datos de las naves *Viajero*, que es similar a la masa del satélite Mimas, tendría que ser mucho mayor al valor establecido actualmente.

Como un ejemplo de estos modelos, se estima que, si los anillos fueron creados por la destrucción de un satélite pequeño durante el periodo del bombardeo pesado tardío (LHB), el reciclaje del material sería estrictamente necesario para que los anillos pudieran sobrevivir hasta hoy.

4.3. Clasificación y características de los anillos de Saturno

Los anillos de Saturno parecen estar constituidos por miles de estrechos anilletes individuales. Sin embargo, son una hoja muy amplia y continua de escombros con una docena de brechas dentro de ellos, de tal forma que los cambios en la transparencia dan el aspecto de anilletes separados entre sí. No obstante, algunas regiones en los anillos tienen características distintas, por lo que han adquirido nombres diferentes. Actualmente hay siete anillos oficialmente identificados que varían considerablemente en extensión, densidad, composición, y otras características. En Saturno los anillos se pueden clasificar en dos grupos: Los anillos principales o densos, compuestos por rocas y polvo, y los anillos tenues cuya composición es únicamente polvo.

4.3.1. Anillos principales o densos

Dentro de los anillos densos se encuentran los anillos A, B, C, la división de Cassini (DC) y el anillo F. La característica principal en estos anillos es que las partículas que los forman tienen tamaños mayores a 1 cm y la profundidad óptica observada es mayor a 0.1, (Figura 4.9). Algunas características físicas de estos anillos se muestran en el Cuadro 4.1.

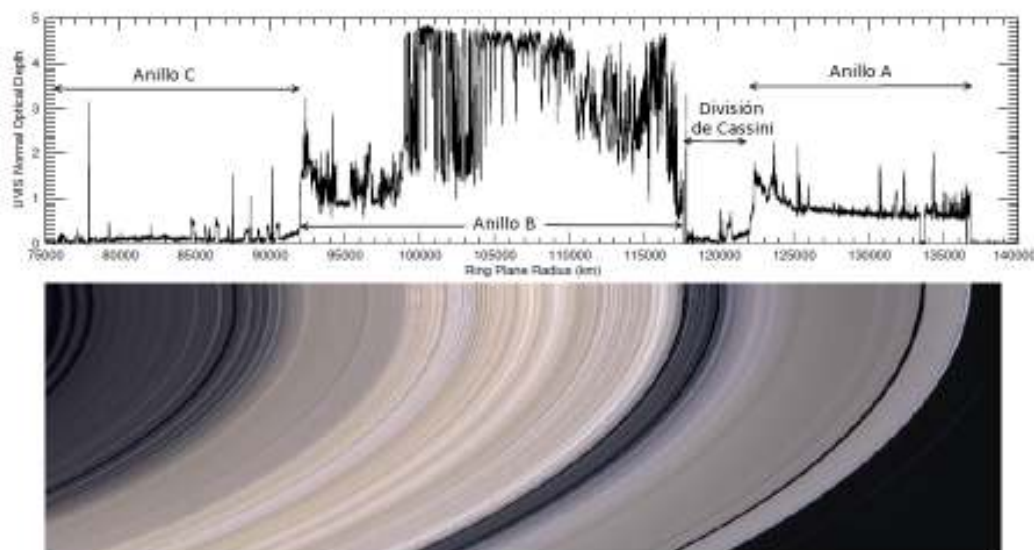


Figura 4.9: En esta figura se muestra una gráfica de la profundidad óptica y una imagen de los anillos principales, obtenida por los instrumentos UVIS e ISS de Cassini respectivamente. En la imagen se observan los anillos A, B y C, así como la división de Cassini. A la derecha de la imagen es posible observar el anillo F (Colwell et al., 2009).

Características	Anillos				
	A	B	C	DC	F
Distancia radial (km)					~ 140 000
Interior	122 050	91 980	74 490	117 000	–
Exterior	136 770	117 580	91 980	122 053	–
Ancho (km)	14 600	25 500	17 500	4 800	30 a 500
Espesor (m)	10 a 30	5 a 15	5	20	?
Profundidad óptica	0.4 a 1.0	0.4 a 2.5	0.05 a 0.12	0.05 a 0.15	0.1
Fracción de polvo (%)	< 3	< 3	< 3	< 3	> 98
Tamaño de partículas					
a_{min} (cm)	0.1	0.4	1	0.1	?
a_{max} (m)	20	20	10	7.5	?
Propellers (m)	40 a 500 ¹	400 ²	–	–	–
Índice de ley de potencias (q)	2.75 a 2.90	2.75 a 3.5	3.1	2.75	2 a 3
Albedo	0.4 a 0.6	0.4 a 0.6	0.12 a 0.30	0.2 a 0.4	0.6

¹ Tomado de Tiscareno et al., 2008.

² El objeto S/2009 S1 es el único propeller observado en el anillo B, tomado de Spitale y Porco, 2010.

Cuadro 4.1: Características físicas de los cinco anillos principales o densos de Saturno (datos tomados y adaptados de Eposito, 2006, Burns et al., 2001 y Cuzzi et al., 2009).

4.3. Clasificación y características de los anillos de Saturno

Anillo A

El anillo A es de los anillos más brillantes y densos del sistema de anillos de Saturno, su borde interior se encuentra a $\sim 2 R_S$, al final de la División de Cassini, y su borde exterior se encuentra cerca de la órbita de la luneta Atlas ($\sim 2.3 R_S$). Por su posición, el anillo A es el más dinámico de todos los anillos principales, ya que se localiza muy cerca del límite de Roche, y el material que compone el anillo es excitado por una diversidad de resonancias con los satélites cercanos (Figura 4.10), que generan estructuras ondulatorias, abren brechas y afilan el borde exterior del anillo. Cuando la luneta Atlas fué descubierta (1980), se pensó que ésta podría ser un satélite pastor, y por lo tanto, ser la responsable de confinar el material del borde exterior del anillo, sin embargo, posteriormente se demostró que algunas resonancias con los satélites coorbitales Jano y Epimeteo inducen este confinamiento (Colwell et al., 2009).

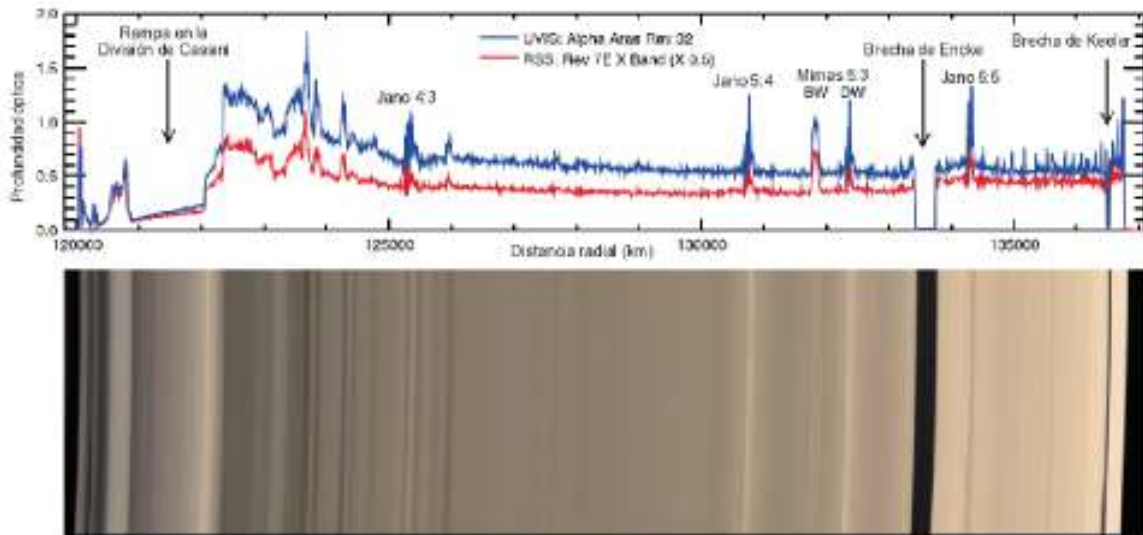


Figura 4.10: En esta figura se muestra una gráfica de la profundidad óptica (arriba) y una imagen del anillo A (abajo), obtenida por los instrumentos UVIS, RSS e ISS de Cassini. Es posible identificar diferentes estructuras inducidas por los satélites cercanos, así como las brechas de Encke y de Keeler. Las diferencias en las gráficas de la profundidad óptica son debido a los ángulos de inclinación respecto al plano de los anillos con los que fueron obtenidos por los instrumentos UVIS (azul) y RSS (rojo) (Colwell et al., 2009).

Dentro del anillo se localizan dos brechas: la brecha de Encke y la brecha de Keeler. La brecha de Encke se ubica a 133,590 km ($\sim 2.22 R_S$) respecto del centro de Saturno, y es abierta por la interacción con la luneta Pan cuyo radio es de 15 km aproximadamente. Dentro de la brecha de Encke se encuentran por lo menos tres anilletes, uno de los cuales se ubica en la órbita de la luneta Pan, y se piensa que el polvo en este anillete es generado por esta luneta (Figura 4.11).



Figura 4.11: En esta imagen se observa la brecha de Encke, destacando el anillete en la órbita de Pan (luneta no incluida en esta imagen). Adicionalmente se pueden observar diferentes estructuras en el anillo A producto de las resonancias con los satélites cercanos (imagen adaptada de <http://ciclops.org/view.php?id=552>).

Por otro lado, la brecha de Keeler tiene 42 km de ancho y se localiza aproximadamente a 250 km del borde exterior del anillo (Figura 4.8). Al igual que en la brecha de Encke, el responsable de barrer el material de esta brecha es un satélite pastor, llamado Dafne, cuyo radio medio es aproximadamente de 4 km. La inclinación de la órbita de Dafne es muy pequeña, sin embargo, es suficiente para inducir ondas transversales en el borde de la brecha.

En 2006, un conjunto de lunetas fueron encontradas en una región exterior al anillo A (Figura 4.12). Estas lunetas fueron observadas indirectamente, ya que son muy pequeñas (su diámetro ronda los cien metros) y lo observado fue la estructura en forma de hélice al perturbarse el material del anillo (Tiscareno et al., 2006). Hasta febrero del 2008, alrededor de 150 propellers habían sido detectados por el mismo método, y se estima que en una región del anillo A de 3,000 km de ancho y localizada a 130,000 km del centro de Saturno, se pueden encontrar miles de estructuras semejantes con diámetros entre los 40 y 500 m.

Anillo B

El anillo B es el más grande, brillante y denso de los anillos principales de Saturno. Se estima que el material que lo compone son rocas de entre 30 cm y 20 m de diámetro. Tiene un espesor promedio de 10 m, que equivale a una masa aproximada de 2.7×10^{19} kg, es decir, la mayoría de la masa en el sistema de anillos de Saturno se localiza en este anillo. Su borde interior comienza en una rampa con el anillo C a $1.5 R_S$ aproximadamente, y su borde exterior es un borde que termina súbitamente en la División de Cassini a $1.95 R_S$. Este anillo

4.3. Clasificación y características de los anillos de Saturno

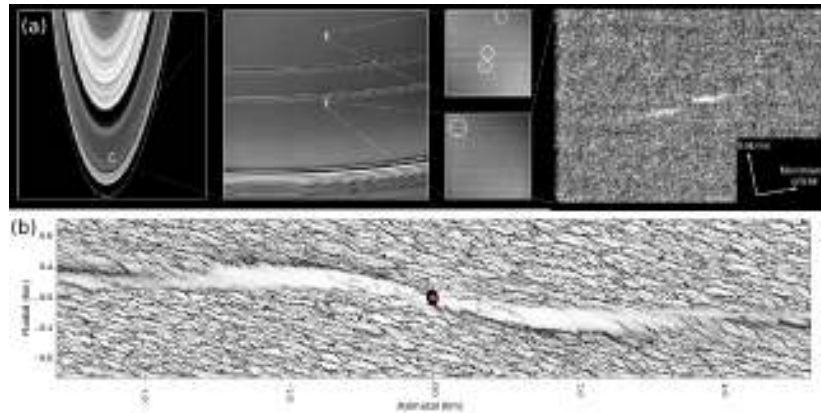


Figura 4.12: (a) Colección de imágenes obtenidas con Cassini que muestran el contexto para entender la ubicación y escala de los propellers observados en el anillo A (adaptada de <http://ciclops.org>). (b) Simulación de la perturbación del material en el anillo A debido a una luneta (imagen tomada de Tiscareno et al., 2008).

presenta variaciones en su densidad y brillo de acuerdo a la distancia radial con Saturno, y da la apariencia de estar formado por anilletes estrechos y concéntricos sin ninguna brecha en su interior (Figura 4.13).

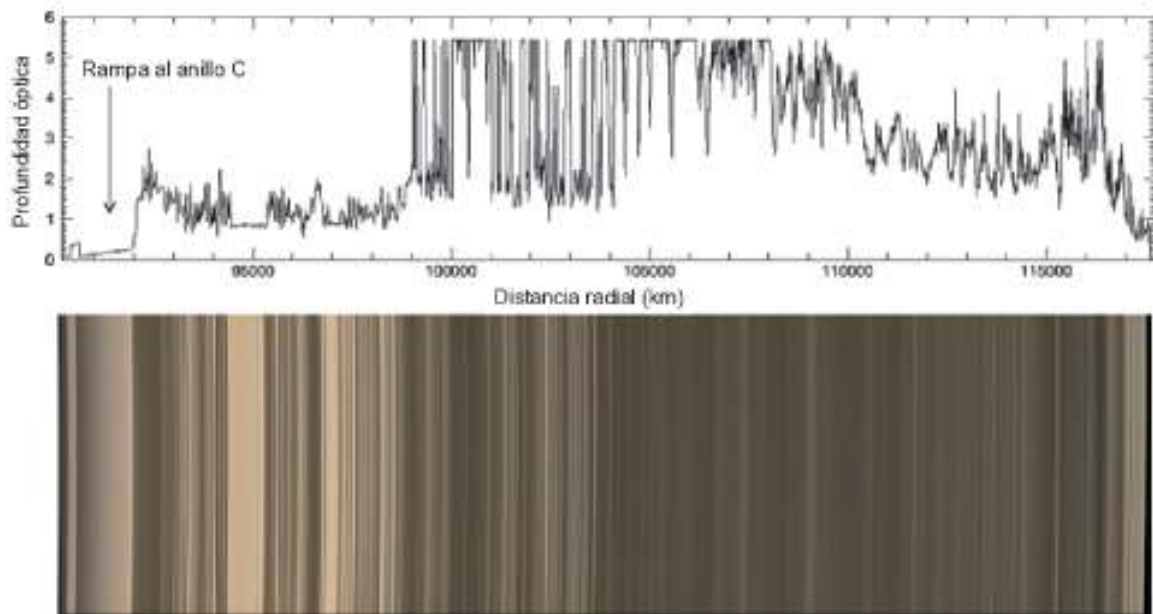


Figura 4.13: En esta figura se muestra una gráfica de la profundidad óptica (arriba) y una imagen del anillo B (abajo), obtenida por los instrumentos UVIS, e ISS de Cassini (Colwell et al., 2009).

Al igual que el anillo A, el anillo B presenta estructuras ondulatorias pero con menor frecuencia, destacando la resonancia 2:1 con los satélites coorbitales Jano y Epimeteo, que

genera un tren de ondas longitudinales comenzando en los 95,000 km del centro de Saturno, y propagándose 500 km hacia el exterior del anillo. Este patrón ondulatorio (density waves) genera variaciones en la densidad y, por lo mismo, en la profundidad óptica del anillo.

En el año 2009, durante el equinoccio de Saturno se observó un cuerpo incrustado en el material del anillo B. Esta pequeña luneta fue descubierta debido a la sombra que proyectaba sobre el plano del anillo. Se estima que este pequeño satélite situado a 150 m sobre dicho plano (Figura 4.14) tiene un diámetro de ~ 400 m, y es el primer propeller encontrado fuera del anillo A. Provisionalmente se le ha nombrado *S/2009 S 1* (Spitale y Porco, 2010).

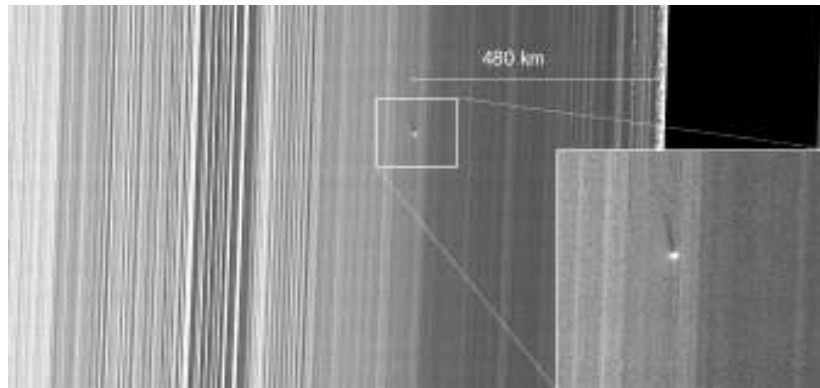


Figura 4.14: En esta imagen se muestra la luneta *S/2009 S 1*, situada a 480 km del borde del anillo B, a una distancia vertical de 150 m sobre el plano del anillo proyectando una sombra de 36 km en este plano (imagen adaptada de <http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA11665>).

Hasta principios de los años 80's, la estructura de los anillos densos de Saturno era explicada exclusivamente por la acción de las fuerzas gravitacionales. Posteriormente, las imágenes de la nave espacial *Viajero* develaron estructuras radiales en el anillo B conocidas como cuñas radiales o spokes. Las cuñas se forman en cuestión de minutos extendiéndose radialmente cientos o miles de kilómetros hacia el exterior del plano de los anillos, y se ven oscuras o brillantes dependiendo de la posición de la nave y el ángulo de iluminación del Sol (Figura 4.15). La teoría más aceptada sobre este fenómeno es, que los spokes están formados por partículas microscópicas de polvo en suspensión, fuera del plano de los anillos, debido a la repulsión electrostática y que giran casi sincrónicamente con la magnetosfera de Saturno (Horányi et al., 2009).

El mecanismo que generara las cuñas es todavía desconocido, aunque se ha sugerido que las perturbaciones eléctricas en forma de haces de electrones pueden ser causadas por la actividad eléctrica en la atmósfera de Saturno (Hill y Mendis, 1982; Jones et al., 2006), o bien, por impactos de micrometeoroides en los anillos (Goertz y Morfill, 1983).

4.3. Clasificación y características de los anillos de Saturno

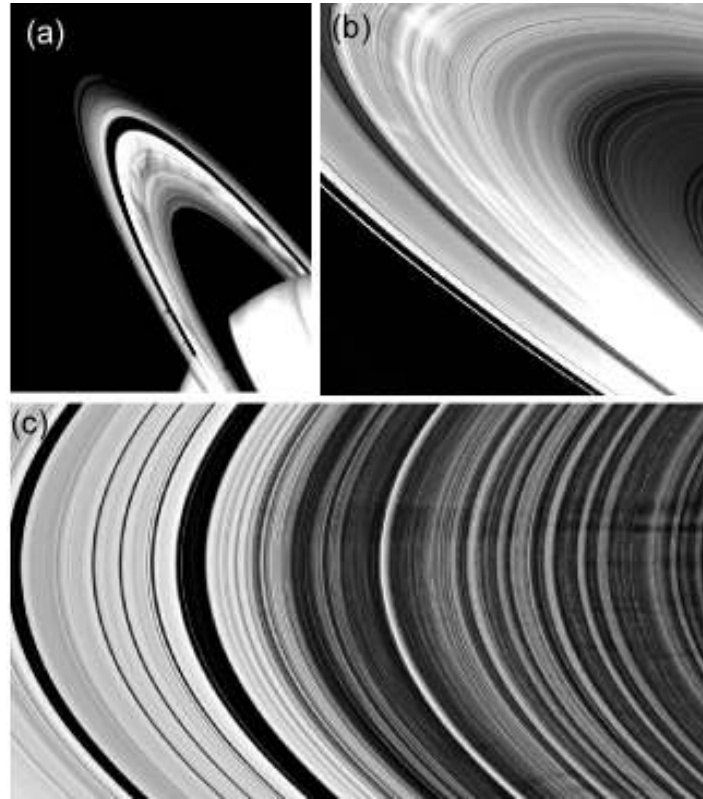


Figura 4.15: En esta combinación de imágenes se muestran las cuñas radiales (spokes) en el anillo B observadas por: las naves Viajero (a) y (b), desde un ángulo de fase diferente, y Cassini (c) (imágenes tomadas y adaptadas de <http://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

Anillo C

El anillo C está compuesto por rocas que van de 1 cm a los 10 m de diámetro en su mayoría y por polvo micrométrico en menor cantidad. Tiene un espesor vertical promedio de 5 m y la masa aproximada de este anillo es de 1.1×10^{18} kg. Al igual que en los anillos A y B, las resonancias con algunos satélites inducen estructuras ondulatorias y abren brechas en el interior. El borde interno del anillo se ubica a los $1.23 R_S$ y el borde exterior finaliza a los $1.52 R_S$ en una rampa que comparte con el anillo B. La apariencia visual del anillo C está dominada por una serie de bandas brillantes y oscuras alternantes y algunas brechas, sobre un fondo oscuro, donde las mediciones de ocultamiento estelar indican que estas variaciones en el brillo implican variaciones en la profundidad óptica. Las bandas brillantes, y con mayor profundidad óptica, son conocidas como mesetas (plateaus) y son estructuras exclusivas de este anillo. La rampa que indica la transición entre el anillo C y el anillo B es una región de 1,340 km de ancho aproximadamente, que gradualmente aumenta su profundidad óptica conforme se aproxima al anillo B. Se piensa que el mecanismo que genera esta rampa es el

transporte balístico del material del borde interno del anillo B, producto de las colisiones con meteoroides (Colwell et al., 2009).

En el interior del anillo se localizan cinco brechas, que a diferencia de las brechas en el anillo A, no contienen anilletes en su interior ni se han observado lunetas que sean las responsables de aclarar el material en dichas regiones (Figura 4.16).

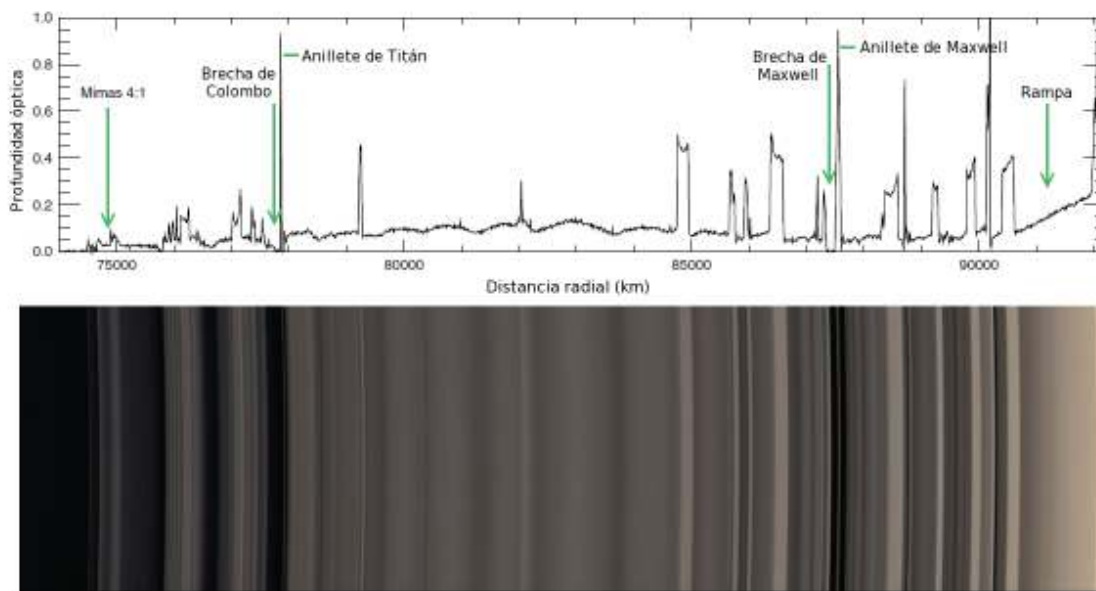


Figura 4.16: En esta figura se muestra una gráfica de la profundidad óptica (arriba) y una imagen del anillo C (abajo), obtenida por los instrumentos UVIS, e ISS de Cassini. Las brechas no indicadas son: la brecha de Bond y la brecha de Dawes a 88,685 y 90,200 km del centro de Saturno, respectivamente (Colwell et al., 2009).

División de Cassini

La División de Cassini (DC) es una región de 4,800 km de ancho entre los anillos A y B. Desde la Tierra, la DC tiene una apariencia de un espacio vacío, sin embargo, a través de observaciones con las naves *Viajero* se descubrió que esta región está poblada con material que en su composición se asemeja al material que forma el anillo C. La DC alberga ocho brechas y un número similar de anilletes (Figura 4.17). El borde interno se localiza junto al borde externo del anillo B, separado por la brecha de Huygens de 417 km de ancho, y cuya estructura es generada por la resonancia interna de Lindblad 2:1 con Mimas. El borde externo de la DC es una región de transición en forma de rampa hacia el anillo A, cuyas características y dinámica del material son semejantes a las de la rampa entre los anillos C y B (Colwell et al., 2009).

4.3. Clasificación y características de los anillos de Saturno

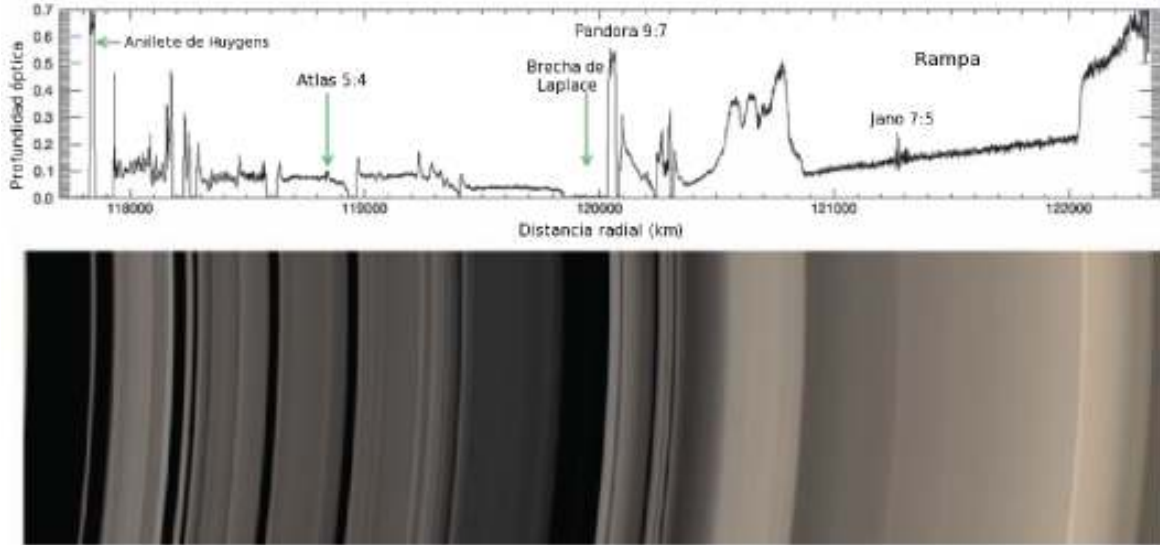


Figura 4.17: En esta figura se muestra una gráfica de la profundidad óptica (arriba) y una imagen de la División de Cassini (abajo), obtenidas por los instrumentos UVIS, e ISS de la nave Cassini. En la imagen se observan las diferentes estructuras que forman la región, del lado izquierdo se observa la brecha de Huygens, que contiene un anillote con el mismo nombre y que separa la División y el anillo B. El borde externo de la División está compuesto por la rampa que forma la transición hacia el anillo A (Colwell et al., 2009).

Anillo F

El anillo F fue detectado por primera vez en 1979 mediante observaciones realizadas con la nave *Pionero 11* (Figura 4.1), y posteriormente fue fotografiado en alta resolución por las naves *Viajero 1* y *2* en 1980 y 1981. Las imágenes de los *Viajero* mostraron una banda estrecha, con un ancho de ~ 50 km, compuesta por dos anillos, y donde la presencia de los satélites Prometeo y Pandora evitaba que el material del anillo se dispersara debido al mecanismo de pastoreo ejercido por ambos satélites (Figura 4.3). Actualmente, gracias a las observaciones realizadas por este conjunto de naves, por telescopios en tierra y por la misión *Cassini-Huygens*, se sabe que el anillo F es el anillo más dinámico de todo el sistema solar, cuyas características pueden llegar a cambiar en una escala de horas (Colwell et al., 2009).

El anillo está localizado a 3,400 km del borde externo del anillo A, e integrado por una combinación de rocas y polvo. Las rocas podrían ser una población significativa de lunetas (con radios menores a 2 km) cuya interacción entre si, aunado a la influencia gravitacional de los satélites pastores Prometeo y Pandora, definen la forma y dinámica del anillo. Los estudios recientes indican que la estructura del anillo es una región acotada por un núcleo central acompañado de una población de lunetas que colisionan regularmente con el material del núcleo y liberan partículas cuyo movimiento orbital forma estructuras espirales y haces

de polvo (Figura 4.18) (Charnoz et al., 2005).

Una explicación posible para esta estructura menciona que la población que acompaña el núcleo central está compuesta por pequeñas lunetas de radios ~ 5 km, y que estas lunetas barren el material de su órbita, ejerciendo un efecto similar al barrido de material en la brecha de Encke por parte de la luneta Pan. Esta hipótesis es apoyada por la detección de la absorción de partículas cargadas por un cinturón de objetos en la vecindad del anillo F (Murray et al., 2008). Adicionalmente, un objeto de 5 km de diámetro (*S/2004 S6*) fué observado en la vecindad del núcleo central, representando un ejemplo del tipo de lunetas que podrían poblar dicha región.

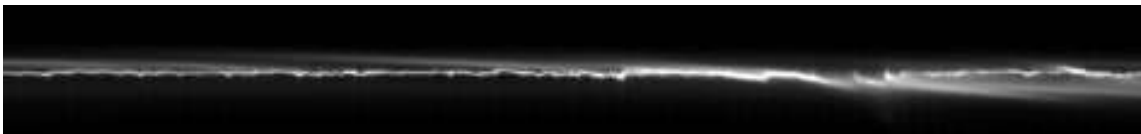


Figura 4.18: Mosaico de 107 imágenes del anillo F obtenidas con la nave *Cassini* que representa el 70 % de la longitud del anillo. Es posible observar un núcleo central más brillante y rodeado por una espiral de material polvoso a su alrededor (tomada de <http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA08412>).

4.3.2. Anillos tenues

Además de sus majestuosos anillos principales, Saturno también posee un conjunto de anillos tenues compuestos principalmente de partículas de menos de $100 \mu\text{m}$ de radio y con una profundidad óptica menor a 10^{-3} . Las colisiones entre las partículas son raras en estos anillos. Debido a su tamaño, las partículas son sensibles a fuerzas de naturaleza no gravitacional. Por lo mismo, la dinámica de estos anillos es cualitativamente diferente de la dinámica en los anillos principales. Además, mientras que los anillos principales de Saturno sólo pueden ser estudiados por observaciones remotas, los anillos tenues ofrecen una oportunidad única para combinar las observaciones remotas y las observaciones in situ. La combinación de estos conjuntos de datos nos permite aprender acerca de los efectos en el polvo de fenómenos tales como la presión de radiación, las interacciones magnetosféricas, y el arrastre del plasma.

En la Figura 4.19 se muestra el sistema de anillos de Saturno observado por *Cassini* cuando sobrevoló el lado noche del planeta, el 15 de septiembre de 2006. En esta geometría de observación tan particular, donde el Sol se encuentra detrás de Saturno, el polvo en los anillos dispersa eficientemente la luz, implicando que los anillos compuestos por este material puedan ser observados con una mejor nitidez.

Las regiones a considerar dentro de los anillos tenues son el anillo D, las cuñas radiales

4.3. Clasificación y características de los anillos de Saturno

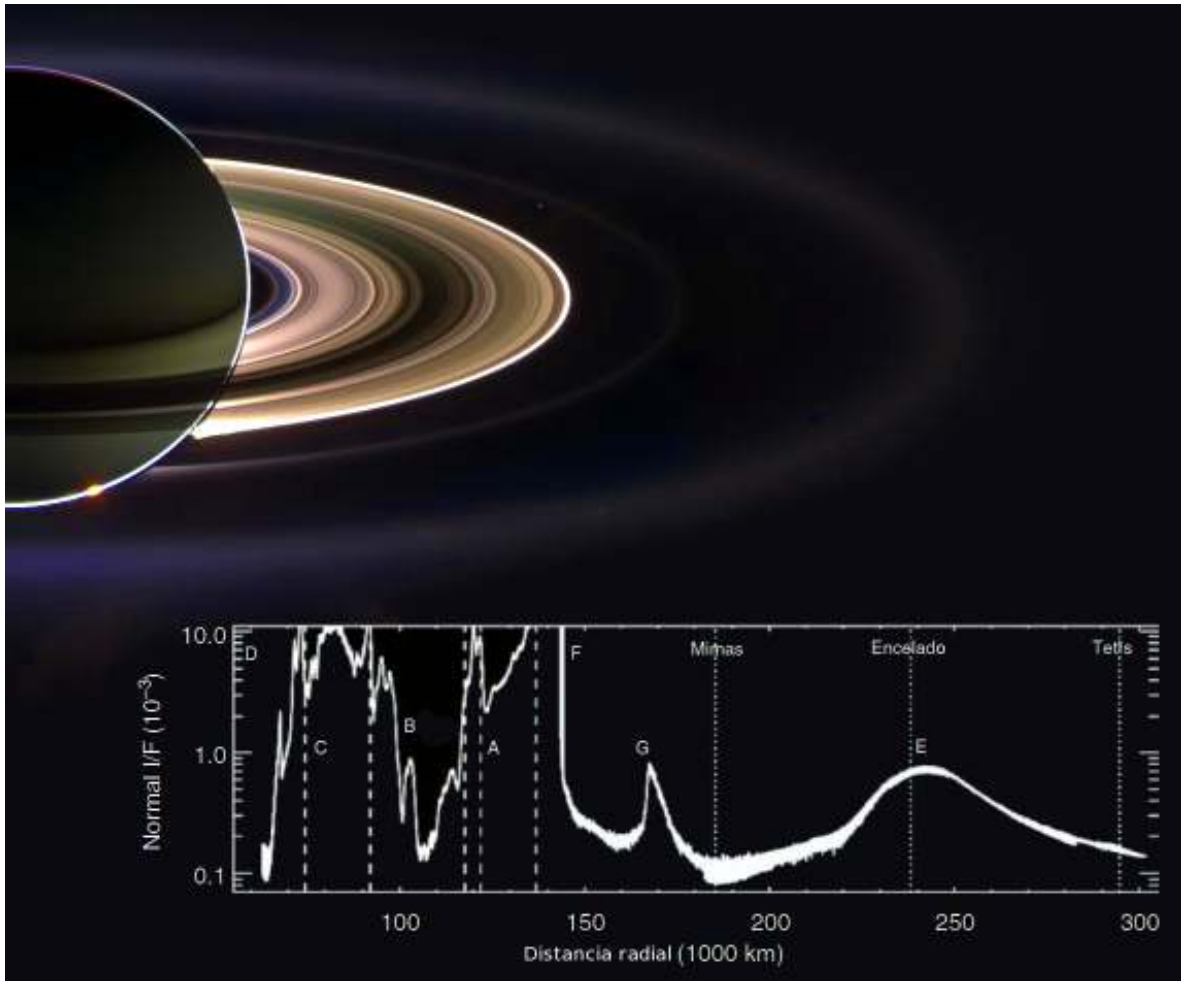


Figura 4.19: Composición de imágenes del sistema de anillos obtenidas por *Cassini* desde el lado no iluminado de Saturno y bajo diferentes filtros (tomada de <http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA08329>). Adicionalmente se muestra una gráfica del brillo de los anillos como función de la distancia al centro de Saturno con un ángulo de fase de 178.5° . Se indica la posición de los anillos D, C, B, A, F, G y E y de los satélites Mimas, Encelado y Tetis.

o spokes en el anillo B, algunos anilletes dentro de las brechas, el anillo G, arcos anulares asociados con algunas lunetas, el anillo E, los haces de polvo eyectados hacia el exterior de la magnetosfera y el anillo asociado al satélite Febe.

En el Cuadro 4.2 se muestran la ubicación y algunas características físicas de los anillos tenues.

Anillos	Características		
	Distancia radial (km)	Profundidad óptica	Fracción de polvo (%)
D			
Borde interno	65 000	$10^{-4} < 73\,000$ km	50 a 100
Anillete D72	71 600		
Borde externo	74 500	$10^{-3} > 73\,000$ km	
C			
Anillete Brecha de Maxwell	87 420	10^{-4}	100
B			
Spokes	100 000 a 116 000	10^{-2} a 10^{-1}	100
DC (anilletes)			
Brecha de Huygens	117 490	10^{-4}	100
Brecha de Laplace	119 490	10^{-3}	100
A			
Brecha de Encke (anilletes)			
Interno	133 490	10^{-3}	100
Central	133 590	10^{-3}	100
Externo	133 720	10^{-3}	100
División de Roche	136 800 a 139 500	$\sim 10^{-4}$?
Anillete Jano-Epimeteo	151 450	$\sim 10^{-7}$	100?
G			
Arco anular (anillo G)	165 000 a 175 000	10^{-6}	> 99
	167 500	10^{-5}	> 99
Metone (arco anular)	194 230	$\sim 10^{-7}$	100?
Ante (arco anular)	197 650	$\sim 10^{-7}$	100?
Palene	212 280	$\sim 10^{-7}$	100?
E			
	180 000 a 700 000	10^{-5} (pico)	100

Cuadro 4.2: Características físicas de los anillos tenues de Saturno (datos tomados y adaptados de Horányi et al., 2009 y Burns et al., 2001).

Desde que las misiones *Viajero* sobrevolaron a Saturno, fueron detectadas diferentes estructuras anulares compuestas principalmente o exclusivamente por polvo. Posteriormente, el telescopio espacial Hubble y diversos telescopios en tierra confirmaron la ubicación y características de dichas estructuras. Recientemente, la nave *Cassini* detectó material polvoso en diferentes regiones en el sistema de anillos. Donde los instrumentos de medición remota observaron regiones de polvo alrededor y en el interior de los anillos principales, anilletes

4.3. Clasificación y características de los anillos de Saturno

de polvo dentro de las brechas y las cuñas radiales, o spokes sobre el anillo B. Adicional a las mediciones remotas, la nave ha realizado mediciones in situ de las regiones externas a los anillos principales, confirmado lo observado por las naves *Viajero*, y aportado nuevos descubrimientos como son los arcos anulares compuestos por polvo y asociados con algunas lunetas. Así mismo, los datos obtenidos con los detectores de polvo a bordo de la nave han permitido estudiar a las partículas del anillo E, y similarmente, a las partículas eyectadas fuera de la magnetosfera de Saturno.

Anillo D

Entre las nubes tope de Saturno y el borde interno de los anillos principales se localiza el anillo D. El borde interno del anillo se ubica a 5,000 km de las nubes tope, siendo esta región un espacio con una densidad muy baja de material. Una de las características de este anillo es que está poblado por partículas de entre 1 y 100 μm de radio y dividido en dos regiones: la que va del borde interno (65,000 km) hasta los 73,000 km aproximadamente, con una densidad óptica de 10^{-4} y con partículas de entre 1 y 10 μm de radio, y la región que empieza a los 73,000 km hasta el borde externo ubicado a 74,500 km respecto al centro de Saturno, y cuya densidad óptica es mayor y con partículas de mayor tamaño (entre 10 y 100 μm de radio) que aquellas de la región interior.

En 1980, el *Viajero 1* observó tres anilletes dentro de este anillo, designados con los nombres D68, D72 y D73 por su ubicación a 68,000, 72,000 y 73,000 km del centro de Saturno, respectivamente. Recientemente, la nave *Cassini* confirmó la presencia de dos de estos anilletes (D68 y D73) y detectó cambios significativos en el anillo D respecto a los datos y las imágenes obtenidas en los últimos 25 años. Uno de estos cambios se relaciona con la estructura más brillante observada por la nave *Viajero*: el anillete D72. En aquel tiempo, se reportó que este anillete medía menos de 40 km de grosor y se localizaba a 71,710 km respecto al centro de Saturno. En su lugar, *Cassini* observó una estructura menos brillante, más ancha (~ 300 km) y centrada a los 71,600 km (Figura 4.20). La relación entre esta nueva estructura y el anillete D72 observada por el *Viajero* aún no es clara. Se piensa que el anillete pudo haber desaparecido, o bien, que se transformó en la nueva estructura observada por *Cassini* (Horányi et al., 2009).

Por otro lado, *Cassini* también observó anilletes adicionales y estructuras en el anillo D que no fueron observadas por el *Viajero*. Adicionalmente, *Cassini* ha detectado un patrón ondulatorio en la región exterior del anillo. Este patrón, se caracteriza por variaciones periódicas en el brillo del material del anillo y ondulaciones con amplitudes de entre 2 y 20 m.

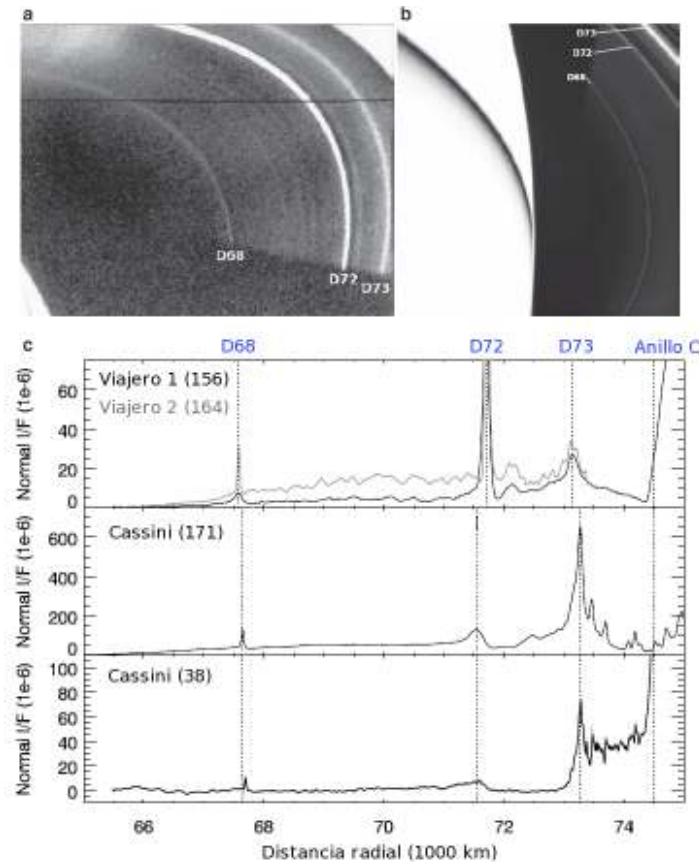


Figura 4.20: En este conjunto de imágenes se muestra una región del anillo D obtenida por: (a) las naves Viajero, desde un ángulo de fase de 156° , y (b) Cassini, con un ángulo de fase de 38° . Adicionalmente, se muestran tres perfiles de brillo radial (c), donde se hacen notorios los cambios en el anillo D en los últimos 25 años. Es notable la desaparición del anillito D72, y la aparición de una estructura similar en el exterior del anillo (imágenes tomadas y adaptadas de Horányi et al., 2009).

Los estudios recientes indican que el impacto de un resto cometary o de un objeto similar en 1983 pudo ser la causa de la generación de esta estructura ondulatoria en el anillo (Hedman et al., 2007a).

Spokes

En la sección anterior se mencionó que en el Anillo B se observan estructuras radiales llamadas cuñas o spokes (ver Figura 4.15, pag. 102). Estas estructuras están formadas por partículas de polvo de $\sim 0.6 \mu\text{m}$ de radio que se extienden radialmente hasta 10,000 km, con un ancho aproximado de 2,000 km (Burns et al., 2001). Se ha observado que los spokes son un fenómeno intermitente, ligado posiblemente a las estaciones de Saturno, y presentan un movimiento corrotacional con el campo magnético del planeta.

4.3. Clasificación y características de los anillos de Saturno

Anilletes dentro de las brechas

Una gran cantidad de brechas han sido observadas en los anillos principales (subsección 4.3.1). Cuatro de estas brechas contienen anilletes compuestos por partículas de polvo con radios menores a $100\ \mu\text{m}$, y aunque son estructuras muy finas y con muy poca masa, el interés que representan está relacionado con la posibilidad de poder explicar el mecanismo que abre las brechas en estos anillos. Las brechas que contienen anilletes de polvo son: La brecha de Maxwell en el anillo C, la brechas de Huygens y Laplace en la División de Cassini, y la brecha de Encke en el anillo A (Figura 4.21). Algunos aspectos relacionados con el origen, la evolución y la dinámica de estos anilletes de polvo son desconocidos, sin embargo, se saben algunas coincidencias, como aquellas que indican que las brechas con anchos mayores a 100 km contienen por lo menos un anillote de polvo.



Figura 4.21: En este conjunto de imágenes se muestran los anilletes de polvo asociados a las brechas localizadas dentro de los anillos principales. Las flechas indican la ubicación de los anilletes (imágenes tomadas y adaptadas de Horányi et al., 2009).

La división de Roche

En los datos obtenidos por las naves *Viajero* se detectó material en la división de Roche, un espacio que se pensaba vacío, ubicado entre el borde externo del anillo A y el anillo F. Las

observaciones recientes realizadas por *Cassini* confirmaron la presencia de material en esta región, y aún más, se encontró que existen dos estructuras anulares compuestas por polvo cercanas a las órbitas de los satélites Prometeo y Atlas. Recientemente, se ha observado que estas estructuras presentan variación en su forma y a través del tiempo.

Anillo G

El anillo G es una estructura de polvo con partículas de tamaños variables, y se estima que se encuentra localizado entre 165,000 y 175,000 km del centro de Saturno. Los límites exactos de los bordes de este anillo no están determinados debido a que el material del borde externo está dispersado y se mezcla con material del anillo E, y donde el ancho y espesor aproximados de este anillo son 10,000 km y 10^5 m, respectivamente. Las observaciones recientes muestran que el anillo contiene un arco de material con una densidad mayor de partículas y cuya masa se estima entre 10^8 y 10^{10} kg, equivalente a una luneta de 100 km de diámetro (Figura 4.22).

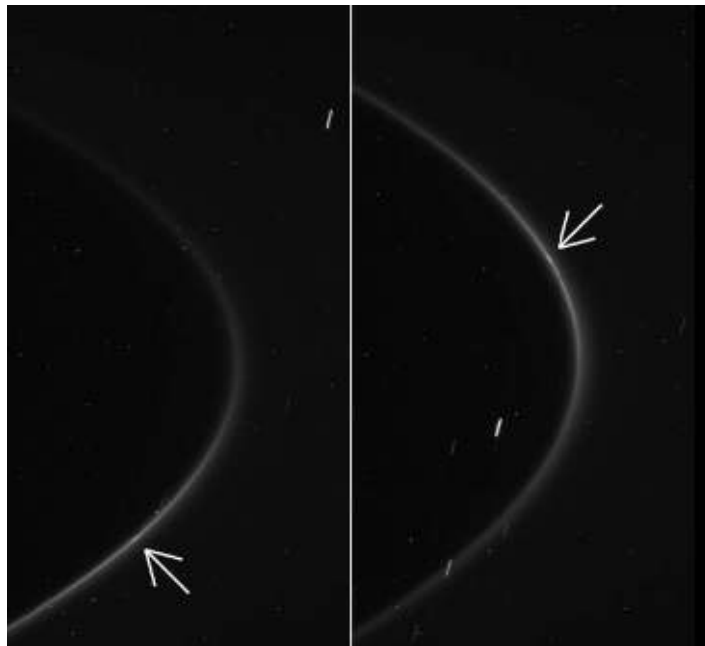


Figura 4.22: En estas imágenes obtenidas por *Cassini* se observa el arco anular en el anillo G, este arco se señala con flechas y en la región de mayor brillo se presume la presencia de la luneta S/2008 S1 nombrada como Egeón de 1 km de diámetro aproximadamente (imágenes tomadas de <http://photojournal.jpl.nasa.gov>).

Este arco anular es el resultado de la resonancia 7:6 con el satélite Mimas. Se ha observado la presencia de una luneta de ~ 1 km de diámetro, que representa un ejemplo del tipo de cuerpos que pueblan el arco del anillo. Se piensa que mientras las partículas de mayor tamaño

4.3. Clasificación y características de los anillos de Saturno

están confinadas en el arco por efecto de la resonancia con Mimas, el polvo producido por las colisiones entre ellas se dispersa como resultado de la interacción con el plasma ambiental y por lo tanto, escapa para generar el resto del anillo (Hedman et al., 2009a).

Así como las partículas en el arco del anillo G posiblemente generen el resto del anillo, algunas lunetas localizadas entre el anillo F y el satélite Encelado podrían ser las responsables de generar anilletes de polvo observados en esa región. Las observaciones realizadas con *Cassini* han evidenciado la presencia de anilletes en las órbitas de las lunetas Ante, Metone y Palene, así como de las lunetas coorbitales Jano y Epimeteo (Figura 4.23). Si bien los anilletes encontrados en las órbitas de las lunetas Ante y Metone son sólo arcos anulares, se estima que el mecanismo mediante el cual se generan los anilletes está relacionado con el impacto de micrometeoroides en la superficie de estas cinco lunetas (Hedman et al., 2009b).

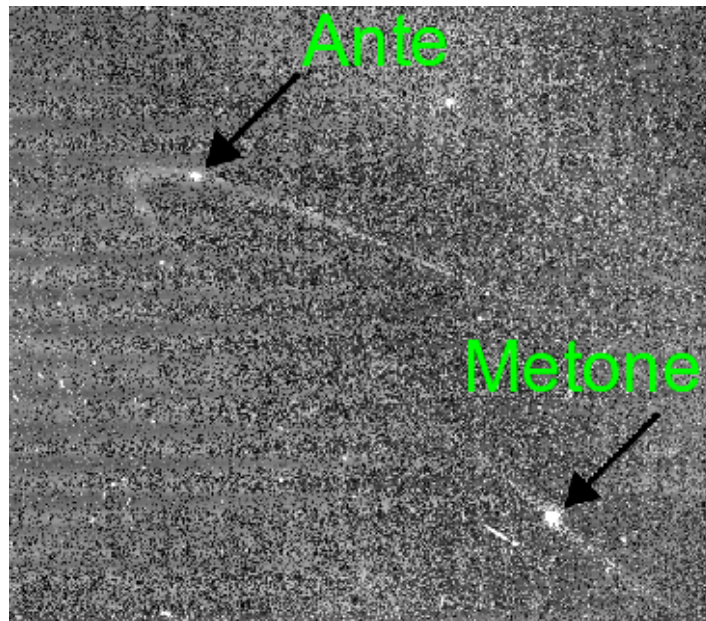


Figura 4.23: En estas imágenes obtenidas por *Cassini* se observan los arco anulares en las órbitas de las lunetas Ante y Metone (imágenes tomadas de <http://photojournal.jpl.nasa.gov>).

Anillo E

El anillo E es un anillo de polvo muy extenso que se extiende desde los límites con el satélite Mimas ($\sim 3 R_S$) hasta las proximidades con el satélite Titán ($\sim 12 R_S$), (ver Figura 4.19, pag. 106). Previo a la llegada de *Cassini* a Saturno, los datos obtenidos por las naves *Viajero*, así como por telescopios en tierra mostraron que el anillo está compuesto principalmente por granos de polvo muy pequeños ($< 5\mu\text{m}$), y que la región de mayor densidad y

brillo se localiza en la órbita del satélite Encelado (ver Figura 3.7, capítulo 3, pag. 59), (Burns et al., 2001).

Con la llegada de *Cassini* se confirmó lo observado con anterioridad, y adicionalmente, se demostró que el anillo está compuesto de granos de polvo micrométricos y submicrométricos primordialmente de hielo de agua, con contribuciones menores de alguna combinación de silicatos, dióxido de carbono, amoníaco y otros compuestos orgánicos (Hillier et al., 2007). Además, mediante *Cassini* se ha observado que la fuente primaria que provee material para el anillo son las eyecciones, o plumas, criovolcánicas expulsadas a través de las fracturas geológicas en el polo sur de Encelado, conocidas como las rayas de tigre (ver Figura 3.8, capítulo 3, pag. 60), (Porco et al., 2006).

Estudios recientes mostraron que la ubicación de la región más densa (pico) del anillo no coincide con la órbita de Encelado, si no que se encuentra desplazada 3,000 km hacia el borde externo de anillo. En principio, esto sería consecuencia del arrastre del material del anillo por parte del plasma ambiental (Kempf et al., 2008). Adicionalmente, otro estudio ha mostrado que, a diferencia de los anillos principales, el anillo E tiene más de 2,000 km de espesor, y este espesor aumenta conforme el anillo se aleja de la órbita de Encelado (Hedman et al., 2012).

Sin lugar a dudas, el anillo E es una estructura enigmática y atípica dentro del sistema de anillos de Saturno. Recientemente, los datos obtenidos con el analizador de polvo cósmico de *Cassini* (CDA) revelaron una característica única de este anillo: la densidad y morfología de la región interna del anillo E muestra una dependencia de la hora local. Esto significa que el perfil de densidad radial en la región del mediodía muestra mayor compresión respecto al perfil en la región opuesta (medianoche); lo que implica que el anillo E no tiene una forma de disco circular perfecto, exhibiendo más bien una aparente forma ovoidal (Kempf et al., 2012).

Dos de los descubrimientos obtenidos con *Cassini*: la eyección de material en el polo sur de Encelado y la distribución espacial del anillo E, que se extiende posiblemente hasta la órbita de Titán, indican que Encelado podría ser el responsable principal de llenar la magnetosfera de Saturno con polvo. Estas partículas de polvo son transportadas fuera de Encelado debido al arrastre del plasma (Horányi et al., 2009).

Anillo de Febe y sistema de anillos en Rea

Como se mencionó en el capítulo relativo a los satélites de Saturno (sección 3.3.7, pag. 54), utilizando el telescopio espacial infrarojo Spitzer de la NASA, el 6 de octubre del 2009

4.3. Clasificación y características de los anillos de Saturno

se descubrió un disco tenue de material en los alrededores de la órbita del satélite Febe (Verbiscer et al., 2009). Este anillo de polvo se compone de partículas de $10 \mu\text{m}$ de diámetro en promedio y se extiende desde la órbita de Japeto ($59 R_S$) hasta posiblemente $300 R_S$, siendo el anillo más grande y alejado del sistema de anillos de Saturno (Figura 4.24). Este anillo se caracteriza por presentar una inclinación de 27° respecto al plano ecuatorial de Saturno, y las partículas que lo forman se encuentran compartiendo el movimiento retrógrado de Febe. Los estudios que se han realizado de este anillo indican que el material que lo compone es el resultado de la eyección de partículas producto del impacto de micrometeoroides en la superficie de Febe.

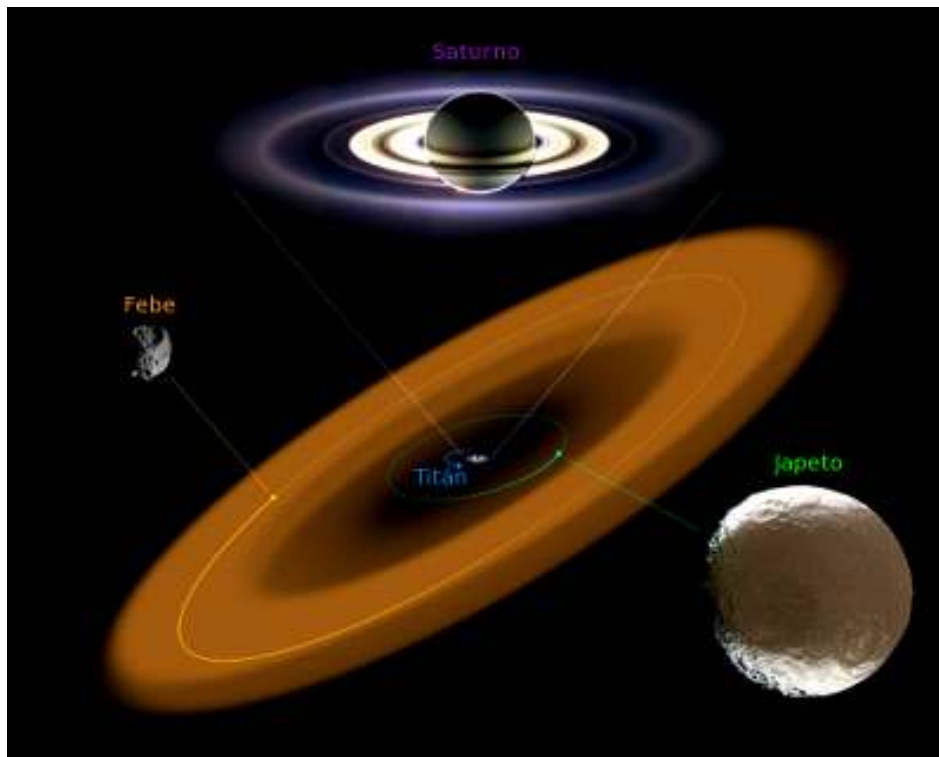


Figura 4.24: En esta imagen se muestra una representación artística de la forma y dimensiones del anillo tenue del satélite Febe en comparación con Saturno y su sistema de anillos. Adicionalmente, se muestra la ubicación de las órbitas de los satélites Titán y Japeto como comparación de las dimensiones de este magnífico anillo (imagen tomada de <http://photojournal.jpl.nasa.gov>).

Por otro lado, el 6 de marzo de 2008 se anunció que Rea podría tener un sistema de anillos muy tenues, siendo la primera observación de un sistema de anillos en un satélite. La existencia de los anillos fue inferida al observar cambios en la densidad de electrones atrapados por la magnetosfera de Saturno, en el momento en que *Cassini* sobrevolaba Rea (Jones et al., 2008).

El sistema de anillos estaría en principio compuesto por tres anillos situados a $1,620 \text{ km}$,

1,800 km y 2,020 km del centro de Rea, lo que corresponde con 2, 3 y 4 radios de Rea (R_{Rea}). Sin embargo, los acercamientos de *Cassini* a Rea posteriores al “descubrimiento de los anillos”, no confirmaron la presencia del sistema anular, e inclusive, los análisis detallados de las imágenes obtenidas con la cámara de alta resolución de *Cassini* (ISS), contradicen el resultado de 2008 que postula la presencia de estos anillos (Tiscareno et al., 2010).

4.3. Clasificación y características de los anillos de Saturno

Capítulo 5

Modelo Gravito-electrodinámico

5.1. Plasma y polvo

Desde que Hannes Alfvén (1908-1995) acuñó el término *Plasma Universe*, se dice que el material en el Universo observable se encuentra en su mayoría (99 %) en estado de plasma. El medio interestelar e interplanetario, la mayoría de las estrellas, incluyendo al Sol, las altas atmósferas y magnetosferas planetarias son algunos espacios donde la materia en el universo se encuentra en este estado.

El estado de plasma es cuando la materia es un medio gaseoso que contiene un número apreciable de cargas libres (positivas y negativas), pero que es aproximadamente neutro en su conjunto, y donde dichas cargas pueden establecer corrientes eléctricas que interactúan con campos magnéticos externos y con los generados por las propias corrientes.

Si se piensa que la mayoría del Universo observable se encuentra en estado de plasma, entonces se podría conjeturar que el material restante se compone de material rocoso, particularmente de polvo. Los granos de polvo se pueden observar en distintos lugares tales como: las nubes interestelares, las atmósferas y vientos estelares y las nubes moleculares observadas en las nebulosas como la de Orión. Adicionalmente, se ha observado una gran cantidad de polvo en los discos protoplanetarios, los cometas, el material meteorítico, la nube de polvo zodiacal, las magnetosferas planetarias y los anillos planetarios, por nombrar algunas de las estructuras más sobresalientes.

Los granos de polvo son partículas de dimensiones micrométricas y submicrométricas, cuya composición química varía enormemente de acuerdo al ambiente astrofísico en el que se localizan, dicha composición puede estar dominada por el carbono, los silicatos, las ferritas, e inclusive estar compuestos por hielo de agua como es el caso de las partículas en la mayoría de los anillos de Saturno.

Como el polvo se encuentra inmerso en el plasma ambiental, los granos participan en

5.1. Plasma y polvo

muchos procesos físicos relacionados con eventos que se producen en los espacios interplanetario, interestelar e intergaláctico. Como consecuencia de estos procesos, se establecen en los granos de polvo propiedades físicas como la temperatura (T) y la carga eléctrica (Q).

La adquisición de carga eléctrica en los granos de polvo está relacionada con sus características físicas como son la densidad (ρ), el tamaño del grano (a) y su composición química, así mismo, la carga eléctrica en el grano también se relaciona con las condiciones del medio mediante la distancia intergrano (d) y la longitud de Debye (λ_D) asociada con el plasma del medio ambiente.

Si la adquisición de carga se analiza desde un punto de vista clásico (Mendis y Rosenberg, 1994), es decir, se considera a cada uno de los granos como un ente aislado y sumergido en un plasma magnetosférico, las fuerzas que actúan en la dinámica del polvo son la gravitacional, la electromagnética, la fuerza de arrastre del plasma, la fuerza de presión de radiación y otras. Bajo estas condiciones, el polvo interactúa con iones y electrones intercambiando momento, masa, energía y carga eléctrica (Verheest, 2000).

De esta forma, la carga eléctrica del grano, Q , queda expresada por la siguiente relación:

$$Q = \Phi a \quad (5.1)$$

donde Φ es el potencial eléctrico asociado al grano y a es el radio de un grano esférico sumergido en un plasma.

Además de la adquisición de la carga eléctrica, la concentración de granos de polvo establece el comportamiento del polvo en el plasma. Para ello, se consideran tres parámetros fundamentales: el radio del grano (a), la distancia intergrano (d) y la longitud de Debye (λ_D).

La longitud de Debye, es la distancia en la que el campo eléctrico de una carga eléctrica arbitraria en el plasma es apantallado, siendo este parámetro el que proporciona el primer indicio de cuando los procesos colectivos en el plasma son relevantes, y define cuando se tiene o no, *polvo en el plasma* (partícula aislada) o un *plasma polvoso*. Estos dos regímenes, que se definen en función de la concentración de los granos de polvo, son los siguientes:

a) Si $a \ll \lambda_D < d$, cada grano se comporta como una partícula independiente y por lo tanto se tiene *polvo en el plasma*.

b) Si $a \ll d < \lambda_D$, entonces se tiene un *plasma polvoso* donde el polvo forma una tercera componente energética y participa en el comportamiento colectivo del plasma.

La distancia intergrano y la longitud de Debye se definen de la siguiente manera:

$$d = \left(\frac{3}{4 \pi \eta_p} \right)^{1/3} \quad (5.2)$$

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k T}{\eta_e e^2}} \quad (5.3)$$

donde ϵ_0 es la permitividad eléctrica en el vacío, k es la constante de Boltzman, T es la temperatura del plasma, e es la carga del electrón, η_p es la densidad del polvo y η_e es la densidad del plasma.

En 1984, Ove Havnes sugirió que la condición que define cuando se tiene un plasma polvoso (condición b) es una condición necesaria pero no suficiente y, propuso, que para caracterizar los efectos colectivos del polvo se tiene que hacer una comparación entre el número de cargas electrónicas depositadas en el polvo y el número de electrones en el plasma. Esta comparación es expresada por:

$$P_H \equiv \frac{4 \pi \epsilon_0 k T \eta_p a}{\eta_e e^2} \quad (5.4)$$

conocida como parámetro de Havnes (P_H), donde las variables que componen esta ecuación son las mismas que integran la ecuación 5.3 y a representa el radio de los granos de polvo.

Havnes mostró que el polvo participa en el comportamiento colectivo del plasma cuando $P_H \sim 1$ y, por lo tanto, se tiene un plasma polvoso. Cuando el parámetro de Havnes adquiere valores numéricos muy pequeños ($P_H \ll 1$) los granos de polvo pueden ser tratados como partículas aisladas y se tiene polvo en el plasma (Havnes, 1984).

Una vez que el polvo adquiere su carga eléctrica, pueden presentarse tres efectos físicos que contribuyen a la creación y destrucción continua de granos. Estos efectos son conocidos como: levitación, coagulación y ruptura electrostática (Graps et al., 2008).

El trabajo presentado en esta tesis se enfoca al estudio de la física básica del comportamiento de los granos de polvo como entes aislados dentro de la magnetosfera de Saturno, sin considerar efectos colectivos ni analizar la interacción polvo-plasma. Si se considera que existe *polvo en el plasma*, es posible analizar la dinámica de los granos de polvo bajo el concepto de “partícula independiente”, con la suposición de que la carga eléctrica del grano permanece constante una vez que éste ha interactuado con el plasma magnetosférico.

5.2. Dinámica del polvo en la magnetosfera de Saturno

El movimiento del polvo que se encuentra sumergido en un ambiente magnetosférico es dominado por las fuerzas gravitacionales y electromagnéticas del medio, y ha sido explicado a partir de los trabajos que se hicieron para describir la dinámica de las partículas cargadas en

5.2. Dinámica del polvo en la magnetosfera de Saturno

la magnetosfera terrestre. A principios del siglo XX, Carl Størmer (1874-1957), inicialmente interesado en los experimentos en la Terrella de Kristian Birkeland para describir las auroras polares, estudió el tipo de trayectorias que describen las partículas relativistas (rayos cósmicos) que arriban constantemente del espacio exterior e interaccionan con el campo magnético (dipolar) de la Tierra, (Egeland y Burke , 2013). En su trabajo Størmer no consideró la fuerza gravitacional ni la rotación de la magnetosfera terrestre, tomando unicamente a la fuerza magnética como la única influencia en el comportamiento dinámico de las partículas.

Posteriormente, A. V. Artem'ev estudió el mismo problema incluyendo el efecto de la fuerza gravitacional planetaria y la fuerza magnética. Con este modelo, se pudieron definir las regiones permitidas para el movimiento de micrometeoroides y otros cuerpos en el campo magnético dipolar planetario. Desafortunadamente, Artem'ev no incluyó la rotación de la magnetosfera, despreciando así el papel importante que desempeña el campo eléctrico corrotacional del planeta en la dinámica de los cuerpos estudiados (Artem'ev, 1968).

Años más tarde (1974), Asoka Mendis y William Ian Axford modificaron el modelo de Artem'ev al incluir la fuerza eléctrica corrotacional para describir el comportamiento dinámico de una partícula de polvo en una magnetosfera planetaria (Mendis y Axford, 1974). El fenómeno que Mendis y Axford describieron es conocido como *captura magnetosférica*, en el cual se resuelve la ecuación que describe el movimiento de los micrometeoroides que son capturados por el campo gravitacional planetario, y donde las soluciones a la ecuación de movimiento bajo este modelo describen las regiones de captura o eyección de las partículas cargadas dentro de una magnetosfera planetaria.

Es importante destacar que el modelo gravito-electrodinámico de Mendis y Axford ha sido utilizado en diversas ocasiones para describir el comportamiento del polvo en fenómenos físicos como lo son: el modelado y caracterización de estructuras de polvo en los anillos de Júpiter y Saturno (Hill y Mendis, 1979a,b, 1980; Mendis et al., 1982, 1983), así como en el tamaño y la velocidad de las partículas de polvo que forman los haces que escapan de las magnetosferas joviana y kroniana (Maravilla et al., 1995; Maravilla y Flandes, 2005; Horányi, 2000), por citar algunos trabajos.

5.2.1. Modelo de Mendis y Axford

De acuerdo a este modelo y considerando que el eje del campo magnético es dipolar aproximadamente y coincide con el eje de rotación del planeta, la ecuación de movimiento para un micrometeoroides de masa m que penetra en la magnetosfera planetaria, y que adquiere inmediatamente su carga eléctrica Q , puede ser expresada como:

$$m\ddot{\mathbf{r}} = \mathbf{F}_L + \mathbf{F}_G + \mathbf{F}_{PR} + \mathbf{F} \quad (5.5)$$

donde \mathbf{F}_L es la fuerza de Lorentz, \mathbf{F}_G es la fuerza gravitacional, \mathbf{F}_{PR} es la fuerza de presión de radiación y \mathbf{F} es el término debido a otras fuerzas como la fuerza de arrastre coulombiano y las fuerzas colisionales.

Originalmente en el modelo, los dos últimos terminos se despreciaron debido a que son muy pequeños en comparación con las otras dos fuerzas y no contribuyen a la dinámica de las partículas en el ambiente magnetosférico (Hill y Mendis, 1979a,b; Mendis et al., 1982). Por lo tanto la ecuación (5.5) queda expresada como:

$$m\ddot{\mathbf{r}} = Q (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) - \frac{GMm}{r^3} \mathbf{r} \quad (5.6)$$

donde M es la masa planetaria, \mathbf{v} es la velocidad del grano, \mathbf{E} es el campo eléctrico corrotacional que esta dado por la expresión:

$$\mathbf{E} = -\frac{(\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}) \times \mathbf{B}}{c} \quad (5.7)$$

G es la constante de gravitación universal, $\boldsymbol{\Omega}$ es la velocidad angular del planeta, \mathbf{r} es la distancia del centro del planeta al grano y \mathbf{B} es el campo magnético planetario considerado dipolar y dado como:

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 \left(\frac{R}{r} \right)^3 \quad (5.8)$$

donde R representa el radio del planeta.

Sustituyendo las ecuaciones (5.7) y (5.8) en (5.6), la ecuación de movimiento queda expresada de la siguiente manera:

$$\ddot{\mathbf{r}} = \frac{Q}{mc} \left[-(\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}) + \mathbf{v} \right] \times \mathbf{B} - \frac{GM}{r^3} \mathbf{r} \quad (5.9)$$

Con esta ecuación se describe el movimiento de granos cargados en regiones donde la densidad del polvo es tan baja que los efectos colectivos en el plasma magnetosférico no son importantes.

Las soluciones del modelo muestran que las partículas cargadas positivamente son atrapadas en la magnetosfera terrestre mientras que aquellas que poseen carga negativa escapan de ella. Para el caso de Saturno ocurre el caso contrario debido a que el eje magnético es antiparalelo al eje de rotación y el campo eléctrico corrotacional apunta radialmente hacia

afuera del planeta (Mendis y Axford, 1974).

5.3. Modelo Gravito-electrodinámico kroniano

Como se vio en el capítulo anterior (ver sección 4.3.2, pag. 105), Saturno posee un conjunto de anillos compuestos de polvo producto de la erosión por bombardeo de micrometeoroides en la superficie de algunos satélites y de los anillos principales, así como de las resonancias gravitacional y electromagnética que mantienen confinadas a las partículas de polvo formando estructuras anulares en el plano ecuatorial del planeta.

Para poder definir las condiciones en las que se encuentra el polvo en el ambiente magnetosférico de Saturno, es necesario calcular los parámetros que determinan si en la región de la magnetosfera a estudiar, se tiene polvo en el plasma o un plasma polvoso (sección 5.1).

En los estudios de Graps y Grun, 2000; Krüger et al., 2004 y Graps et al., 2008 se muestran algunas características tanto del polvo como del plasma magnetosférico de Saturno para regiones localizadas a 3 y 10 R_S , que corresponden a la ubicación aproximada de los satélites Egeón (2.77 R_S) y Rea (8.74 R_S), respectivamente. En estas mismas regiones se localizan el anillo G (2.73 a 3 R_S) y el anillo E (3 a 11.6 R_S), anillos tenues formados por partículas de polvo micrométricas y submicrométricas (ver capítulo 4, sección 4.3.2, pag. 105).

El parámetro de Havnes calculado en los estudios mencionados anteriormente, toma los valores de $P_H=10^{-2}$ a 3 R_S y $P_H=10^{-5}$ a 10 R_S . Para ambas regiones, $P_H \ll 1$, lo que indica que la concentración de los granos inmersos en el ambiente magnetosférico Kroniano es lo suficientemente baja para asumir que se tiene *polvo en plasma*, y que por lo tanto, es posible realizar el estudio de la dinámica del grano como una partícula aislada o partícula independiente.

Adicionalmente, las observaciones y estudios tanto remotos de observatorios terrestres, como *in situ*, realizados por naves espaciales como las *Viajero* y *Cassini*, han mostrado que la composición de los granos de polvo que forman las estructuras polvosas en Saturno comparten las mismas características que los cuerpos mayores que las originan, es decir, los anillos principales y los satélites (capítulos 3 y 4). Por esto mismo, consideraremos que los granos de polvo estudiados en este trabajo están compuestos por hielo de agua con una densidad $\rho = 1 \text{ g/cm}^3$, y que por simplicidad, asumiremos que tienen geometría esférica con radio a .

Antes de aplicar el modelo gravito-electrodinámico, es necesario establecer algunas condiciones(figura 5.1): se toma un sistema de referencia inercial centrado en el planeta, la geometría del planeta es esférica y de radio R , el campo magnético planetario es dipolar y se

encuentra alineado con el eje de rotación del planeta (axisimétrico). Para simplificar el modelo, sólo se consideran las fuerzas gravitacional y electromagnética como las únicas fuerzas que contribuyen de manera relevante en la dinámica de los granos.

Aún cuando la adquisición de la carga en los granos de polvo depende de las condiciones del plasma ambiental, asumiremos que los granos adquieren instantáneamente una carga eléctrica Q que permanece constante ($Q = Q_0$).

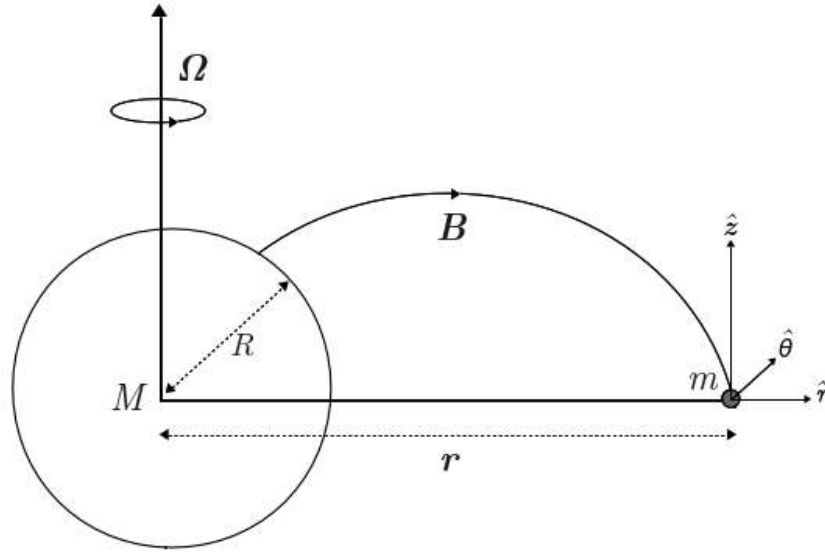


Figura 5.1: Imagen que muestra el esquema de la configuración del modelo gravito-electrodinámico.

Bajo estas condiciones, la ecuación de movimiento para un grano de polvo se expresa como:

$$m\ddot{\mathbf{r}} = \frac{Q_0}{c} \left[-(\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}) + \mathbf{v} \right] \times \mathbf{B} - \frac{GMm}{r^3} \mathbf{r} \quad (5.10)$$

donde Q_0 es la carga eléctrica, m la masa del grano, M la masa de Saturno, \mathbf{v} la velocidad del grano, y \mathbf{B} y $\boldsymbol{\Omega}$ son el campo magnético dipolar y la velocidad angular kronianos, respectivamente, que se expresan de la siguiente manera:

$$\mathbf{B} = -B_0 \left(\frac{R}{r} \right)^3 \hat{\mathbf{z}} \quad (5.11)$$

$$\boldsymbol{\Omega} = \Omega \hat{\mathbf{z}} \quad (5.12)$$

5.3. Modelo Gravito-electrodinámico kroniano

en estas ecuaciones, B_0 y Ω son la magnitud del campo magnético en el ecuador y la magnitud de la velocidad angular, respectivamente, y R es el radio de Saturno.

Sustituyendo las expresiones del campo magnético (5.11) y la velocidad angular (5.12) en la ecuación de movimiento (5.10) y tomando las componentes radial y transversal de esta misma, obtenemos las siguientes ecuaciones:

$$\ddot{r} - r\dot{\theta}^2 = \frac{A(\dot{\theta} - \Omega) - GM}{r^2} \quad (5.13)$$

y

$$\frac{d}{dt}(r^2\dot{\theta}) = -\frac{A\dot{r}}{r^2} \quad (5.14)$$

donde el parámetro A queda expresado como:

$$A = -\frac{Q_0 B_0 R^3}{mc} \quad (5.15)$$

Velocidad inicial de los granos de polvo

Asumiendo que los granos de polvo son emitidos a una distancia inicial r_0 , que corresponde con la distancia de la fuente de polvo respecto al centro de Saturno, observemos que la magnitud de la velocidad inicial de los granos (v_0) se puede definir a partir de la magnitud de la velocidad orbital de la fuente (v_{orb}) y de la magnitud de la velocidad de escape de los granos respecto a la fuente de polvo (v_e).

La velocidad orbital para un cuerpo (fuente de polvo) que orbita Saturno a una distancia r_0 está dada por la siguiente expresión:

$$v_{orb} = \sqrt{\frac{KGM}{r_0}} \quad (5.16)$$

donde $K=1$ corresponde a la velocidad kepleriana, y M representa la masa de Saturno.

Por otra parte, la velocidad de escape (v_e) del grano desde la fuente de polvo se expresa como:

$$v_e = \sqrt{\frac{2GM_f}{R_f}} \quad (5.17)$$

donde M_f y R_f representan la masa y el radio de la fuente de polvo.

Utilizando los datos mostrados en el Cuadro 3.1 para calcular dichas velocidades (considerando que las fuentes de polvo siguen órbitas keplerianas $K=1$), podemos observar que

la velocidad orbital (v_{orb}) de los satélites grandes de Saturno (o inclusive de las rocas que componen los anillos principales) es por lo menos tres órdenes de magnitud mayor que la velocidad de escape (v_e) desde estos cuerpos. De acuerdo a este resultado, asumiremos que los granos de polvo tienen la energía suficiente para escapar de la influencia gravitacional de estos cuerpos y, por lo tanto, son eyectados con la velocidad orbital de las fuentes, esto es:

$$v_0 = \sqrt{\frac{GM}{r_0}} \quad (5.18)$$

Asumiendo esta situación, observemos que las condiciones que le hemos impuesto al modelo indican que los granos de polvo están condicionados a moverse en el plano ecuatorial planetario (r, θ) (Figura 5.1), y que la velocidad inicial de los granos se puede expresar de la siguiente manera:

$$\mathbf{v}_0 = v_{0r} \hat{\mathbf{r}} + v_{0\theta} \hat{\boldsymbol{\theta}} \quad (5.19)$$

donde v_{0r} y $v_{0\theta}$ representan las componentes radial y transversal de la velocidad inicial, que se expresan como:

$$v_{0r} = v_0 \cos\theta = \sqrt{\frac{GM}{r_0}} \cos\theta \quad \text{y} \quad v_{0\theta} = v_0 \sin\theta = \sqrt{\frac{GM}{r_0}} \sin\theta \quad (5.20)$$

Integrando la ecuación (5.14) de r_0 a r y definiendo el parámetro $x = \frac{r}{r_0}$, la componente transversal de la velocidad toma la siguiente expresión:

$$v_\theta = r\dot{\theta} = \frac{A(1-x)}{r_0^2 x^2} + \frac{1}{x} \sqrt{\frac{GM}{r_0} \sin\theta} \quad (5.21)$$

donde se ha sustituido la componente transversal de la velocidad inicial ($v_{0\theta}$).

Si despejamos $\dot{\theta}$ de la ecuación 5.21 y se sustituye en (5.13) e integrando el resultado de r_0 a r y reemplazando $v_r = \dot{r}$, se obtiene la siguiente expresión para la componente radial de la velocidad.

$$v_r^2 = v_0^2 \cos^2\theta - \frac{A^2(1-x)^2}{r_0 x} - \frac{2Av_0 \sin\theta(1-x)}{r_0^2 x^3} - \frac{v_0^2 \sin^2\theta(1-x^2)}{x^2} + \frac{2(A\Omega + GM)(1-x)}{r_0 x} \quad (5.22)$$

5.3. Modelo Gravito-electrodinámico kroniano

a continuación, si sustituimos los parámetros:

$$p = \frac{A\Omega}{GM}, \quad L_0 = \frac{r_0}{R} \quad \text{y} \quad \alpha = \frac{GM}{\Omega^2 R^3}$$

en la ecuación (5.22), la componente radial de la velocidad la podemos expresar de la siguiente forma:

$$\left(\frac{r_0}{GM}\right) v_r^2 = x^2 (x^2 - \text{sen}^2\theta) + 2x^3 (1-x) + \frac{2(1-x)}{x} \left(1 - \sqrt{\frac{1}{L_0^3} \frac{\alpha \text{sen}\theta}{x^2}}\right) p - \frac{\alpha^2}{L_0^3} \left(\frac{(1-x)^2}{x}\right) p^2 \quad (5.23)$$

El parámetro p se puede interpretar físicamente como la relación entre la fuerza eléctrica corrotacional F_L y la fuerza gravitacional F_G , mientras que L_0 , llamado parámetro magnético o parámetro de McIlwain, indica la distancia a la cual se encuentra la fuente de eyección de los granos de polvo respecto al centro del planeta.

Aún cuando L_0 es un parámetro adimensional, es utilizado para definir la distancia en radios planetarios (R_p) a la cual las líneas del campo magnético cruzan el ecuador magnético planetario (McIlwain, 1966).

Como la velocidad de los granos es diferente de cero, entonces $v_r^2 \geq 0$ y por lo tanto, el lado derecho de la ecuación (5.23) es mayor o igual a cero. Reagrupando los términos en torno al parámetro p obtenemos la siguiente relación:

$$p^2 - \frac{2L_0^3}{\alpha^2} \frac{x}{1-x} \left(x^2 - \alpha \sqrt{\frac{1}{L_0^3} \text{sen}\theta_0}\right) p - \frac{L_0^3}{\alpha^2} \frac{x^2}{1-x^2} (x^2 \text{sen}^2\theta_0 + 2x(1-x)) \leq 0 \quad (5.24)$$

considerando que los granos de polvo son eyectados en la dirección $\theta = \theta_0$.

Esta relación (ec. 5.24), es una cuadrática en p para valores determinados de x cuando L_0 y θ_0 adquieren valores fijos, y puede ser expresada como $F = F(p, x)$. Por lo tanto, las soluciones de $F(p, x) = 0$ son: $p_1(x)$ y $p_2(x)$ expresadas por la siguiente relación:

$$\begin{aligned}
 p_{1,2}(x) = & \frac{L_0^3}{6(x-1)^2} \left\{ - \left(x^4 - x^3 - \sqrt{\frac{GM}{r_0}} \text{sen}\theta_0 \frac{x(x-1)}{r_0\Omega} \right) \pm \right. \\
 & \pm \left[\left(x^4 - x^3 - \sqrt{\frac{GM}{r_0}} \text{sen}\theta_0 \frac{x(x-1)}{r_0\Omega} \right)^2 + \right. \\
 & \left. \left. + \frac{12(x-1)^2}{L_0^3} \left(x^4 \frac{\cos^2\theta_0}{2} + \frac{1}{2} \text{sen}^2\theta_0 x^2 (x^2 - 1) + x^3 - x^4 \right) \right]^{1/2} \right\}
 \end{aligned} \tag{5.25}$$

Graficando las soluciones de la ecuación (5.25) para diferentes valores de x , se construyen las gráficas de p vs x para encontrar aquellas regiones donde las partículas de polvo pueden quedar confinadas, o bien, escapar de la magnetosfera planetaria.

Adicionalmente, sustituyendo la expresión del parámetro A en la de p , se llega a la siguiente relación:

$$p = -\frac{Q_0 B_0 R^3 \Omega}{GMmc} \tag{5.26}$$

Como se mencionó anteriormente, si los granos están compuestos por hielo de agua ($\rho = 1 \text{ g/cm}^3$) y presentan una geometría esférica con radio a , la masa y la carga eléctrica quedan expresadas de la siguiente manera:

$$m = \rho V = \frac{4}{3}\pi a^3 \rho \quad \text{y} \quad Q_0 = \Phi a$$

De tal forma que sustituyendo m y Q_0 en la ecuación (5.26), la expresión para p queda como:

$$p = -\left(\frac{3B_0 R^3 \Omega}{4\pi\rho GMc} \right) \frac{\Phi}{a^2} \tag{5.27}$$

Notemos ahora, que una vez encontrados los valores de las soluciones $p_1(x)$ y $p_2(x)$ obtenidos con la ecuación (5.25), es posible conocer los valores para los radios de los granos de polvo que quedan confinados y para los que escapan de la magnetosfera planetaria.

Condiciones del confinamiento y eyección de los granos de polvo

Cuando el parámetro p adquiere valores numéricos muy pequeños ($p \ll 1$), representa físicamente que la fuerza electromagnética (\mathbf{F}_L) sólo produce una perturbación en el movi-

5.3. Modelo Gravito-electrodinámico kroniano

miento del grano de polvo en comparación con el efecto de la fuerza gravitacional (\mathbf{F}_G), que en este caso, domina el comportamiento dinámico del grano. Bajo esta condición los granos de polvo se moverán alrededor de Saturno en órbitas keplerianas.

En el otro caso, cuando p adquiere valores numéricos muy grandes ($p \gg 1$), la fuerza gravitacional es la que genera una perturbación en el movimiento del grano, comparada con la fuerza electromagnética que ahora es la que domina la dinámica de los granos de polvo. Por lo cual los granos de polvo actúan como partículas del plasma magnetosférico (iones y electrones), los cuales giran alrededor de las líneas del campo magnético planetario siguiendo el movimiento descrito por la aproximación de centro-guía o movimiento adiabático de partículas cargadas (Northrop, 1963) (ver Figura 2.17, pag. 40). Ambas condiciones establecen el criterio para el cual los granos de polvo quedarían atrapados.

Entre estos dos casos, el parámetro p adquiere valores en el intervalo $p_{min} < p < p_{max}$. Como la ecuación 5.27 establece una relación entre p y el radio de los granos (a), entonces el intervalo para p define un intervalo para el radio de los granos de polvo ($a_{min} < a < a_{max}$). Este intervalo representa el tamaño de los granos que escapan del medio magnetosférico saturniano al medio interplanetario.

El radio máximo de los granos que escapan (a_{max}) se determina al considerar que la fuerza electromagnética domina sobre la fuerza gravitacional en la dinámica de las partículas ($\mathbf{F}_L > \mathbf{F}_G$). Esto ocurre cuando $p \geq \frac{2.66 \times 10^{-3}}{a^2}$, cuyo valor corresponde con el radio de grano $a_{max} = 80$ nm.

Para determinar el radio mínimo de los granos que escapan (a_{min}) es necesario encontrar el límite para el cual las partículas dejan de comportarse como partículas del plasma. Para ello se tiene que cumplir que el tamaño de las órbitas en el movimiento descrito por la aproximación de centro-guía, sea más pequeño que la longitud característica de las variaciones del campo magnético, esto es, cuando $r_g |\frac{\nabla \mathbf{B}}{\mathbf{B}}| < 0.1$, donde r_g es el radio de giro de los granos y \mathbf{B} es el campo magnético dipolar planetario.

Esta condición se cumple para granos cuyo radio está dado por la siguiente expresión:

$$a_{min} = \left(\frac{10^{-3} B_0 R^3 \phi}{4\pi r^2 \rho \omega c} \right)^{1/2} \quad (5.28)$$

donde ω es la velocidad relativa entre el campo magnético corrotacional y el grano de polvo.

Observemos que la condición que nos da el radio máximo de granos que escapan de la magnetosfera (a_{max}) es independiente de las fuentes de polvo, mientras que el valor que adquiere el radio mínimo (Ecuación 5.28) depende de la distancia a Saturno (r), y por lo tanto, de la ubicación de las fuentes de polvo.

5.4. Fuentes de polvo

Durante la aproximación de *Cassini* a Saturno en 2004, los detectores de polvo registraron impactos de partículas moviéndose a velocidades cercanas a los 70 km/s (Kempf et al., 2005). Los trabajos recientes muestran que estas partículas (granos) de polvo, son cargadas eléctricamente por la magnetosfera de Saturno y expulsadas fuera de ella por el campo eléctrico corrotacional. Se ha demostrado que estos haces de polvo podrían ser originados por la eyección de material en el polo sur de Encelado, así como por la eyección de partículas de polvo producto del impacto de micrometeoroides con la superficie de algunos satélites y anillos (Maravilla y Flandes, 2005). Anteriormente, la nave espacial *Ulyses* observó el mismo fenómeno en Júpiter (Grun et al., 1993; Maravilla et al., 1995), donde el responsable de la eyección de las partículas fuera de la magnetosfera joviana es el vulcanismo en el satélite Io (Flandes y Maravilla, 2004; Krüger et al., 2004).

Empleando los resultados obtenidos en las investigaciones mencionadas anteriormente, en este trabajo supondremos que las fuentes de polvo en el medio magnetosférico kroniano son los primeros cinco satélites grandes (Mimas, Encelado, Tetis, Dione y Rea), así como el borde externo del anillo A, y cuyas características físicas se muestran en los cuadros (3.1, pag.55) y (4.1, pag.97), respectivamente. Se toma el borde externo del anillo A porque otras regiones de los anillos principales no contribuyen al polvo que escapa hacia el medio magnetosférico, debido a que están asociadas a interacciones gravitacionales (resonancias) con algunos satélites de Saturno y el material polvoso queda confinado en alguna región (o regiones) de los anillos. Adicionalmente, se incluye como una posible fuente de polvo al satélite Egeón, ya que de acuerdo a Hedman y colaboradores (Hedman et al., 2009a) este satélite podría ser uno de los cuerpos responsables en proveer el polvo que forma el anillo G.

En el Cuadro 5.1 se muestran las distancias a Saturno y el valor del parámetro magnético para las fuentes de polvo propuestas en este trabajo.

Considerando que los granos de polvo son eyectados en la dirección del movimiento orbital de las fuentes, esto es $\theta_0 = \pi/2$ y reemplazando este valor en la ecuación (5.25), las soluciones a la ecuación de movimiento quedan expresadas de la siguiente manera:

$$p_{1,2}(x) = \frac{L_0^3}{\alpha^2} \frac{x}{1-x} \left(x^2 - \frac{\alpha}{L_0^{3/2}} \right) \pm \frac{1}{2} \sqrt{\left[\frac{2L_0^3}{\alpha^2} \frac{x}{1-x} \left(x^2 - \frac{\alpha}{L_0^{3/2}} \right) \right]^2 - \frac{4L_0^3 x^2}{\alpha^2}} \quad (5.29)$$

5.4. Fuentes de polvo

Fuentes de polvo	Características	
	Distancia radial (cm)	Parámetro magnético (L_0)
Anillo A (borde externo)	1.37×10^{10}	2.27
Egeón (anillo G)	1.68×10^{10}	2.77
Mimas	1.86×10^{10}	3.08
Encelado	2.38×10^{10}	3.95
Tetis	2.95×10^{10}	4.88
Dione	3.77×10^{10}	6.26
Rea	5.27×10^{10}	8.74

Cuadro 5.1: Características físicas de las fuentes de polvo.

Algunos estudios han mostrado que los principales mecanismos de adquisición de carga eléctrica de los granos de polvo son: la emisión electrónica secundaria, la fotoionización y la captura electrónica e iónica, entre otros. Debido a esto, el potencial electrostático superficial del grano (Φ) depende de las propiedades locales del plasma magnetosférico, es decir, de la distancia a Saturno (Graps et al., 2008). Si bien el valor de este potencial no se encuentra fijo dentro de la magnetosfera interna de Saturno, en este trabajo asumiremos que para granos esféricos de todos los tamaños y originados por diferentes fuentes, estos adquieren el potencial máximo promedio de $\Phi = +5V$ en la región donde se localizan las fuentes de polvo propuestas (Cuadro 5.1) suponiendo que la composición de los granos es de hielo de agua (Kempf et al., 2006).

En este mismo sentido, considerando el valor para dicho potencial y tomando los valores mostrados en el cuadro 5.2 en unidades cgs, la relación entre el parámetro p y el radio de los granos a , (ec. 5.27), queda expresada como:

$$p = -2.67 \times 10^{-3} \frac{\Phi (V)}{a^2 (\mu m)} \quad (5.30)$$

y por lo tanto, el radio de los granos en función del valor absoluto del parámetro p es:

$$a = \frac{0.0516}{|p|^{1/2}} \quad (5.31)$$

Parámetro (cgs)		Valor
Saturno		
Radio	R [cm]	6.03×10^9
Masa	M [g]	5.66×10^{29}
Velocidad angular	Ω [rad/s]	1.69×10^{-4}
Intensidad de campo magnético	B_0 [gauss]	0.21
Constantes físicas		
Gravitación universal	G [cm ³ /g s ²]	6.67×10^{-8}
Velocidad de la luz	c [cm/s]	3×10^{10}

Cuadro 5.2: Características físicas de Saturno y constantes físicas en unidades cgs (Datos obtenidos de Maravilla y Flandes, 2005; Horányi et al., 2009; Murray y Dermott, 1999).

Es interesante destacar que, dependiendo de la configuración del campo magnético planetario y la polaridad de la carga de los granos de polvo, el modelo gravito-electrodinámico permite calcular la velocidad radial y el tiempo de escape de la magnetosfera planetaria de aquellos granos de polvo que son eyectados. En el caso de Saturno, la fuerza eléctrica corrotacional apunta radialmente hacia afuera para granos de polvo de todos los tamaños y con carga eléctrica positiva, provocando que estos granos alcancen fácilmente los límites exteriores de la magnetosfera en cierto tiempo y con cierta velocidad.

Cuando los granos de polvo mencionados han alcanzado la frontera externa de la magnetosfera de Saturno ($L_0 = 50 R_S$) y están a punto de escapar de la influencia del sistema kroniano, la fuerza electromagnética es mucho mayor que la fuerza gravitacional ($A\Omega \gg GM$) y la velocidad angular planetaria es también mucho mayor que la velocidad angular de las partículas ($\Omega \gg \dot{\theta}$) para granos de todos los tamaños (Maravilla y Flandes, 2005).

En estas condiciones, la componente radial de la ecuación de movimiento (Ec. 5.13) se convierte en:

$$\ddot{r} = -\frac{A\Omega}{r^2} \quad , \text{ como: } \quad \ddot{r} = v_r \frac{dv_r}{dr}$$

esta ecuación queda expresada de la siguiente manera:

$$v_r \frac{dv_r}{dr} = -\frac{A\Omega}{r^2} \tag{5.32}$$

5.4. Fuentes de polvo

Integrando la ecuación 5.32 de r_0 a r , se obtiene:

$$\frac{1}{2} (v_r^2 - v_{r0}^2) = - \int_{r_0}^r \frac{A\Omega}{r^2} dr = A\Omega \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_0} \right) \quad (5.33)$$

entonces, la velocidad radial con respecto a Saturno de los granos que escapan en cualquier momento, suponiendo una velocidad radial inicial $v_{r0} = 0$ en el punto r_0 , puede ser expresada como:

$$v_r = \frac{dr}{dt} = \left[2A\Omega \left(\frac{r_0 - r}{r_0 r} \right) \right]^{1/2} \quad (5.34)$$

Considerando los parámetros del cuadro 5.2 y suponiendo que la frontera externa de la magnetosfera de Saturno se localiza en $r = L_0 = 50 R_S$, entonces podemos construir una relación simple entre el radio ($a[\mu m]$) y la velocidad radial ($v_r[km/s]$) de los granos de polvo que escapan. Sustituyendo estos valores en la ec. 5.34, la relación se expresa de la siguiente forma:

$$v_r = 1.84 \sqrt{\frac{L_0 - r_0}{r_0 L_0}} \cdot a^{-1} \quad (5.35)$$

Integrando la ecuación 5.34 y resolviendo para t , se obtiene que el tiempo ($t_r [s]$) que le toma a los granos de polvo alcanzar el límite de la magnetosfera kroniana ($L_0 = 50 R_S$) en función del tamaño de los granos ($a [\mu m]$) queda expresado como:

$$t_r = 1.2 \times 10^7 \sqrt{\frac{r_0}{50 - r_0}} a \quad (5.36)$$

donde se han sustituido los parámetros del cuadro 5.2 y las unidades están en *cgs*.

Capítulo 6

Resultados

6.1. Resultados y discusión de resultados

Al aplicar las soluciones de la ecuación de movimiento del modelo gravito-electrodinámico (Ec. 5.29) a las fuentes de polvo seleccionadas (cuadro 5.1) y tomando los parámetros mostrados en el cuadro 5.2, se construyeron las gráficas de p vs x que se muestran en la figura 6.1. En estas gráficas, se observa que las regiones donde los granos de polvo quedarían atrapados o escapan están representadas por las soluciones $p_1(x)$ y $p_2(x)$ de la ecuación de movimiento. $x = 1$ corresponde con el punto de eyección de los granos de polvo. Los granos que adquieren carga negativa ($Q_0 < 0$) corresponden geoméricamente a la región de las gráficas donde $x \leq 1$ y $p > 0$, y para los granos que adquieren carga positiva ($Q_0 > 0$) la región correspondiente es cuando $x \geq 1$ y $p < 0$.

En las figuras 6.2 y 6.3, se muestran las gráficas de las soluciones $p_1(x)$ y $p_2(x)$ para $L_0 = 2.77 R_S$, que corresponde a la órbita del satélite Egeón que forma parte del anillo G. En estas gráficas el área sombreada corresponde a la región físicamente permitida, mientras que la región no sombreada es una solución que no tiene interpretación física, y donde los granos de polvo no tienen acceso a ella. Adicionalmente, en la Figura 6.2 se indica con flechas las regiones donde los granos quedarían atrapados y aquellas donde escapan de la magnetosfera kroniana.

6.1. Resultados y discusión de resultados

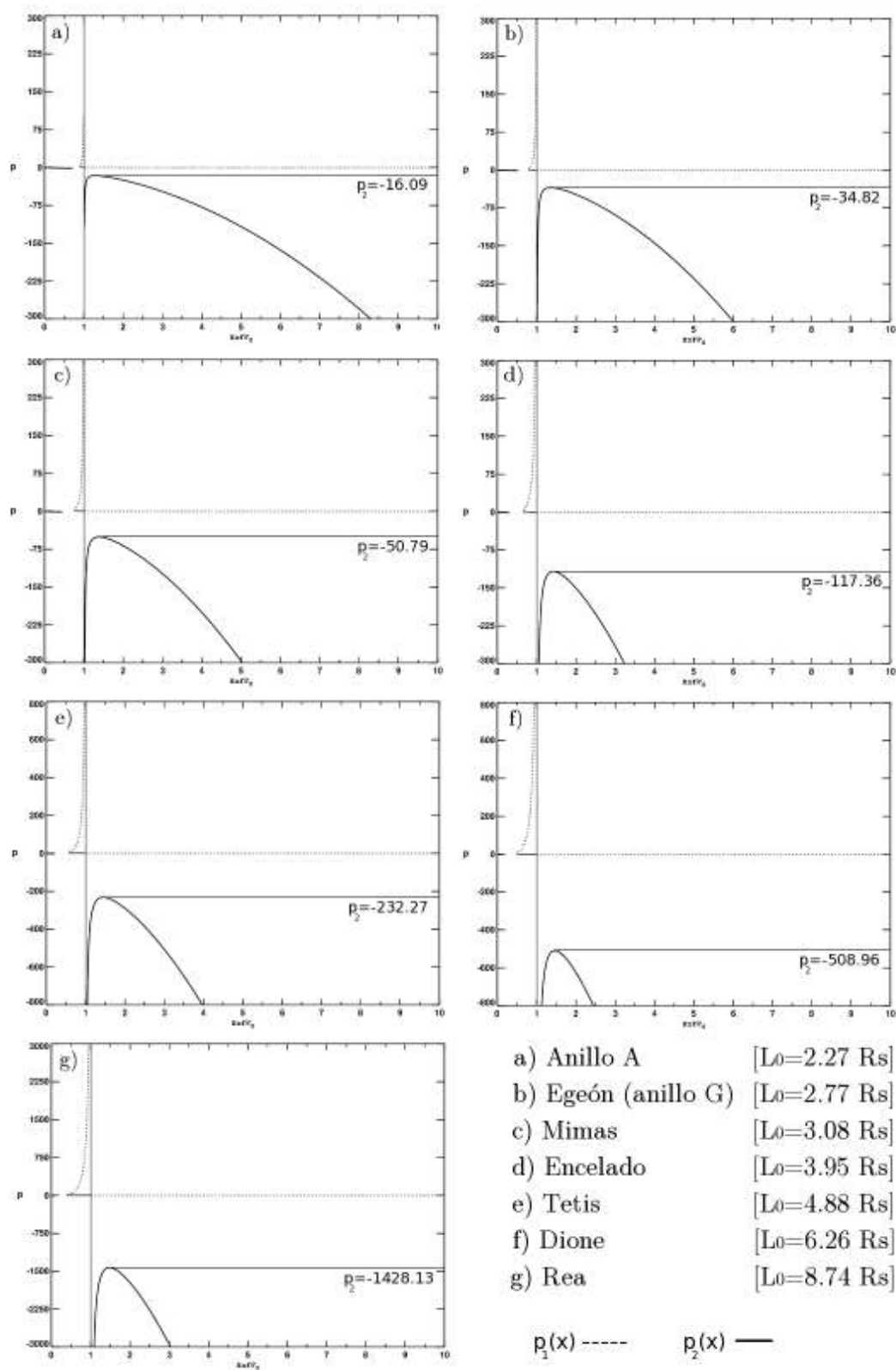


Figura 6.1: Gráficas de p vs x , de las soluciones del modelo gravito-electrodinámico para las fuentes de polvo seleccionadas. Las líneas punteadas corresponden a $p_1(x)$ y las continuas a $p_2(x)$. También se muestra el nombre de las fuentes de polvo con el valor del parámetro magnético (L_0) correspondiente.

La zona de escape corresponde con los valores de $p < 0$ (granos cargados positivamente) en el intervalo $p_{1\min} \leq p \leq p_{2\max}$. En esta región, la componente radial de la fuerza eléctrica corrotacional apunta radialmente hacia afuera, y por lo tanto la fuerza de gravedad “efectiva” sobre los granos decrece, provocando que los granos sean eyectados de la magnetosfera. Para los granos con carga negativa ($p > 0$), la fuerza eléctrica corrotacional está dirigida hacia el planeta y la fuerza gravitacional “efectiva” se incrementa, provocando que los granos describan órbitas no periódicas en una región acotada por $x \leq 1$ y $p_1(x)$. Dentro de esta región, los granos más grandes se mueven entre el punto de eyección y el punto que corresponde a la mitad de la distancia comprendida entre el punto de eyección y la superficie planetaria (x_S), mientras que los más pequeños se mueven más cerca de las líneas de campo magnético y son “atrapados” por ellas (Maravilla et al., 1995).

Cuando p adquiere valores numéricos muy grandes, las trayectorias de los granos se hacen mucho más pequeñas y el movimiento de estos puede ser descrito en el caso límite por la aproximación adiabática de partículas cargadas (Northrop, 1963), es decir, como un giro alrededor de un centro guía donde, este centro guía deriva alrededor del planeta con una velocidad cercana a la velocidad de corrotación.

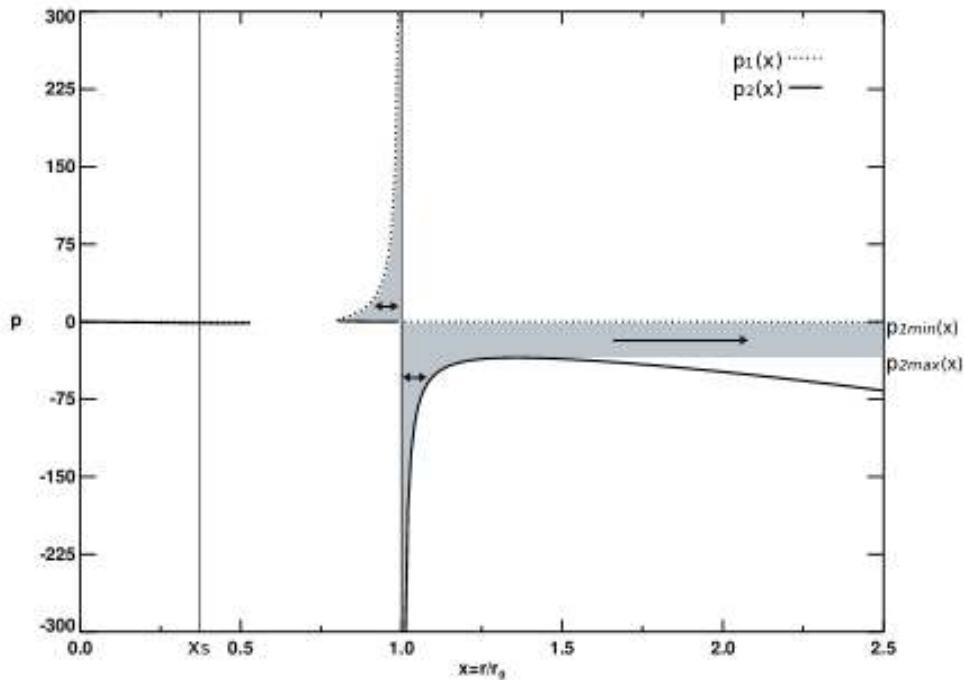


Figura 6.2: Topología de las órbitas para granos de polvo lanzados desde Egeón ($L_0 = 2.77 R_S$). Las regiones sombreadas en el plano p - x corresponden a las regiones donde las órbitas reales pueden existir. El punto de lanzamiento está en $x = 1$ y las flechas indican la dirección de desplazamiento de los granos.

6.1. Resultados y discusión de resultados

En la Figura 6.3 se muestra la gráfica de las soluciones del modelo bajo dos escalas diferentes en el parámetro p para las regiones que corresponden con granos de polvo cargados positivamente. Se realizó un acercamiento en la solución $p_1(x)$ para poder apreciar la región geométrica que representa a los granos que quedan atrapados y cuyo radio es mayor a $0.08 \mu\text{m}$ (80 nm).

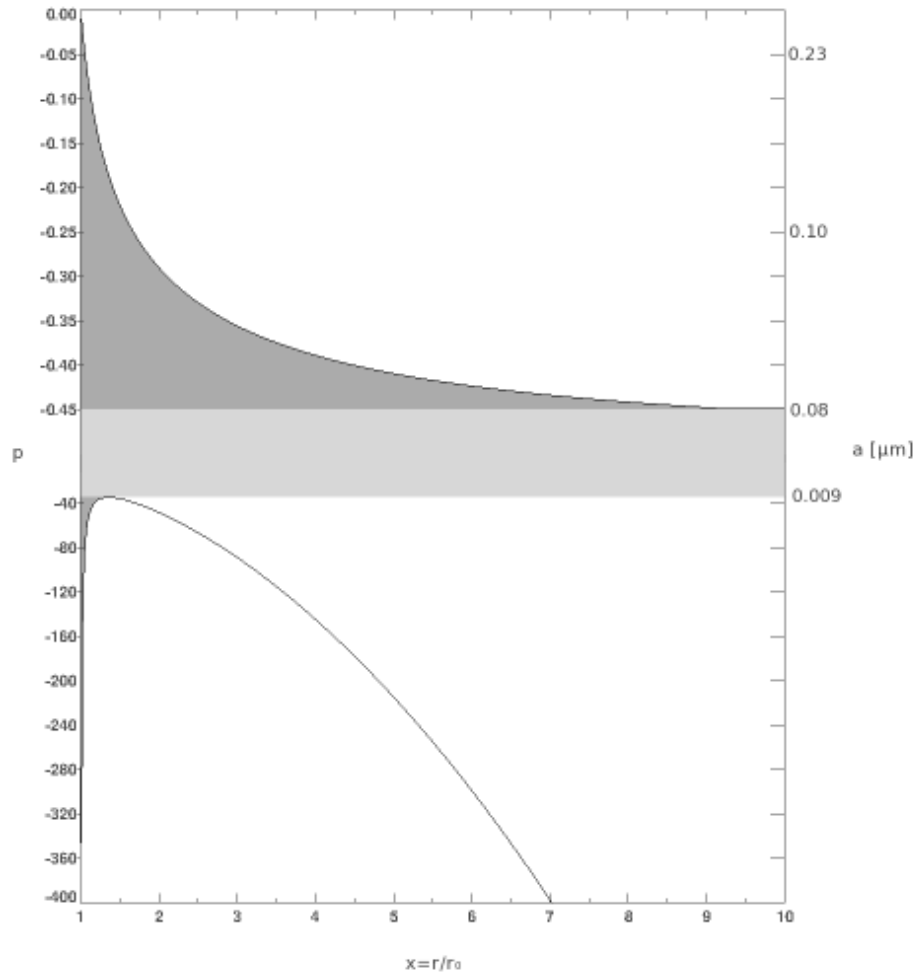


Figura 6.3: Gráfica de las soluciones del modelo para Egeón como la fuente del polvo. En la imagen se muestran las soluciones $p_1(x)$ y $p_2(x)$ bajo dos diferentes escalas para $x > 1$ y $p < 0$ ($Q_0 > 0$). La región geométrica de la gráfica con el sombreado oscuro corresponde a la región donde el polvo quedaría atrapado, mientras que la región de la gráfica con el sombreado tenue, es aquella región que corresponde a los granos que escapan de la magnetosfera.

En la figura 6.4 se muestran las gráficas de las soluciones para las fuentes elegidas, trasladando el punto de eyección en $x = 1$ para todas las fuentes. En esta figura podemos observar que la relación entre la fuerza electromagnética y la fuerza gravitacional (p), muestra un comportamiento particular de acuerdo a la distancia de la fuente de eyección de polvo con

respecto a Saturno.

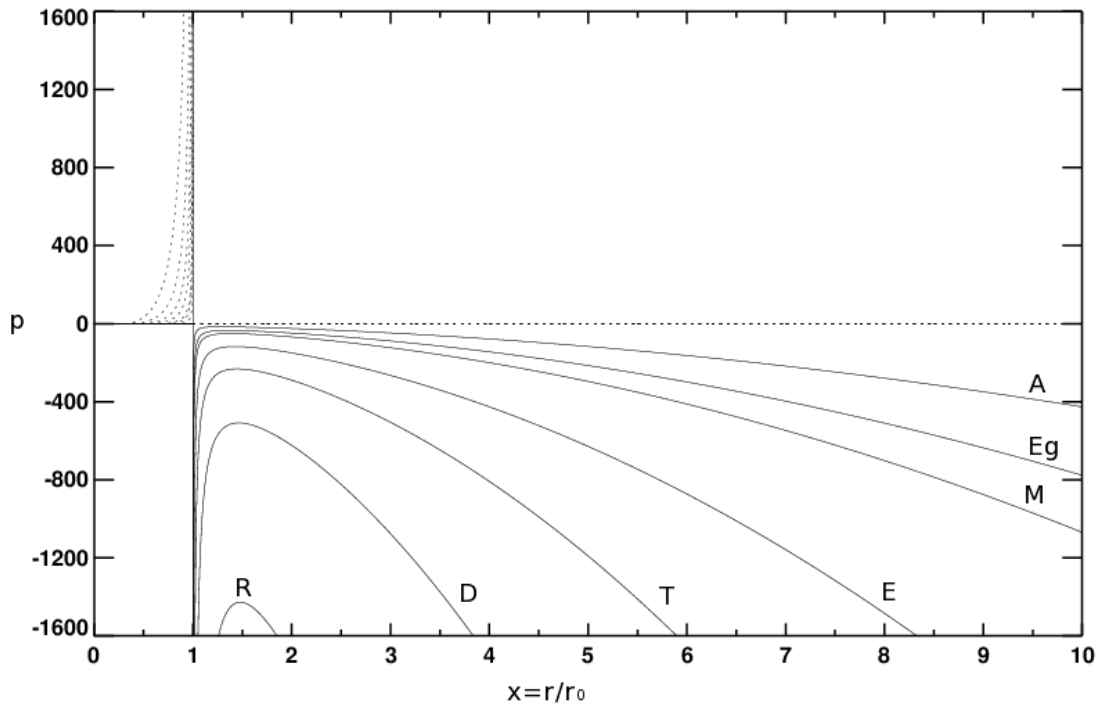


Figura 6.4: Gráfica de las soluciones del modelo Gravito-electrodinámico para las 7 fuentes de polvo que corresponden a las siguientes etiquetas:(A) borde externo del anillo A, (Eg) Egeón, (M) Mimas, (E) Encelado, (T) Tetis, (D) Dione y (R) Rea. Las líneas punteadas corresponden con $p_1(x)$ y las continuas con $p_2(x)$.

Utilizando las ecuaciones 5.31, 5.36 y 5.35 (pags. 130 y 132), calculamos el radio de los granos (a) para los valores de p obtenidos en las gráficas, así como los valores de los tiempos que les toma a las partículas de polvo escapar de la magnetosfera kroniana (t_r) y la velocidad radial que adquieren en ese punto (v_r) para cada una de las fuentes de polvo. Los valores obtenidos se muestran en el cuadro 6.1.

El resultado más interesante de la figura 6.4 y el cuadro 6.1 es que los granos que adquieren carga eléctrica positiva ($p < 0$) con radios entre $0.001 \mu\text{ m} < a < 0.08 \mu\text{ m}$ que corresponden al intervalo $-1428.13 < p < -0.45$, son eyectados de la magnetosfera.

Los granos cuyos radios son menores a $0.001 \mu\text{ m}$ (1 nm) con carga positiva, así como los granos con carga negativa, son las partículas de polvo que pueden formar regiones de confinamiento en torno al planeta, ya que quedan atrapados dentro de la magnetosfera kroniana describiendo un movimiento adiabático de acuerdo con el movimiento de las partículas bajo la influencia del campo magnético de Saturno, que además, dependiendo de la polaridad de su carga eléctrica, describirán un movimiento parecido al de los iones si su carga es positiva,

6.1. Resultados y discusión de resultados

o a la de los electrones si es negativa.

Fuentes de polvo	L_0	$p(x)$		$a[\mu m]$	$t_r[\times 10^5 s]$	$v_r[km s^{-1}]$
		$p_1(x)$	$p_2(x)$			
Anillo A (borde externo)	2.27	-0.45 a -16.09		0.013 a 0.08	0.34 a 2.00	93
Egeón (anillo G)	2.77	-0.45 a -34.82		0.009 a 0.08	0.25 a 2.23	123
Mimas	3.08	-0.45 a -50.79		0.007 a 0.08	0.22 a 2.36	140
Encelado	3.95	-0.45 a -117.36		0.005 a 0.08	0.17 a 2.70	187
Tetis	4.88	-0.45 a -232.27		0.003 a 0.08	0.13 a 3.03	234
Dione	6.26	-0.45 a -508.96		0.002 a 0.08	0.10 a 3.49	301
Rea	8.74	-0.45 a -1428.13		0.001 a 0.08	0.08 a 4.24	414

Cuadro 6.1: Radios (a), tiempos(t_r) y velocidades (v_r) de escape de las partículas eyectadas para las 7 fuentes de polvo. El tiempo y la velocidad de escape se calculan suponiendo que el límite de la magnetosfera de Saturno se localiza a los $50 R_S$.

En la figura 6.5 se muestran sombreadas con diferentes tonos de gris las zonas que corresponden a las partículas que escapan, indicando el tamaño de los granos, y la velocidad radial de escape cuando éstas alcanzan el límite de la magnetosfera de Saturno.

De la figura 6.5 y el cuadro 6.1, observamos que los granos de polvo tardan entre ~ 2 hrs y ~ 5 días en abandonar la magnetosfera de Saturno, que corresponden a granos de menor ($a = 0.001 \mu m$) y de mayor ($a = 0.08 \mu m$) tamaño respectivamente. También es posible observar que la velocidad radial de escape promedio de los granos es ≥ 200 km/s, donde los granos de menor tamaño son acelerados hasta alcanzar velocidades mayores a los 400 km/s, mientras que los granos más grandes (que tardan más tiempo en abandonar la magnetosfera) alcanzan velocidades de escape mucho menores.

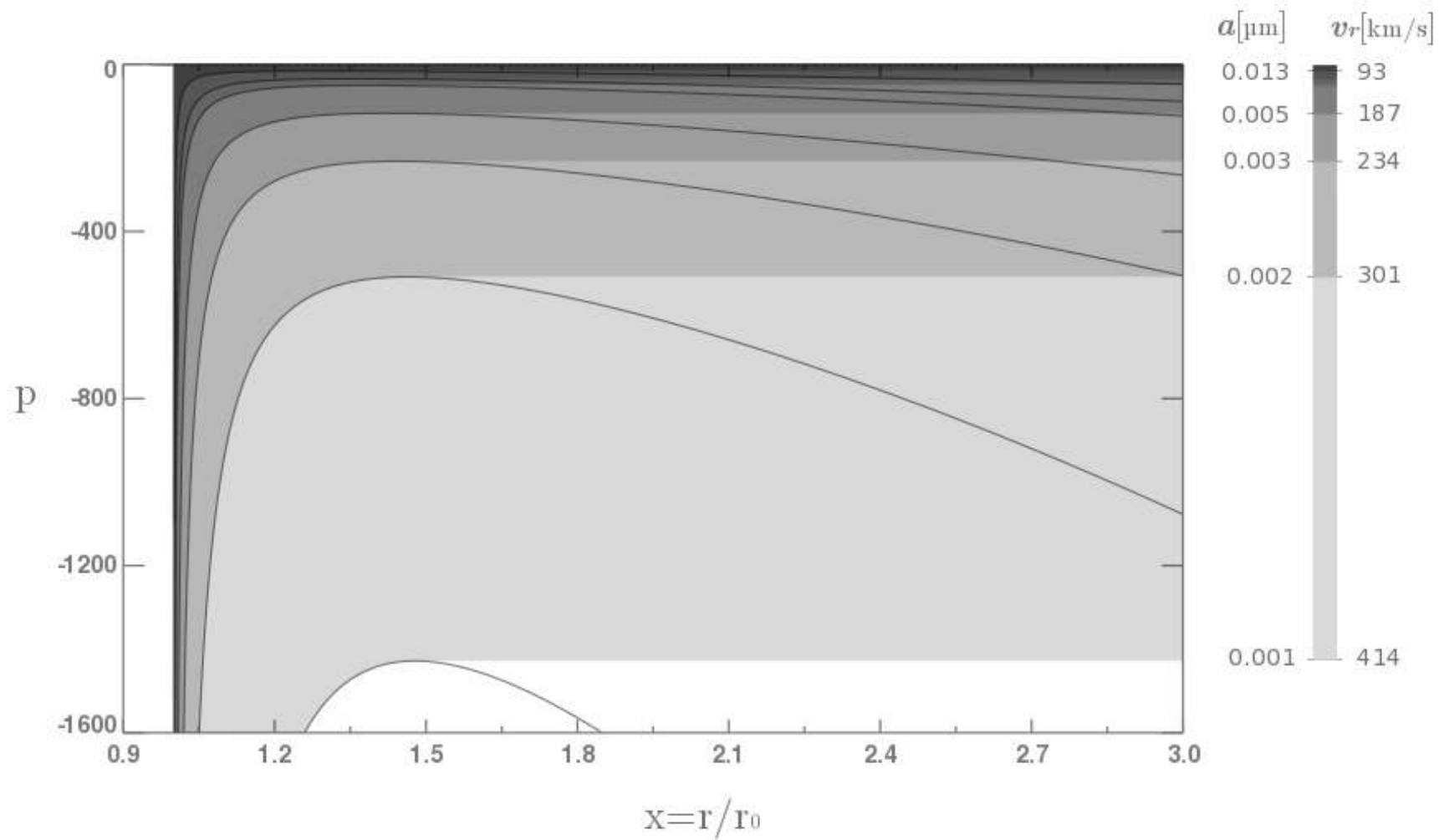


Figura 6.5: Regiones de escape para granos cargados positivamente, indicando el intervalo de tamaño de grano (a) y la velocidad radial de escape (v_r) para cada una de las 7 fuentes. Los intervalos de tamaño de grano se muestran sombreadas en diferentes tonos de gris para una mejor identificación.

Conclusiones

Con base en las soluciones del modelo gravito-electrodinámico para partículas de polvo eyectadas de la frontera externa del anillo A y de la superficie de los satélites clásicos concluimos que:

1.- Las partículas de polvo (granos) con radio menor a 13 nanómetros quedan atrapadas en las inmediaciones del anillo A por el campo magnético planetario y, ya que están cargadas eléctricamente, describirán un movimiento adiabático dentro de la magnetosfera interna saturniana. Las partículas que tengan radios entre 13 y 80 nm y carga eléctrica positiva escaparán de la magnetosfera saturniana gracias a la fuerza eléctrica co-rotacional.

2.- De todos los satélites escapan partículas de polvo (granos) con un radio máximo igual a 80 nanómetros y un radio mínimo que decrece a medida que la fuente satelital se aleja del centro de Saturno, lo que implica que, entre más nos alejamos del planeta, van apareciendo regiones anulares que tienen no solamente las contribuciones polvosas que le anteceden sino que se añaden partículas de polvo cada vez más pequeñas.

3.- El intervalo de radio de granos de polvo cargados positivamente que escapan de la magnetosfera saturniana hacia el medio interplanetario está entre 1 y 80 nm que son acelerados de la fuente hasta la frontera de la magnetosfera por la fuerza eléctrica co-rotacional hasta alcanzar velocidades entre 90 y 400 km/s. De estos resultados se infiere que existe una relación inversa entre el radio del grano y la velocidad de escape.

4.- Los resultados obtenidos para Egeón indican que este satélite es la fuente del anillo G ya que los valores derivados para el radio de los granos confinados ($a < 9$ nm y $a > 80$ nm) y para los granos que escapan hacia las regiones externas de la magnetosfera (9 nm $< a < 80$ nm) concuerdan con los valores obtenidos por la misión Cassini (3 nm $\leq a \leq 10$ μ m) (Hedman et al., 2007b), y los obtenidos teóricamente por otros modelos (Horányi, 2000; Maravilla y Flandes, 2005; Hsu et al., 2012).

Los granos que escapan bien pueden formar un anillo G muy tenue y altamente dinámico que continuamente está perdiendo masa pero que al mismo tiempo está siendo retroalimen-

tado por nuevas partículas de polvo que son eyectadas de la superficie de Egeón.

Publicaciones

Los resultados obtenidos en esta tesis serán publicados próximamente bajo el siguiente título:

The Saturnian G ring: a short note about its formation.

D. Maravilla and J. L. Leal-Herrera. In preparation.

Bibliografía

- Anderson, J. D., Schubert, G. 2007. Saturn's satellite Rhea is a homogeneous mix of rock and ice . *Geophysical Research Letters* 34, L02202. [70](#)
- André, N., and 31 colleagues 2008. Identification of Saturn's magnetospheric regions and associated plasma processes: Synopsis of Cassini observations during orbit insertion. *Reviews of Geophysics* 46, 4008. [40](#)
- Artem'ev, A. V. 1968. On the Problem of Magnetogravitational Capture. *Solar System Research* 2, 202. [120](#)
- Atreya, S. K., Wong, M. H., Owen, T. C., Mahaffy, P. R., Niemann, H. B., de Pater, I., Drossart, P., Encrenaz, T. 1999. A comparison of the atmospheres of Jupiter and Saturn: deep atmospheric composition, cloud structure, vertical mixing, and origin. *Planetary and Space Science* 47, 1243-1262. [19](#)
- Atreya, S. K., Wong, A. S. 2005. Coupled Clouds and Chemistry of the Giant Planets-A Case for Multiprobes. *Space Science Reviews* 116, 121-136. [20](#)
- Baines, K. H., Momary, T. W., Fletcher, L. N., Showman, A. P., Roos-Serote, M., Brown, R. H., Buratti, B. J., Clark, R. N., Nicholson, P. D. 2009. Saturn's north polar cyclone and hexagon at depth revealed by Cassini/VIMS. *Planetary and Space Science* 57, 1671-1681. [20](#)
- Blunck, J. 2010. *Solar System Moons: Discovery and Mythology*, ISBN 978-3-540-68852-5. Springer Berlin Heidelberg, 2010. [54](#), [56](#), [58](#), [63](#), [66](#), [69](#), [71](#), [78](#), [80](#), [83](#)
- Burns, J. A., Hamilton, D. P., Showalter, M. R. 2001. *Dusty Rings and Circumplanetary Dust: Observations and Simple Physics*. *Interplanetary Dust*, Edited by E. Grün, B.A.S. Gustafson, S. Dermott, and H. Fechtig. Astronomy and Astrophysics Library. 2001, 804 pp., ISBN: 3-540-42067-3. Berlin: Springer, 2001, p. 641 641. [97](#), [107](#), [109](#), [113](#)

- Burns, J. A. 1999. *The New Solar System* (4th ed.), chap. Planetary Rings, pp. 221–240. Sky Publishing/Cambridge University Press. [2](#)
- Cao, H., Russell, C. T., Christensen, U. R., Dougherty, M. K. 2011. Saturn's very axisymmetric magnetic field: No detectable secular variation or tilt *Earth and Planetary Science Letters*, 304, 22-28. [37](#)
- Castillo-Rogez, J. C., Matson, D. L., Sotin, C., Johnson, T. V., Lunine, J. I., Thomas, P. C. 2007. Iapetus' geophysics: Rotation rate, shape, and equatorial ridge. *Icarus* 190, 179-202. [81](#), [82](#)
- Castillo-Rogez, J. 2006. Internal structure of Rhea. *Journal of Geophysical Research (Planets)* 111, 11005. [70](#)
- Chapman, S. y Ferraro, V. C. A. 1931. a New Theory of Magnetic Storms. *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity (Journal of Geophysical Research)*, 36, 77-97. [38](#)
- Charnoz, S., Porco, C. C., Déau, E., Brahic, A., Spitale, J. N., Bacques, G., Baillie, K. 2005. Cassini Discovers a Kinematic Spiral Ring Around Saturn. *Science* 310, 1300-1304. [105](#)
- Chen, F.F. 1985. *Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion*, v.1. American Institute of Physics.
- Clark, R. N., and 11 colleagues 2010. Metallic Iron and Iron Oxide as an Explanation for the Dark Material Observed on Saturn's Icy Satellites and Rings with Cassini VIMS. *Bulletin of the American Astronomical Society* 42, 952. [93](#)
- Colwell, J. E., Nicholson, P. D., Tiscareno, M. S., Murray, C. D., French, R. G., Marouf, E. A. 2009. *The Structure of Saturn's Rings*. Saturn from Cassini-Huygens 375. [97](#), [98](#), [100](#), [103](#), [104](#)
- Connerney, J. E. P., Davis, L., Jr., Chenette, D. L. 1984. *Magnetic field models*. Saturn 354-377. [35](#)
- Cowling, T. G. 1933. The magnetic field of sunspots. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 94, 39-48. [34](#)
- Cuzzi, J. N., Lissauer, J. J., Esposito, L. W., Holberg, J. B., Marouf, E. A., Tyler, G. L., Boishchot, A. 1984. Saturn's rings - Properties and processes. *IAU Colloq. 75: Planetary Rings* 73-199. [91](#)

-
- Cuzzi, J., Clark, R., Filacchione, G., French, R., Johnson, R., Marouf, E., Spilker, L. 2009. *Ring Particle Composition and Size Distribution*. Saturn from Cassini-Huygens 459. [92](#), [95](#), [97](#)
- Del Genio A., Achtenberg R., Baines K., Flasar M., Read P., Sánchez-Lavega, A., Showman A. 2009. *Saturn Atmospheric Structure and Dynamics*. Saturn from Cassini-Huygens, Editores: Dougherty, Michele K.; Esposito, Larry W.; Krimigis, Stamatios M., Springer Science+Business Media B.V., 2009, pp. 113. [26](#), [30](#), [33](#)
- Denk, T., and 10 colleagues 2010. Iapetus: Unique Surface Properties and a Global Color Dichotomy from Cassini Imaging. *Science* 327, 435. [86](#)
- Dermott, S. F., Thomas, P. C. 1988. The shape and internal structure of Mimas. *Icarus*, vol. 73, Jan. 1988, pp. 25-65. [73](#), [25-65](#). [57](#)
- Ducci, M., Iess, L., Giese, B., Mackenzie, R. 2012. The effect of Tirawa impact basin on the determination of Rhea's gravity field .. *Memorie della Societa Astronomica Italiana Supplementi* 20, 132. [70](#)
- Egeland, A., Burke, W.J. 2013. *Carl Størmer: Auroral Pioneer*. Astrophysics and space science library, Springer Berlin Heidelberg. [120](#)
- Esposito, L. 2006, *Planetary Rings*, by Larry Esposito, pp. . ISBN 0521362229. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2006. [90](#), [92](#), [97](#)
- Esposito, L. W. 2010. Composition, Structure, Dynamics, and Evolution of Saturn's Rings. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 38, 383-410. [93](#)
- Flandes, A., Maravilla, D. 2004. Dust escape mechanism from Io. *Advances in Space Research* 34, 2251-2255. [129](#)
- Flasar, F. M., Baines, K. H., Bird, M. K., Tokano, T. and West, R. A. 2009. *Atmospheric Dynamics and Meteorology*. Titan from Cassini-Huygens 322. [73](#), [74](#)
- Fortney, J. J., Baraffe, I., & Militzer, B. 2010. *Giant Planet Interior Structure and Thermal Evolution*. Exoplanets. The University Arizona Press, p. 397 [17](#)
- Fortney, J. J., Nettelmann, N. 2010. The Interior Structure, Composition, and Evolution of Giant Planets. *Space Science Reviews* 152, 423-447.
-

- Giese, B., Wagner, R., Neukum, G., Helfenstein, P., Thomas, P. C. 2007. Tethys: Lithospheric thickness and heat flux from flexurally supported topography at Ithaca Chasma. *Geophysical Research Letters* 34, 21203. [65](#)
- Goertz, C. K., Morfill, G. 1983. A model for the formation of spokes in Saturn's rings. *Icarus* 53, 219-229. [101](#)
- Goldreich, P., Tremaine, S. 1980. Disk-satellite interactions. *The Astrophysical Journal* 241, 425-441. [93](#)
- Goldstein, R. M. 1973. Radar Observations of the Rings of Saturn. *Bulletin of the American Astronomical Society*, Vol. 5, p.290. [7](#)
- Gombosi, T. I., Armstrong, T. P., Arridge, C. S., Khurana, K. K., Krimigis, S. M., Krupp, N., Persoon, A. M., Thomsen, M. F. 2009. *Saturn's Magnetospheric Configuration*. Saturn from Cassini-Huygens 203. [38](#), [41](#), [42](#)
- Graps, A. L., Grun, E. 2000. Charging Processes for Dust Particles in Saturn's Magnetosphere. *Bulletin of the American Astronomical Society* 32, 1085. [122](#)
- Graps, A. L., Jones, G. H., Juhász, A., Horányi, M., Havnes, O. 2008. The Charging of Planetary Rings. *Space Science Reviews* 137, 435-453. [119](#), [122](#), [130](#)
- Grav, T., Bauer, J. 2007. A deeper look at the colors of the saturnian irregular satellites. *Icarus* 191, 267-285. [53](#)
- Grun, E., and 22 colleagues 1993. Discovery of Jovian dust streams and interstellar grains by the ULYSSES spacecraft. *Nature* 362, 428-430. [129](#)
- Guillot, Tristan; Atreya, Sushil; Charnoz, Sébastien; Dougherty, Michele K.; Read, Peter. 2009. *Saturn's Exploration Beyond Cassini-Huygens*. Saturn from Cassini-Huygens, Editors: Dougherty, Michele K.; Esposito, Larry W.; Krimigis, Stamatios M., Springer Science+Business Media B.V., 2009, pp. 745. [33](#)
- Guillot, T. 2005. The Interiors of Giant Planets: Models and Outstanding Questions. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 33, 493-530. [16](#), [17](#)
- Harland, D. M. 2007. *Cassini at Saturn, Huygens results*. Springer Praxis. [5](#), [6](#), [7](#), [80](#)
- Havnes, O. 1984. Charges on dust particles. *Advances in Space Research* 4, 75-83. [119](#)

-
- Hedman, M. M., and 10 colleagues 2007. Saturn's dynamic D ring. *Icarus* 188, 89-107. [109](#)
- Hedman, M. M., Burns, J. A., Tiscareno, M. S., Porco, C. C., Jones, G. H., Roussos, E., Krupp, N., Paranicas, C., Kempf, S. 2007. The Source of Saturn's G Ring. *Science* 317, 653. [141](#)
- Hedman, M. M., Burns, J. A., Tiscareno, M. S., Porco, C. C. 2009. Organizing some very tenuous things: Resonant structures in Saturn's faint rings. *Icarus* 202, 260-279. [112](#), [129](#)
- Hedman, M. M., Murray, C. D., Cooper, N. J., Tiscareno, M. S., Beurle, K., Evans, M. W., Burns, J. A. 2009. Three tenuous rings/arcs for three tiny moons. *Icarus* 199, 378-386. [112](#)
- Hedman, M. M., Burns, J. A., Hamilton, D. P., Showalter, M. R. 2012. The three-dimensional structure of Saturn's E ring. *Icarus* 217, 322-338. [113](#)
- Hill, J. R., Mendis, D. A. 1979. Charged dust in the outer planetary magnetospheres. I - Physical and dynamical processes. *Moon and Planets* 21, 3-16. [120](#), [121](#)
- Hill, J. R., Mendis, D. A. 1979. On the Dynamics and Spatial Distribution of Charged Dust in Outer Planetary Magnetospheres. *Bulletin of the American Astronomical Society* 11, 454. [120](#), [121](#)
- Hill, J. R., Mendis, D. A. 1980. Charged dust in the outer planetary magnetospheres. II - Trajectories and spatial distribution. *Moon and Planets* 23, 53-71. [120](#)
- Hill, J. R., Mendis, D. A. 1982. The dynamical evolution of the Saturnian ring spokes. *Journal of Geophysical Research* 87, 7413-7420. [101](#)
- Hillier, J. K., Green, S. F., McBride, N., Schwanethal, J. P., Postberg, F., Srama, R., Kempf, S., Moragas-Klostermeyer, G., McDonnell, J. A. M., Grun, E. 2007. The composition of Saturn's E ring. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 377, 1588-1596. [113](#)
- Horányi, M. 2000. Dust streams from Jupiter and Saturn. *Physics of Plasmas* 7, 3847-3850. [120](#), [141](#)
- Horányi, M., Burns, J. A., Hedman, M. M., Jones, G. H., Kempf, S. 2009. *Diffuse Rings*. Saturn from Cassini-Huygens 511. [101](#), [107](#), [108](#), [109](#), [110](#), [113](#), [131](#)
- Hsu, H.-W., Krüger, H., Postberg, F. 2012. Dynamics, Composition, and Origin of Jovian and Saturnian Dust-Stream Particles. *Astrophysics and Space Science Library* 385, 77. [141](#)
-

- Hubbard W. B., Dougherty M. K., Gautier D., Jacobson R. 2009. *The Interior of Saturn. Saturn from Cassini-Huygens*, Editores: Dougherty, Michele K.; Esposito, Larry W.; Krimigis, Stamatios M., Springer Science+Business Media B.V., 2009, p. 75. [14](#), [17](#)
- Hubbard, W. B., Smoluchowski, R. 1973. Structure of Jupiter and Saturn. *Space Science Reviews* 14, 599-662. [11](#)
- Ip, W.-H. 2006. On a ring origin of the equatorial ridge of Iapetus. *Geophysical Research Letters* 33, 16203. [82](#)
- Irwin Patrick G. J. 2009. *Giant Planets of our Solar System*. Springer, Praxis Publishing, 2009, pp. 202. [29](#)
- Jaumann, R., Clark, R. N., Nimmo, F., Hendrix, A. R., Buratti, B. J., Denk, T., Moore, J. M., Schenk, P. M., Ostro, S. J., Srama, R. 2009. *Icy Satellites: Geological Evolution and Surface Processes. Saturn from Cassini-Huygens* 637. [64](#), [76](#), [77](#)
- Jaumann, Ralph and 10 colleagues. 2009. *Geology and Surface Processes on Titan. Titan from Cassini-Huygens* 74. [64](#), [76](#), [77](#)
- Jeffreys, H., Sir 1954. Second-order terms in the figure of Saturn. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 114, 433. [10](#)
- Jewitt, D., Haghighipour, N. 2007. Irregular Satellites of the Planets: Products of Capture in the Early Solar System. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 45, 261-295. [52](#)
- Johnson, T. V., Lunine, J. I. 2005. Saturn's moon Phoebe as a captured body from the outer Solar System. *Nature* 435, 69-71. [84](#), [85](#)
- Jones, G. H., and 12 colleagues 2006. Formation of Saturn's ring spokes by lightning-induced electron beams. *Geophysical Research Letters* 33, 21202. [101](#)
- Jones, G. H., and 34 colleagues 2008. The Dust Halo of Saturn's Largest Icy Moon, Rhea. *Science* 319, 1380. [114](#)
- Keeler, J. E. 1895. A Spectroscopic Proof of the Meteoric Constitution of Saturn's Rings. *The Astrophysical Journal* 1, 416. [6](#)
- Kempf, S., Srama, R., Horányi, M., Burton, M., Helfert, S., Moragas-Klostermeyer, G., Roy, M., Grün, E. 2005. High-velocity streams of dust originating from Saturn. *Nature* 433, 289-291. [129](#)

- Kempf, S., Beckmann, U., Srama, R., Horanyi, M., Auer, S., Grün, E. 2006. The electrostatic potential of E ring particles. *Planetary and Space Science* 54, 999-1006. [130](#)
- Kempf, S., Beckmann, U., Moragas-Klostermeyer, G., Postberg, F., Srama, R., Economou, T., Schmidt, J., Spahn, F., Grün, E. 2008. The E ring in the vicinity of Enceladus. I. Spatial distribution and properties of the ring particles. *Icarus*, Volume 193, Issue 2, p. 420-437. 193, 420-437. [59](#), [113](#)
- Kempf, S., Srama, R., Moragas-Klostermeyer, G., Schmidt, J., Spahn, F., Horanyi, M. 2012. Saturn's egg-shaped E ring. *EGU General Assembly Conference Abstracts* 14, 11409. [113](#)
- Kothari, D. S. 1936. Planets, The internal constitution of. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 96, 833. [9](#)
- Krimigis, S. M., and 24 colleagues 2004. Magnetosphere Imaging Instrument (MIMI) on the Cassini Mission to Saturn/Titan. *Space Science Reviews* 114, 233-329. [43](#)
- Krüger, H., Horányi, M., Krivov, A. V., & Graps, A. L. 2004, *Jupiter: The Planet, Satellites and Magnetosphere*, 219. [122](#), [129](#)
- Lara, Luisa M. 2010. *Titán, ¿Qué sabemos de?*, ISBN 978-84-00-09071-5. Editorial Catara. [73](#)
- Larmor, J. 1919. How could a rotating body such as the Sun become a magnet?. *Report of the British Association of Advanced Science* 87. 159–160. [34](#)
- Lebreton, J.-P., Matson, D. L. 2002. The Huygens Probe: Science, Payload and Mission Overview. *Space Science Reviews* 104, 59-100. [75](#)
- Lin, C. C., Shu, F. H. 1964. On the Spiral Structure of Disk Galaxies.. *The Astrophysical Journal* 140, 646. [93](#)
- McIlwain, C. E. 1966. Magnetic Coordinates. *Space Science Reviews* 5, 585-598. [126](#)
- Mahon, B. 2003. *The Man Who Changed Everything: The Life of James Clerk Maxwell*. John Wiley and Sons. [6](#)
- Maravilla, D., Flammer, K. R., Mendis, D. A. 1995. On the injection of fine dust from the Jovian magnetosphere. *The Astrophysical Journal* 438, 968-974. [120](#), [129](#), [135](#)

- Maravilla, D., Flammer, K. R., Mendis, D. A. 1995. The Nature of the Orbits of Charged Dust Injected into the Jovian Magnetosphere during the Tidal Break-Up of Comet Shoemaker-Levy 9. *Astrophysics and Space Science* 234, 233-252.
- Maravilla, D., Flammer, K. R., Mendis, D. A. 1996. The Regions of Confinement of Charged Dust Injected into the Terrestrial Magnetosphere. *The Physics of Dust Plasmas* 47.
- Maravilla, D., Flandes, A. 2005. Possible sources for the Saturnian dust streams. *Geophysical Research Letters* 32, 6202. [120](#), [129](#), [131](#), [141](#)
- Marley Mark, Fortney Jonathan. 2007. *Interiors of the Giant Planets*. Encyclopedia of the solar system, Editores: McFadden, Lucy-Ann; Weissman, Paul R.; Johnson, Torrence V., Elsevier, Second Edition, 2007, pp. 403. [15](#)
- Matson, D., Castillo-Rogez J., Schubert, G., Sotin, C., Mckinnon, W. 2009. *The thermal evolution and internal structure of Saturn's mid-sized icy satellites*. Saturn from Cassini-Huygens 577. [55](#), [63](#), [70](#)
- Mendis, D. A., Axford, W. I. 1974. Satellites and Magnetospheres of the Outer Planets. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 2, 419. [120](#), [122](#)
- Mendis, D. A., Houppis, H. L. F., Hill, J. R. 1982. The gravito-electrodynamics of charged dust in planetary magnetospheres. *Journal of Geophysical Research* 87, 3449-3455. [120](#), [121](#)
- Mendis, D. A., Hill, J. R., Houppis, H. L. F. 1983. Charged dust in Saturn's magnetosphere.. *Journal of Geophysical Research* 88, 929. [120](#)
- Mendis, D. A., Rosenberg, M. 1994. Cosmic Dusty Plasmas. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 32, 419-463. [118](#)
- Mendis, D. A., Axford, W. I. 2008. Revisiting Iapetus following recent Cassini observations. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)* 113, 11217. [83](#)
- Merrill, R. T., McElhinny, M. W., McFadden, P. L. 1998. *The magnetic field of the earth: paleomagnetism, the core, and the deep mantle*. Academic Press Inc. International geophysics series. Vol. 63.
- Miner, E. D., Wessen, R. R., Cuzzi, J. N. 2007. *Planetary Ring Systems*. Planetary Ring Systems by Ellis D. Miner, Randii R. Wessen, and Jeffrey N. Cuzzi. Popular Astronomy. Springer, 2007. [2](#), [88](#)

-
- Mitchell, C. J., Horányi, M., Havnes, O., Porco, C. C. 2006. Saturn's Spokes: Lost and Found. *Science* 311, 1587-1589.
- Mitchell, D. G., Carbary, J. F., Cowley, S. W. H., Hill, T. W., Zarka, P. 2009. *The Dynamics of Saturn's Magnetosphere*. Saturn from Cassini-Huygens 257. [38](#)
- Moore, Patrick and Rees, Robin 2011. *Patrick Moore's Data book of astronomy*. Cambridge University press. [9](#)
- Murray, C. D., Dermott, S. F. 1999. *Solar system dynamics*. Solar system dynamics by Murray, C. D., 1999 . [94](#), [131](#)
- Murray, C. D., Beurle, K., Cooper, N. J., Evans, M. W., Williams, G. A., Charnoz, S. 2008. The determination of the structure of Saturn's F ring by nearby moonlets. *Nature* 453, 739-744. [105](#)
- Northrop, T. G. 1963. Adiabatic Charged-Particle Motion. *Reviews of Geophysics and Space Physics* 1, 283-304. [128](#), [135](#)
- Porco, C. C., and 35 colleagues. 2005. Imaging of Titan from the Cassini spacecraft. *Nature* 434, 159-168.
- Porco, C. C., and 24 colleagues 2006. Cassini Observes the Active South Pole of Enceladus. *Science*, Volume 311, Issue 5766, pp. 1393-1401 (2006). 311, 1393-1401. [60](#), [113](#)
- Porco, C. C., Thomas, P. C., Weiss, J. W., Richardson, D. C. 2007. Saturn's Small Inner Satellites: Clues to Their Origins. *Science* 318, 1602. [49](#), [50](#), [51](#)
- Postberg, F., Kempf, S., Schmidt, J., Brilliantov, N., Beinsen, A., Abel, B., Buck, U., Srama, R. 2009. Sodium salts in E-ring ice grains from an ocean below the surface of Enceladus. *Nature*, Volume 459, Issue 7250, pp. 1098-1101 (2009). 459, 1098-1101. [59](#)
- Proctor, Richard 1895. Saturn and its systems. *Popular Astronomy* 2, 418-419. [9](#)
- Ramsey, W. H. 1951. On the constitutions of the major planets. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 111, pp.427. [10](#)
- Ramsey, W. H.; Miles B. 1952. On the internal structure of Jupiter and saturn. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 112, pp.234. [10](#)
-

- Roatsch, T., Jaumann, R., Stephan, K., Thomas, P. C. 2009. *Cartographic Mapping of the Icy Satellites Using ISS and VIMS Data*. Saturn from Cassini-Huygens 763. [57](#), [61](#), [62](#), [64](#), [67](#), [70](#), [81](#), [85](#)
- Sánchez-Lavega, A., Rojas, J. F., Sada, P. V. 2000. Saturn's Zonal Winds at Cloud Level. *Icarus* 147, 405-420. [27](#)
- Sánchez-Lavega, A., Hueso, R., Pérez-Hoyos, S., García-Melendo, E., Rojas, J. F. 2004. Observations and Models of the General Circulation of Jupiter and Saturn. *Lecture Notes and Essays in Astrophysics* 1, 63-86. [31](#), [32](#)
- Sánchez-Lavega, A., and 42 colleagues. 2011. Deep winds beneath Saturn's upper clouds from a seasonal long-lived planetary-scale storm. *Nature* 475, 71-74. [23](#)
- Salo, H. 2001. Numerical Simulations of the Collisional Dynamics of Planetary Rings. *Granular Gases* 564, 330. [91](#), [92](#)
- Shukla, P. K., and Mamun, A.A. 2002 *Introduction to Dusty Plasma Physics*. IOP Publishing.
- Soderblom, L. A., Brown, R. H., Clark, R. N., Janssen, M. A., McCord, T. B., Niemann, H. B. and Tomasoko, M. G. 2009. *Composition of Titan's Surface*. Titan from Cassini-Huygens 140. [75](#)
- Spencer, J. R., Barr, A. C., Esposito, L. W., Helfenstein, P., Ingersoll, A. P., Jaumann, R., McKay, C. P., Nimmo, F., Waite, J. H. 2009. *Enceladus: An Active Cryovolcanic Satellite*. Saturn from Cassini-Huygens 683. [61](#)
- Spencer, J. R., Denk, T. 2010. Formation of Iapetus Extreme Albedo Dichotomy by Exogenically Triggered Thermal Ice Migration. *Science* 327, 432. [83](#)
- 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* 42, 981. [97](#), [101](#)
- Spitale, J. N., Jacobson, R. A., Porco, C. C., Owen, W. M., Jr. 2006. The Orbits of Saturn's Small Satellites Derived from Combined Historic and Cassini Imaging Observations. *The Astronomical Journal* 132, 692-710. [51](#)
- Sremčević, M., Schmidt, J., Salo, H., Seiß, M., Spahn, F., Albers, N. 2007. A belt of moonlets in Saturn's A ring. *Nature* 449, 1019-1021. [49](#)

-
- Stevenson, D.J. 1982. Interiors of the giant planets. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 10, 257-295. [11](#), [12](#)
- Strobel, D. F. and 7 colleagues. 2009. *Athmospheric structure and composition*. Titan from Cassini-Huygens 235. [73](#)
- Teolis, B. D., and 12 colleagues 2010. Cassini Finds an Oxygen-Carbon Dioxide Atmosphere at Saturn's Icy Moon Rhea. *Science* 330, 1813. [71](#)
- Thomas, P. C., and 17 colleagues 2007. Hyperion's sponge-like appearance. *Nature* 448, 50-56. [78](#)
- Thomas, P. C. 2010. Sizes, shapes, and derived properties of the saturnian satellites after the Cassini nominal mission. *Icarus*, Volume 208, Issue 1, p. 395-401. 208, 395-401. [55](#), [57](#), [79](#)
- Tiscareno, M. S., Burns, J. A., Hedman, M. M., Porco, C. C., Weiss, J. W., Dones, L., Richardson, D. C., Murray, C. D. 2006. 100-metre-diameter moonlets in Saturn's A ring from observations of propeller structures. *Nature* 440, 648-650. [99](#)
- Tiscareno, M. S., Burns, J. A., Hedman, M. M., Porco, C. C. 2007. The Population of Propellers in Saturn's A Ring. *Bulletin of the American Astronomical Society* 39, 426. [50](#)
- Tiscareno, M. S., Burns, J. A., Hedman, M. M., Porco, C. C. 2008. The Population of Propellers in Saturn's A Ring. *The Astronomical Journal* 135, 1083-1091. [97](#), [100](#)
- Tiscareno, M. S., Burns, J. A., Cuzzi, J. N., Hedman, M. M. 2010. Rhea: Still Ringless. *Bulletin of the American Astronomical Society* 42, 952. [115](#)
- Tobie, G., Grasset, O., Lunine, J. I., Mocquet, A., Sotin, C. 2005. Titan's internal structure inferred from a coupled thermal-orbital model. *Icarus* 175, 496-502. [72](#)
- Tokar, R. L., Johnson, R. E., Thomsen, M. F., Sittler, E. C., Coates, A. J., Wilson, R. J., Crary, F. J., Young, D. T., Jones, G. H. 2012. Detection of exospheric O₂⁺ at Saturn's moon Dione. *Geophysical Research Letters* 39, 3105. [68](#)
- van Helden, A. 1994. Naming the satellites of Jupiter and Saturn. *The Newsletter of the Historical Astronomy Division of the American Astronomical Society* (32): 1-2. [47](#)
- van Helden, A. 1974. Saturn and his Anses. *Journal for the History of Astronomy* 5, 105. [2](#), [3](#)

- Verbiscer, A., French, R., Showalter, M., Helfenstein, P. 2007. Enceladus: Cosmic Graffiti Artist Caught in the Act. *Science* 315, 815. [64](#)
- Verbiscer, A. J., Skrutskie, M. F., Hamilton, D. P. 2009. Saturn's largest ring. *Nature* 461, 1098-1100. [85](#), [114](#)
- Verheest, Frank. 2000 *Waves in dusty space plasmas*. Astrophysics and Space Science Library. [118](#)
- Waite, J. H., Young, D. T., Cravens, T. E., Coates, A. J., Crary, F. J., Magee, B., Westlake, J. 2007. The Process of Tholin Formation in Titan's Upper Atmosphere. *Science* 316, 870. [73](#)
- Weidenschilling, S. J., Chapman, C. R., Davis, D. R., Greenberg, R. 1984. Ring particles - Collisional interactions and physical nature. *IAU Colloq. 75: Planetary Rings* 367-415. [91](#), [92](#)
- Weir, S. T., Mitchell, A. C., & Nellis, W. J. 1996. Metallization of Fluid Molecular Hydrogen at 140 GPa (1.4 Mbar). *Physical Review Letters*, 76, 1860 [16](#)
- West R.A., Baines K.H., Karkoschka E., Sánchez-Lavega A. 2009. *Clouds and Aerosols in Saturn's Atmosphere*. Saturn from Cassini-Huygens, Editores: Dougherty, Michele K.; Esposito, Larry W.; Krimigis, Stamatios M., Springer Science+Business Media B.V., 2009, pp. 161.
- West Robert A. 2007. *Atmospheres of the Giant Planets*. Encyclopedia of the solar system, Editores: McFadden, Lucy-Ann; Weissman, Paul R.; Johnson, Torrence V., Elsevier, Second Edition, 2007, p. 383. [19](#)
- Wigner, E.; Huntington H. B. 1935. On the Possibility of a Metallic Modification of Hydrogen. *Journal of Chemical Physics*, Vol. 3, p.764-770. [10](#)
- Wildt, R. 1938. On the State of Matter in the Interior of the Planets. *The Astrophysical Journal* 87,508. [10](#)
- Wisdom, J., Peale, S. J., Mignard, F. 1984. The chaotic rotation of Hyperion. *Icarus* 58, 137-152. [78](#)