

Agujero en ozono sobre la Antártida. ECOPORTAL

MANUAL DE GEOLOGIA PARA INGENIEROS

Cap 03

EL SISTEMA SOLAR

GONZALO DUQUE ESCOBAR

3.1 EL SISTEMA SOLAR

Está constituido por el Sol, 9 planetas, cerca de un centenar de satélites, 30 asteroides mayores entre unos 2 mil catalogados y 100 mil millones de cometas a los cuales se deben añadir nubes de gas y polvo. Al formarse el remolino primogénito, los elementos más pesados se ubicaron en el centro y los más livianos en la periferia, permitiendo de esta manera la formación de planetas rocosos en el centro y gaseosos hacia afuera. La localización del sistema solar en la galaxia y la de la Tierra en este, han sido favorables para el desarrollo de la vida. Esto apunta a las condiciones biofísicas y a la cantidad y proporción de los elementos complejos.

3.1.1 El Sol. El Sol es una estrella en cuyo interior se dan reacciones termonucleares. Tiene una composición del 70% de H, 27% de He y 3% de otros elementos; su masa de 2×10^{27} Ton (332270 veces la de la Tierra) y su radio de 1.39×10^6 Km. (109 veces el de la Tierra), explican una aceleración de la gravedad en su superficie de 2.74×10^4 cm/seg² (27.9 veces la terrestre).

La rotación es diferencial, así: período ecuatorial de 25 días y período polar de 30 días. La radiación solar de emisión es de 3.8×10^{23} Kw y la recibida en la Tierra de sólo 1.7×10^{14} Kw.

El Sol se mueve con relación al patrón local o de reposo (grupo de estrellas cercanas), a 20 Km./seg en dirección a Hércules (punto llamado APEX, cerca a Vega de la Lira). La temperatura superficial varía desde 5000°C en las manchas solares a 6000°C en la fotosfera, mientras en el núcleo es superior a los 10 millones de °C. Su densidad es de 100 g/cm³ en el núcleo y en el conjunto del astro de 1,41 g/cm³

3.1.2 La Tierra. Su figura es parecida a la de una esfera de radio, $r = 6370 \text{ Km.}$, la masa de la Tierra es, $m = 5,976 \times 10^{27} \text{ g}$, y su velocidad angular de rotación es, $w = 7,292115 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$. No obstante, y a causa de la rotación del planeta sobre su propio eje, dada su masa, el planeta sufre el achatamiento de 1:297. La densidad media del planeta es $5,5 \text{ g/cm}^3$.

3.1.2.1 Leyes de Kepler (1571-1630). Son las leyes enunciadas sobre el movimiento planetario continuo, y que son de gran utilidad para describir la distancia relativa entre los cuerpos celestes, las posiciones planetarias y en general el movimiento de cualquier cuerpo puntual alrededor de un centro de atracción gravitacional.

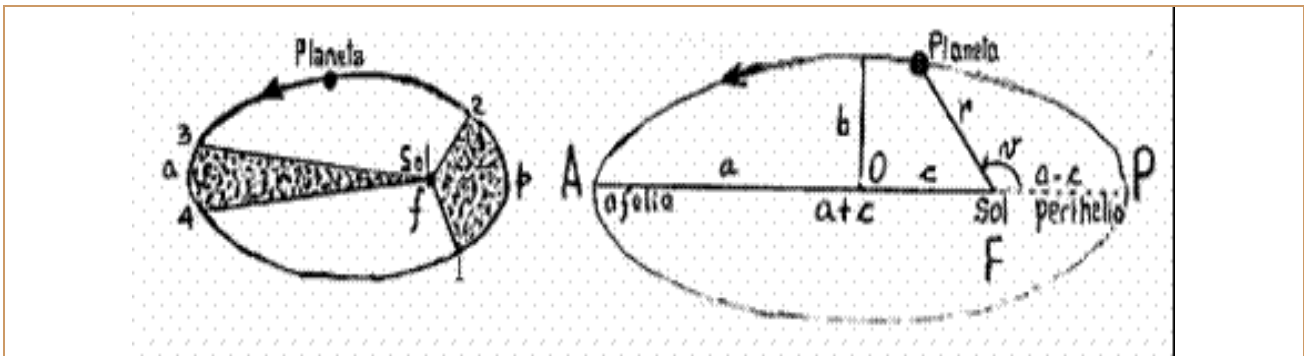


Figura 8. Órbita elíptica de un planeta en torno al Sol. En sombreado se ilustra la ley de las áreas; además el Sol ocupa uno de los focos de la elipse. Adaptado de Eduardo Brieva, Introducción a la Astronomía.

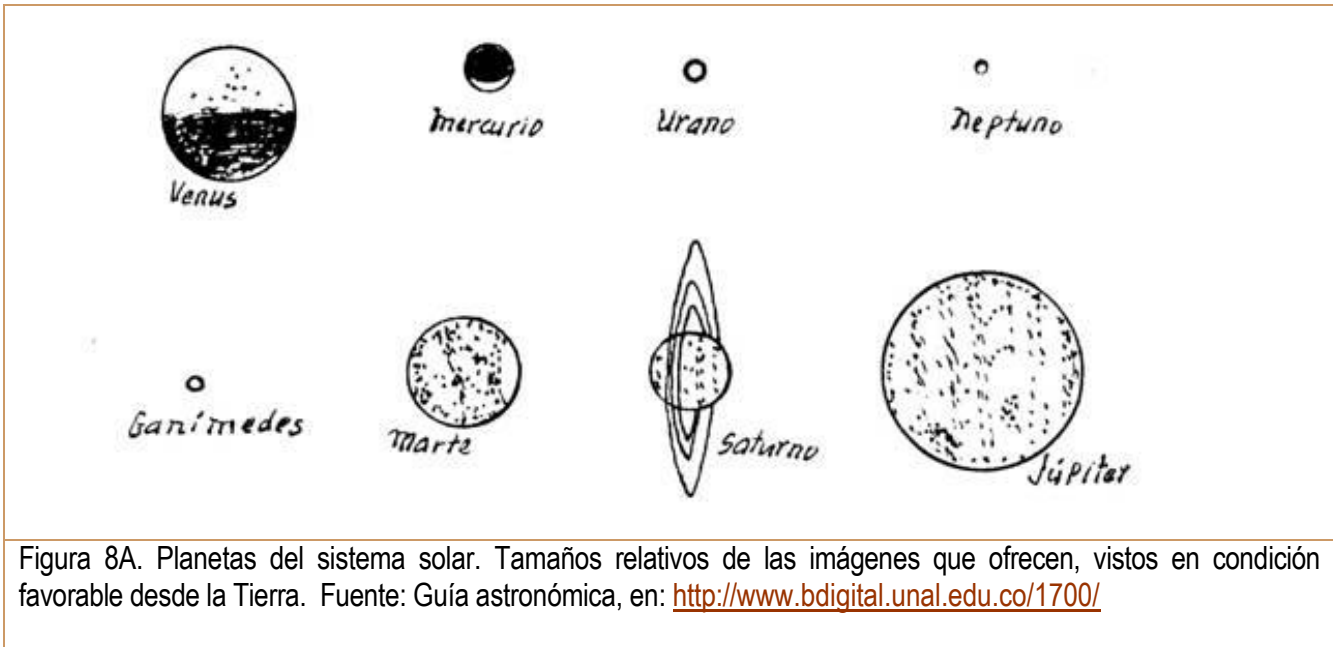
1. Las órbitas de los planetas alrededor del Sol son elípticas; el Sol ocupa uno de los focos. La distancia planeta-Sol, es menor en el perihelio y mayor en el afelio.
2. El radio-vector que une el planeta con el Sol barre áreas iguales en tiempos iguales, por tanto la velocidad en el perihelio es mayor que en el afelio.
3. Si tomamos dos planetas con sus correspondientes períodos de revolución alrededor del Sol y las distancias medias respecto a él, los cuadrados de los períodos de revolución, T , son proporcionales a los cubos de dichas distancias, R .

$$T_1^2/T_2^2 = R_1^3/R_2^3$$

La Tierra describe su órbita sobre un plano llamado la eclíptica. Su eje de rotación está inclinado $23^\circ 27'$ respecto de la perpendicular a la eclíptica. Recorre la órbita en 365.26 días. La órbita tiene una excentricidad de 0.017. El afelio es el 2 de julio y el perihelio el 2 de enero. Por la inclinación del eje polar, existen estaciones en el norte, así: solsticio de verano el 21 de junio y de invierno el 22 de diciembre y equinoccio, de primavera el 21 de marzo y de otoño el 23 de septiembre. En el hemisferio sur, se invierten las fechas.

En el sistema solar las órbitas de los planetas son casi coplanares, las de menos son Mercurio con 7° y Plutón con 17° . La rotación y la traslación, por regla general, son del W al E; es decir, son retrógradas respecto a la estrella polar. En la rotación son excepción Venus y Urano, que la hacen en sentido directo.

3.1.3 Planetas terrestres o interiores. Son los planetas comprendidos entre el Sol y el cinturón de asteroides. En su orden son: Mercurio, Venus, Tierra y Marte, planetas duros y sólidos, de pequeño diámetro y baja gravedad, por lo que su atmósfera resulta poco densa y poco extensa. La rotación sobre su eje (día) es larga.



3.1.4 Planetas mayores o exteriores. Los planetas gigantes, después del cinturón de asteroides, son Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno, sigue Plutón que es la excepción, por sus características: En la Asamblea General de la Unión Astronómica Internacional (2006) se le consideró un planeta enano del Sistema Solar, creándose una nueva categoría llamada plutoide, en la que se incluye a Plutón, por ser el prototipo de una categoría de objetos transneptunianos denominada plutinos.

Aunque tienen gran masa son de baja densidad; mayoritariamente son líquidos y gaseosos aunque poseen un pequeño núcleo sólido. La atmósfera es extensa, compuesta de H, He, agua, Amoníaco y Metano; tienen alta velocidad de rotación (día corto) y muchos satélites (el de menos Neptuno), además de anillos.

3.1.5 Los satélites (lunas). La observación de Fobos y Deimos, en Marte, anuncia que parecen capturados por su forma irregular y pequeño tamaño; ello ha permitido clasificar los satélites así:

3.1.5.1 Satélites regulares. Los que tienen órbita circular, rotación y traslación W al E (retrógrada) y una órbita poco inclinada (casi coplanar con la del sistema solar). Dichos satélites y el planeta son congénitos.

3.1.5.2 Satélites Irregulares. De órbita extremadamente excéntrica y de plano muy inclinado, con rotación y traslación E al W (directa); estos satélites se asocian a asteroides capturados.

Nuestro satélite es la Luna, un satélite regular cuyos períodos de rotación y traslación son iguales, razón por la cual la Luna siempre muestra la misma cara a la Tierra. La Tierra y la Luna podrían considerarse de alguna manera como un sistema doble. Observe estos datos: Diámetro lunar 27% del terrestre, superficie 7.4%, de la de la Tierra, volumen 2.0% de la de la Tierra, masa 1.2% de la de la Tierra, gravedad 16.6% de la de la Tierra.

Por la falta de atmósfera e hidrosfera en la Luna, como consecuencia de su escasa gravedad, entre la cara diurna y nocturna la temperatura pasa de +100 °C a -170 °C.

La conformación de su superficie está condicionada por procesos térmicos internos, volcánicos, tectónicos, magmáticos e impactos meteóricos. Si bien la edad de la Luna y su condición de satélite regular anuncian su carácter congénito con la Tierra, la inclinación del ecuador terrestre ($23^{\circ} \frac{1}{2}$) respecto de la eclíptica serían argumentos a favor de una tesis a favor de su origen catastrófico, asociado a un cataclismo sufrido por la Tierra en su pasado remoto.

Las mareas, surgen del efecto gravitacional combinado, ejercido por la Luna y el Sol, tal cual se muestra en la Figura 10., atracción que varía según las fases de la Luna, lo que afecta las masas fluidas de la atmósfera e hidrósfera, como también a las rocas del manto con su comportamiento plástico a gran escala.

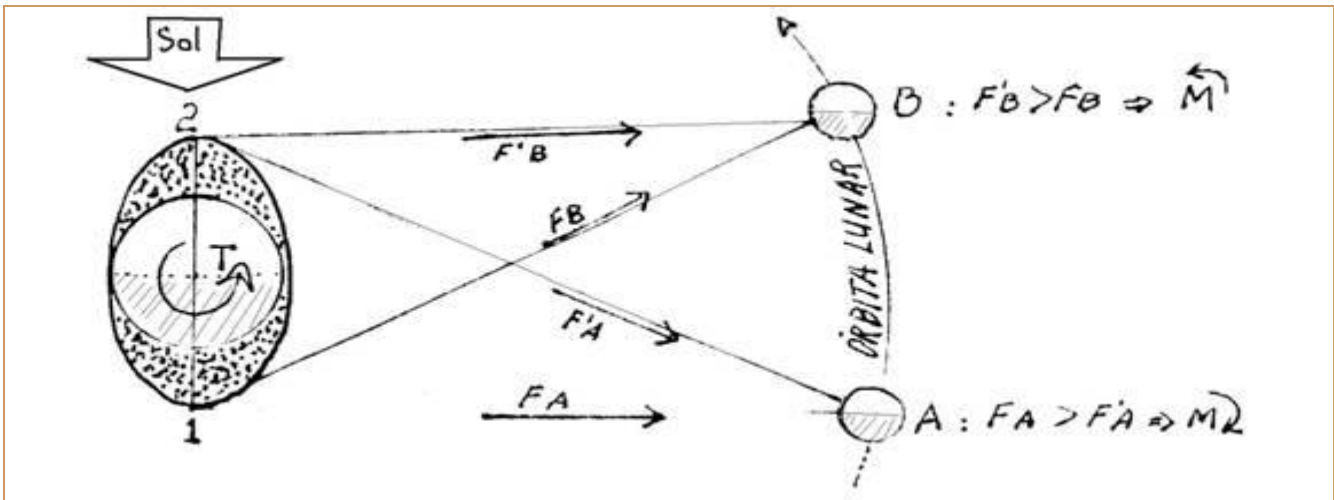


Figura 8B. Efecto de marea sobre el planeta Tierra. Las masas 1 y 2 son atraídas en A y en B, con diferente fuerza. Por ello a lo largo del mes se genera un momento, contrario en A y favorable en B a la rotación de la Tierra (vista desde el Polo Norte). La duración del día de modo diferente en cada caso según el sentido del torque que se muestra en T. Fuente: Guía astronómica, en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/1700/>

3.1.6 Los asteroides y Cinturón de Kuiper. Hoy en día se conocen 2300 asteroides con exactitud para especificar su órbita, pero se han descubierto más de 7000 planetoides o pequeños planetas. Los asteroides son bloques de roca en bruto con densidad media de $3,5 \text{ g/cm}^3$, y de forma irregular, transitan en una órbita interior a la de Neptuno. Los mayores en tamaño son Ceres, de 1003 Km.; Palas, de 608 Km.; Juno, de 247 Km., y Vesta de 538 Km. (magnitudes en km. de diámetro equivalente). Se distinguen tres grupos principales de asteroides: el grupo APOLO, de pequeña órbita y por lo tanto con un perihelio entre el Sol y la Tierra; el grupo AMOR, de órbita mayor cuyo perihelio está entre la Tierra y Marte, y finalmente los TROYANOS, que son los subgrupos Aquiles y Patroclo ubicados sobre las distancias Lagrangeanas ($a \pm 60^\circ$), sobre la órbita de Júpiter donde están libres de perturbaciones gravitacionales.

El **cinturón de Kuiper** lo constituye un conjunto de cuerpos cometarios transneptunianos, que orbitan alrededor del Sol a una distancia de entre 30 y 100 Unidades Astronómicas UA. UA es una Unidad Astronómica UA, equivalente a la distancia media entre la Tierra y el Sol, cuyo valor es 150 millones de km.

3.1.7 Los cometas y la Nube de Oort. Pueden ser periódicos y no periódicos; los primeros tienen varios retornos, los segundos caen al Sol o a Júpiter, o simplemente dan un paso y salen del sistema solar. Los primeros se dividen en los de período corto y período largo, según éste sea inferior o superior a 200 años. Están compuestos de un núcleo (de Metano, CO_2 , hielo sucio y amoníaco) y una cola (sublimación del núcleo por radiación solar en la que las partículas del núcleo se disocian formando polvo, H, O, cianuro, etc., pero ionizados).

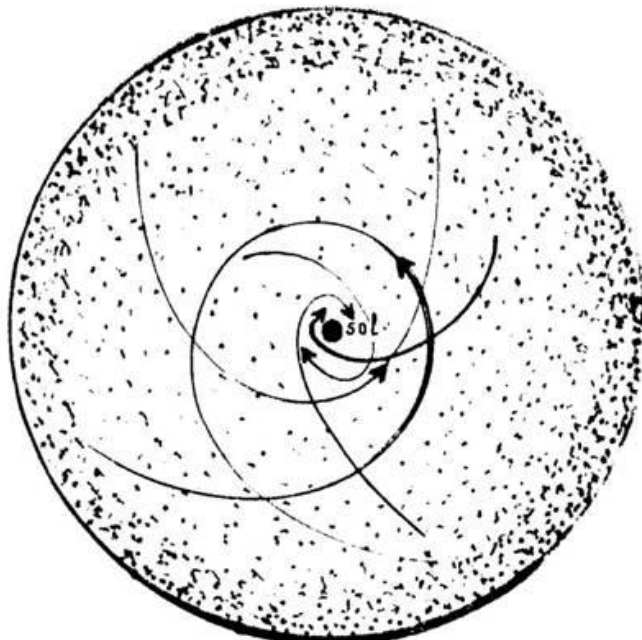


Figura 8C. Nube de Oort. La Nube de Oort, es un vasto halo de 100.000 millones de cometas, que giran en torno al Sol a una distancia de unos dos años luz. Fuente: Guía astronómica, en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/1700/>

La Nube de Oort ubicada entre 100 mil y 200 mil UA (Alfa del Centauro dista 275000 UA), es el remanente del disco protoplanetario que se formó alrededor del Sol hace 4,6 miles de millones de años. La nube exterior se encuentra muy poco ligada al Sol, y es la fuente de la mayor parte de los cometas de período largo, mientras que el Cinturón de Kuiper, localizado más allá de la órbita de Neptuno, a una distancia entre 30 y 50 UA, provee los cometas de período corto.

Se supone que dichos cuerpos celestes constituidos por hielo, polvo y rocas, al resultar capturados por el Sistema Solar gracias a perturbaciones gravitatorias de estrellas vecinas y pasajeras, caen al Sol siguiendo diferentes trayectorias elípticas, parabólicas o hiperbólicas.

Cuadro 2. Distancia a los planetas en unidades astronómicas

Dist. del Sol a	Mer	Ven	Tie	Mar	Ast	Jup	Sat	Ura	Nep	Plu*
Serie	0	3	6	12	24	48	96	192	384	768
Constante	+4	+4 --0,7	+4	+4	+4	+4	+4	+4	+4	+4
Suma÷10= dist.	---		---	---	---	---	---	---	---	---
Según Boode	0,4		1,0	1,6	2,8	5,2	10,0	19,6	38,8	77,2
Valor real UA	0.39	0.72	1.00	1.52	---	5.20	9.54	19.2	30.0	39.3

Gonzalo Duque E. Guía Astronómica, Universidad Nacional, 1992. *Planeta Menor

Para calcular en UA la distancia entre los miembros del sistema solar, a la serie 0, 3, 6, 12... Boode sumó 4 y dividió por 10 el resultado. Se muestran a continuación en unidades astronómicas, la distancia según Boode y la distancia media real, desde al Sol a cada uno de los planetas.

3.1.7.1 Velocidades de escape. Son las velocidades cósmicas. La primera velocidad es la necesaria para que un cuerpo orbite en un campo de gravedad con trayectoria elíptica, y la segunda, para que escape de él con trayectoria hiperbólica. De la segunda velocidad, de escape, depende que un cuerpo celeste tenga atmósfera, pues semejante valor se compara con la velocidad térmica de las moléculas de gas, dada por la siguiente expresión que involucra la temperatura ambiental T:

$$v_{\text{esc}} = \sqrt{2kT/m}$$

Mientras la segunda velocidad, de escape, en la Tierra es 11,2 Km./seg, las velocidades de las moléculas de distintos gases a 300°K de temperatura, son menores: la velocidad térmica de las moléculas de hidrógeno es 1,1 Km./s; la de helio, 0,8 Km./seg, y las de nitrógeno y oxígeno, próxima a 0,3 Km./s. Esto quiere decir que la Tierra puede retener en su atmósfera cualquier gas, pues su gravedad es suficiente para retener moléculas que

a la temperatura media de la atmósfera terrestre alcanzan velocidades por debajo de la primera velocidad de escape.

La primera y segunda velocidad de escape son de la forma:

$$v_1 = \sqrt{gR}$$

$$v_2 = \sqrt{2gR}$$

$$v_2 = v_1\sqrt{2}$$

Siendo g el campo de gravedad y R la distancia media del cuerpo que órbita al centro de masa. La diferencia entre la primera y la segunda expresión es la raíz de dos, razón por la cual en la tercera expresión se expresa una en función de la otra.

Sea el momento para describir los ambientes que pueden posibilitar las atmósferas de los planetas del sistema solar, en términos de las principales variables físicas relevantes para la vida como la conocemos en la Tierra. Se incluye a la Luna como escenario estratégico para la logística y la investigación espacial. Los valores de la siguiente tabla también explican aspectos de los océanos y montañas en los planetas, particularmente la temperatura y la gravedad.

Cuadro 3. Las atmósferas y las gravedades de los cuerpos del sistema solar.

Cuerpo	Radio (m)	Gravedad Tierra=1	Densidad Tierra=1	Temp. (K)	Composición Atmósfera
Sol	$7,0 \times 10^8$	27,90	0,25	5780	e^- , H^+ , H, He
Mercurio	$2,4 \times 10^6$	0,39	0,98	400	Despreciable
Venus	$6,1 \times 10^6$	0,88	0,95	290	CO_2 , N_2 , SO_2
Tierra	$6,4 \times 10^6$	1,00	1,00	250	N_2 , O_2 , H_2O
Luna	$1,7 \times 10^6$	0,16	0,61	250	No hay
Marte	$3,4 \times 10^6$	0,38	0,71	200	CO_2 , N_2
Júpiter	$7,1 \times 10^7$	2,34	0,24	110	H_2 , He, CH_4
Saturno	$6,0 \times 10^7$	0,93	0,125	80	H_2 , He, CH_4
Titán	$2,6 \times 10^6$	0,13	0,34	80	N_2 , CH_4
Urano	$2,5 \times 10^7$	0,79	0,216	55	H_2 , He
Neptuno	$2,2 \times 10^7$	1,09	0,286	45	H_2 , He
Plutón	$1,4 \times 10^6$	0,06	0,36	40	Despreciable?

A. Bialko. Nuestro planeta la Tierra, MIR, 1989.

El Sol es una esfera gaseosa en su totalidad, cuya atmósfera tiene electrones (e^-) y núcleos de hidrógeno (H), o sea, protones. Siguen al Hidrógeno en cantidad los núcleos de helio (He). Al considerar la composición del Sol en función del número de átomos y no de la masa, es probable que de cada 1000 átomos del Sol, 920 sean de Hidrógeno y 80 de Helio.

Si Mercurio, prácticamente no tiene atmósfera (la aceleración de la gravedad y la velocidad de escape son tan pequeñas), Venus, tiene una atmósfera importante de CO_2 y N_2 , sobre la tierra firme, lo que atenúa las variaciones diurnas y nocturnas de la atmósfera. Titán, con un tamaño comparable a Mercurio, tiene menor gravedad pero alcanza a tener atmósfera, a causa de la menor temperatura.

Igualmente la Tierra, tiene una atmósfera importante sobre el océano y la tierra firme, compuesta de N_2 , O_2 y H_2O . Casi todos los procesos meteorológicos ocurren en la troposfera, donde también se forman y están las nubes, mientras en la estratosfera reina ya una calma mayor.

La Luna, no tiene atmósfera, en razón de su baja gravedad. La temperatura en su superficie varía dramáticamente entre el día y la noche desde $+118\text{ }^\circ\text{C}$ hasta $-153\text{ }^\circ\text{C}$, sin que sean factibles los vientos por falta de aire, pero sí la incidencia de la radiación solar por la cara iluminada de nuestro satélite.

Marte, tiene la suficiente gravedad para mantener una atmósfera débil algo similar en composición a la de Venus. Su menor gravedad explica el relieve más accidentado (mayores alturas y depresiones).

Júpiter con temperatura superficial semejante a la de Saturno, muestra una potente atmósfera que se transforma constantemente en líquido. En ambos planetas la composición de la atmósfera es la misma. Titán, por tener masa suficiente, pese al efecto de la temperatura recibida de Saturno, tiene una atmósfera de N_2 y CH_4 , sobre el océano de metano (?).

Mientras Urano y Neptuno, con temperaturas superficiales similares, tienen una atmósfera de igual composición, Plutón, con una temperatura sensiblemente igual no parece poseer atmósfera, en razón de su baja gravedad.

La superficie de Plutón hoy clasificado como planeta menor, es quizá un paisaje helado. Los gases atmosféricos más pesados que la escasa masa del planeta pudiera retener (metano y amoníaco p. ej) tienen que estar completamente helados a las temperaturas que prevalecen allí, pues el punto de congelación del metano es de $-182\text{ }^\circ\text{C}$, el del amoníaco incluso de $-78\text{ }^\circ\text{C}$ y el del anhídrido carbónico $-78,5\text{ }^\circ\text{C}$.

3.2 TEORIAS ACERCA DE LA FORMACION DEL SISTEMA SOLAR

Se subdividen en catastróficas y evolutivas. Cronológicamente son:

3.2.1 Teoría Infinitesimal (Evolutiva) Immanuel Kant, 1755. Supone la existencia de polvo describiendo órbitas. Posteriormente esta nube de materia en suspensión se compacta formando los miembros del sistema solar, tras una acreción gravitacional, es decir, un colapso de esa nube debido a que su densidad ha superado un cierto valor crítico.

3.2.2 Teoría de la Nebulosa (Evolutiva) Simón Laplace, 1796. Supone una bola de gas caliente en rotación la cual, al enfriarse la masa, sufre achatamiento y de éste modo el desprendimiento gradual de anillos del sistema. Por cada anillo ecuatorial separado de la nebulosa se forma un planeta del sistema solar, a partir de núcleos de acreción.

3.2.3 Teoría Planetesimal (Catastrófica). Chamberlain-Moulton, 1905. Supone una estrella que se aproxima al Sol para arrancarle hinchazones ígneas; estas explosiones levantan materia pero los brazos que caen chocan con brazos en ascenso, resultando de las colisiones pequeñas esferas de tamaños variables y órbitas diferentes llamadas planetesimales: del choque entre ellas se formarán los planetas.

3.2.4 Teoría de la Gota (Catastrófica) Jeans-Jeffreys, 1919. Recoge las dos teorías anteriores. La estrella invasora al aproximarse al Sol, le arranca una inmensa gota de gas en estado caliente que al enfriarse se fragmentará produciendo esferas de tamaño ordenadamente variable (planetas).

3.2.5 Teoría Magnetohidrodinámica (Evolutiva) Hoyle, 1960. Las teorías evolutivas habían perdido su vigencia porque no explicaban por qué mientras el Sol tiene el 99.9% de la masa del sistema solar, en los planetas se concentra el 98.0% del momento cinético; ello da origen a teorías catastróficas que resuelven el problema mas el principio de la magnetohidrodinámica salva la dificultad y se regresa a las teorías evolutivas.

Dice el principio de la magnetohidrodinámica que los gases responden a las leyes de la gravedad, la presión y la rotación cuando se encuentran en un campo magnético sostenido por una corriente eléctrica, y esa ley gobierna las nubes de polvo compuestas de gases ionizados en rápida rotación. Un gas ionizado es tan buen conductor de electricidad como un alambre de cobre.

La teoría supone que a través de esos gases que invadían el espacio, corrían líneas de fuerza magnetohidrodinámicas a manera de hilos largos y elásticos; en las partes internas de los filamentos el gas era más lento que en las porciones externas. Con el giro flexible se favorecen las turbulencias dentro del sistema provocándose el enroscamiento y alargamiento de los hilos en espiral y, al mismo tiempo, una transferencia del momento angular hacia las porciones exteriores, donde se formarán posteriormente los planetas, todo, a expensas de la parte central enriquecida de masa y donde se formará el Sol.

3.2.6 Nueva nomenclatura del Sistema Solar En 2006 la Unión Astronómica Internacional (IAU) redefinió las categorías de objetos celestes en tres tipos: planeta, planeta enano y cuerpo menor del Sistema Solar, por lo que el término "planeta menor" perdió su vigencia. La UAI acordó ese año definir un planeta como un cuerpo celeste, que cumpla estas tres condiciones: A) Orbitar alrededor de una estrella o remanente estelar. B) Tener masa suficiente para que su gravedad supere las fuerzas del cuerpo rígido, de manera que asuma una forma

en equilibrio hidrostático y por lo tanto que sea prácticamente esférico. C) Que tenga dominancia orbital lo que significa haber limpiado la vecindad de su órbita de planetesimales.

Los planetesimales son objetos sólidos que pertenecen a los discos protoplanetarios de la nebulosa primitiva, conformada por gas, polvo y partículas sólidas masivas que actuarían como núcleo de condensación, para dar lugar en el curso de millones de años a estos objetos sólidos cada vez más grandes que son el germen de los planetas.

Como consecuencia de esto, Plutón, que hasta entonces se consideraba planeta, pasa a clasificarse como planeta enano, junto a Ceres, el más pequeño de los planetas enanos dentro del sistema solar, cuerpo celeste de 952 km de diámetro, que se ubica entre las órbitas de Marte y Júpiter. El concepto de Planeta menor sustituye ahora el de planetoide de la anterior clasificación que queda en desuso.

3.3 FORMACION DE LA TIERRA

Hace 4500 millones de años se forma la Tierra por aglomeraciones de partículas sólidas del espacio; pero el calor de la acreción (por el colapso gravitacional) y el de desintegración de elementos radiactivos, produce el núcleo de hierro líquido rodeado de materia turbulenta (calor).

Posteriormente por diferenciación de densidades de masa, el núcleo se rodea de un manto y éste de una corteza primitiva. Los gases atrapados por el manto escapan de la corteza produciendo una atmósfera enriquecida en agua. Seguidamente sobreviene la precipitación para formar los océanos, en un proceso que dura 1500 millones de años. Como resultado aparece la atmósfera en la que el oxígeno se liberará gracias a la luz ultravioleta y a la fotosíntesis de los primeros organismos vivos.

En la atmósfera inicial, tan similar a la de las actuales emanaciones volcánicas, el 75% es vapor de agua, mientras en la actual atmósfera actual es sólo del 4%.

La vida en la Tierra se inicia en los océanos hace más de 3000 millones de años. En esta historia de evoluciones el clima ha mostrado dramáticas modificaciones. El último período glacial terminó cerca de 10000 años atrás y al retroceder los hielos, el nivel del océano comenzó a subir rápidamente, alcanzado su nivel actual 6000 años atrás.

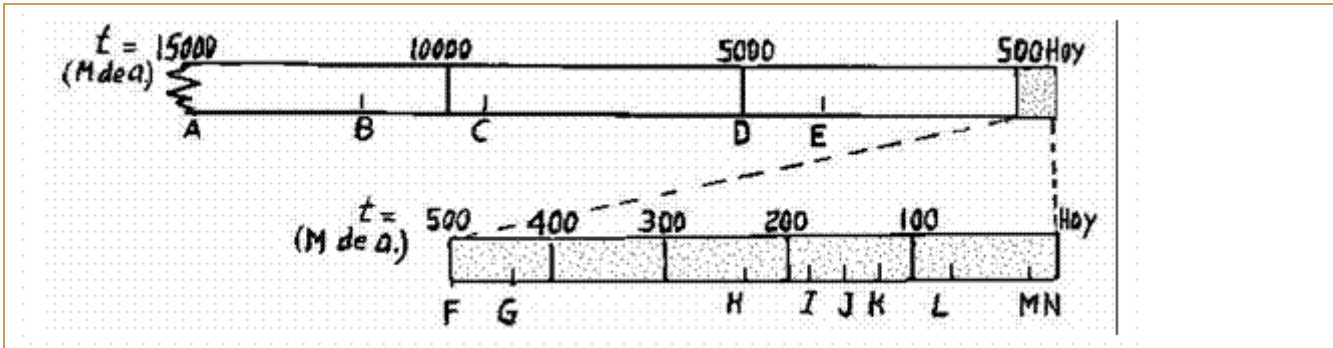


Figura 9. Diagrama temporal. El diagrama muestra cuánto tiempo hace que ocurrieron algunos acontecimientos importantes. Los últimos 500 millones de años se amplifican con un zoom. A. Big-Bang, B. formación de la galaxia, C. cúmulos globulares, D. formación del sistema solar, E. comienzo de la vida en la Tierra, F. abundancia de fósiles, G. vida en tierra firme, H. formación de Pangea, I. aparición de los dinosaurios, J. rotura de Pangea, K. aparición de los mamíferos, L. extinción de los dinosaurios, M. hombre primitivo, N. actualmente (tiempo en millones de años). Adaptado de El Universo Desbocado, Paul Davies.

3.4 EVOLUCIÓN ESTELAR

Las nubes de gas y polvo interestelares están sometidas a dos fuerzas: como quiera que la masa se encuentra en rotación y posee alguna temperatura, una fuerza centrífuga asociada a la rotación de la nebulosa y otra termodinámica por el calor que trata de expandirla. A estas fuerzas, se opone la atracción ejercida por la gravedad de la enorme masa de gas y polvo.

Si la gravedad domina a las fuerzas de repulsión, se da el colapso gravitacional de la nube, aumentando su densidad, y disminuyendo su volumen e incrementando su velocidad de rotación para conservar el momento cinético, al tiempo que se eleva la temperatura de la masa por la energía de acreción.

Tras el colapso de la nube, se forma una **protoestrella** caliente, que emite radiación infrarroja y luego, a una mayor temperatura interior se forma una **protoestrella brillante** (atmósfera enrarecida). Con el colapso sucesivo, cuando la temperatura interior supere los 10 millones de $^{\circ}\text{C}$, aparecerá la **estrella**, al iniciarse la fusión nuclear consistente en convertir hidrógeno en helio por dos vías: la línea **protón-protón** y el ciclo **C-N-O** o del carbono. En ambos procesos la masa inicial de los cuatro protones, supera la masa final en Δm , cuántía que se convierte en la energía propia de la estrella, según la fórmula $E = \Delta mc^2$.

En la fase de gigante roja, a mayor masa, mayor temperatura y mayor escala de reacciones termonucleares, hacia los elementos más pesados (Ne, Mg, Si, S, Ca, Ti, Va, Cr, Mn, Fe); más allá del hierro no se puede dar la fusión nuclear, porque este absorbe energía estelar fisionándose en He, con lo cual, se produce el cese súbito de la presión de reacciones haciendo explotar la estrella en forma de supernova, produciéndose una onda de choque donde se podrán formar otros elementos pesados.

Mientras la estrella convierta H en He, estará en la **secuencia principal**. Las estrellas de menos de una masa solar duran más y toman la línea protón-protón; las de más de tres masas solares lo harán por el ciclo C-N-O; en

las de masa intermedia, el primer proceso de nucleosíntesis se dará en la periferia del núcleo, y el segundo en su interior. Si la masa de la nube primigenia es menor que el 7% de la masa solar, no habrá fusión nuclear (planeta), y si supera unas 75 masas solares, el sistema se hace inestable y colapsa todo o explota, porque la presión interior se debería a los FOTONES y no a los electrones y a los núcleos atómicos, para estas masas.

La gigante roja se convertirá en **enana blanca**, cuando ya se "tranquilice" el núcleo estelar, permitiendo que la escasa envoltura gaseosa pueda colapsar: cada que se agota un combustible nuclear se pierde soporte y masa, colapsa el astro y aumenta su temperatura pudiendo reencender el núcleo y tomar un nuevo combustible, generándose una onda de choque que afecta la envoltura y una pérdida de masa estelar.

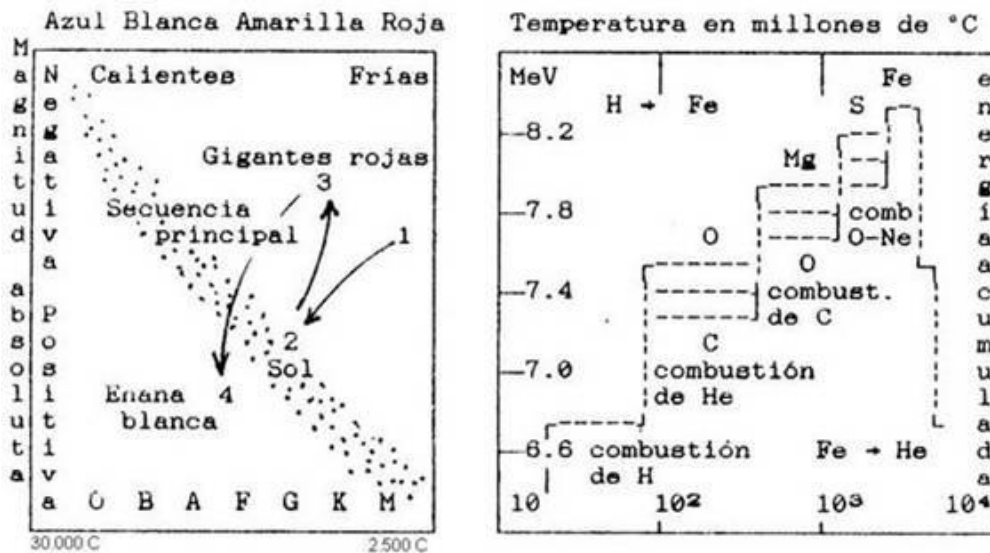


Imagen 8: La historia del Sol y la nucleosíntesis estelar: En el diagrama H-R de la izquierda observamos: 1 = protoestrella, 2 = secuencia principal, 3 = gigante roja, 4 = enana blanca. A la derecha el diagrama de la evolución nuclear estelar con la nucleosíntesis H@Fe y su fisión Fe@He. Fuente, Guía astronómica. <http://www.bdigital.unal.edu.co/1700/>

Si en promedio, las estrellas permanecen el 90% de su vida en la fase estable de la secuencia principal, las de gran masa solo duran algunos millones de años, mientras las de pequeña masa permanecen varios miles de millones de años. El Sol duraría 10^{10} años. El 10% restante de la vida de la estrella se desarrolla en los estadios de gigante roja o supergigantes según la masa estelar, donde pueden tener varios procesos de nucleosíntesis, agotando un combustible y para tomar como fuente de energía los elementos previamente formados, hasta llegar al estadio terminal como enana blanca, y morir luego como estrella, dejando un cuerpo inerte, oscuro y denso, una estrella neutrálica o un agujero negro, según su masa final este por debajo de 1,4 masas solares en el primer caso, o por encima de 2 masas solares en el tercero.

3.5 LA GALAXIA

Una galaxia es una **Isla de estrellas** inmersa en nubes de gas y polvo, en cuyo interior se organizan las estrellas en cúmulos unidos por la gravedad. Existen dos clases de cúmulos estelares: los **cúmulos globulares** o

cerrados de forma esférica, constituidos por con cientos o miles de estrellas viejas y de bajo contenido metálico (Estrellas de la población II); y los **cúmulos galácticos o abiertos**, conformados por algunos cientos de estrellas jóvenes y de alto contenido metálico (Estrellas de la población I), con su forma irregular dada la dispersión de sus miembros.

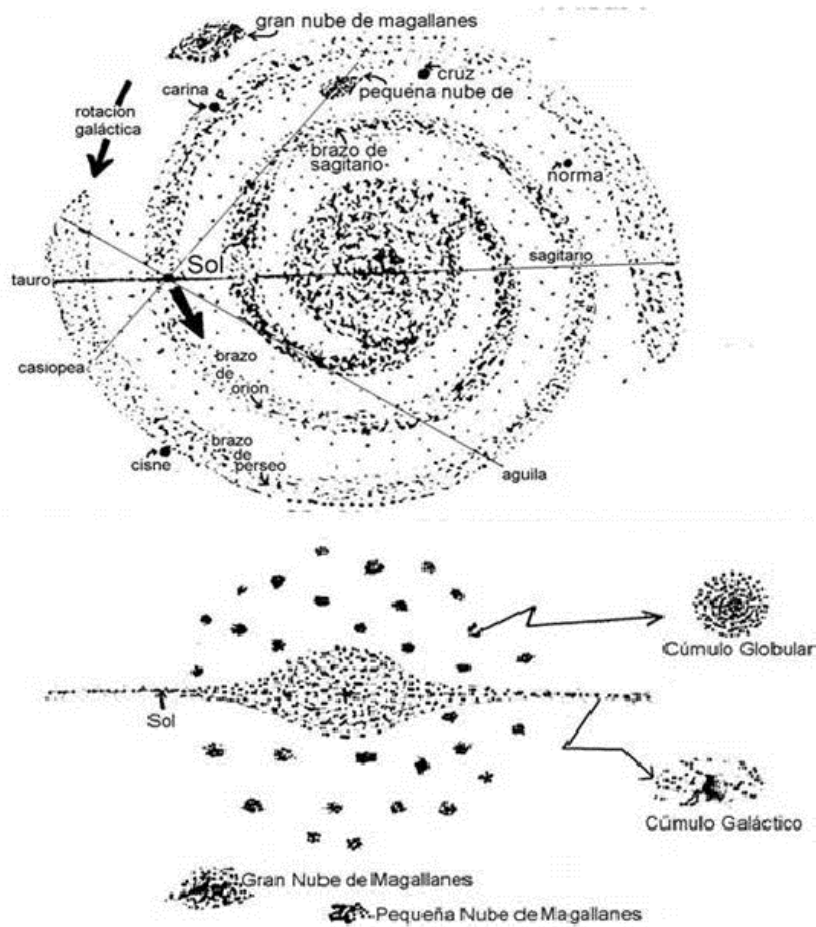


Imagen 9: La Vía Láctea: se muestran planta y perfil de nuestra galaxia, indicando la rotación galáctica, las dos Nubes de Magallanes, el Sol sobre el brazo de Orión, entre los brazos de Sagitario y Perseo, y en detalle la estructura de un cúmulo galáctico o abierto y otro globular o cerrado. Fuente, Guía astronómica. <http://www.bdigital.unal.edu.co/1700/>

Aunque existen varias clases de galaxias (irregulares, espirales, elípticas...), nuestra galaxia, denominada La Vía Láctea, que pertenece a las galaxias espirales, muestra una estructura típica de forma barrada, constituida por tres partes bien diferenciadas: **Halo, Disco y Núcleo**.

El disco es el contorno de los brazos espirales localizados en el plano medio, donde las estrellas son jóvenes y se encuentran sumergidas en medio de gas y polvo. Las estrellas aquí, en cúmulos galácticos generalmente, están orbitando con trayectorias muy circulares y siempre perpendiculares al eje de rotación de la galaxia. Por lo tanto, si las estrellas del **halo** galáctico no comparten la rotación galáctica, las del **disco** si la comparten.

La rotación galáctica es diferencial. Los objetos del centro son rápidos y los del disco lentos. **El núcleo** galáctico se sitúa en el centro y es la región con mayor densidad de estrellas; su forma es esferoidal achatada y su rotación como la de un sólido rígido. El Sol podría pasar de un **brazo** a otro, mientras transita la galaxia con órbita casi circular.

La **Vía Láctea**, nuestra galaxia, posee una masa equivalente a 100 mil millones de soles; su diámetro es de 100 mil años luz y el espesor de 20 mil años luz; el Sol ubicado sobre el plano galáctico a 30 mil años luz del centro, **órbita la galaxia** a 250 km/seg en 225 a 250 millones de años. La Galaxia es Espiral Barrada. Los tres brazos espirales de la Vía Láctea, más relevantes, y su distancia al centro galáctico, son: Sagitario a 24 mil años luz, Orión (conteniendo el Sol) a 30 mil años luz y Perseo a 36 mil años luz.

Las dos nubes de Magallanes son pequeñas galaxias irregulares, satélites de la Vía Láctea; la mayor, con un diámetro de 35 mil años luz, está a 160 mil años luz y contiene tiene 10000 millones de estrellas; la menor cuyo diámetro es de 20 mil años luz, se ubica a 190 mil años luz y contiene tiene 1000 millones de estrellas.

La Vía Láctea, es un miembro del **Grupo Local**, nuestra hipergalaxia, conformado por unas 30 galaxias, siendo las más importantes la nuestra y la de Andrómeda; ambas ubicadas en los extremos del sistema. A dicho cúmulo pertenecen M 32 (compañera de Andrómeda), M 33 (Nebulosa del Triángulo), And I, And II, And III (compañeras de Andrómeda), Leo I, Leo II (ambas a 750 mil años luz), entre otras. Todo el cúmulo de galaxias abarca un volumen cercano a los 2.5 millones de años luz de radio.

A su vez, El Grupo Local pertenece al **Súper Grupo Local** (metagalaxias), cuyo centro es Virgo, sistema ubicado a 50 millones de años luz de nosotros y compuesto por miles de galaxias ligadas gravitacionalmente, en estructuras hipergalácticas. Entre su medio centenar de miembros, diseminados en un radio 75 millones de años luz, se destacan: Osa Mayor, Canes Venatici, Sculptor, Grupo Local, M 66, M 101, M 81, los NGC 4274, 3245, 5566, etc.

3.6 SOL, CLIMA Y CALENTAMIENTO GLOBAL *

Para las ciencias de la Tierra, uno de los dilemas por resolver, es: hasta qué punto influye la actividad solar en el clima terrestre. De conformidad con los modelos heliofísicos, es el magnetismo de la atmósfera solar quien influye en la luminosidad del Sol, y por lo tanto en los cambios en radiación solar, fenómeno cuya evolución inferida a partir de mediciones y aplicación de modelos, permite elaborar pronósticos sobre el complejo comportamiento del Sol, necesarios para estimar las tendencias del clima terrestre. Aunque astrónomos y geofísicos soportados en correlaciones, pueden afirmar que cuando el Sol está tranquilo la Tierra permanece fría, aún no sabemos el por qué de los cambios de la actividad del Sol, así en 2002 se haya logrado desentrañar el misterio de los neutrinos solares.

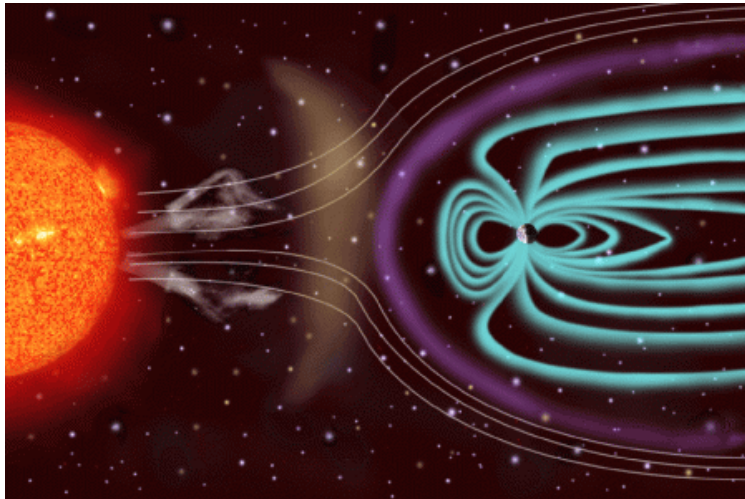


Imagen 10: Magnetósfera terrestre y viento solar, en: <http://sohowww.nascom.nasa.gov>

Cuando hablamos del clima, nos referimos a las condiciones de la atmósfera en una región, durante un periodo de largo plazo; no obstante a nivel global, el Sol puede influir en el clima de diversas maneras, incidiendo sobre la temperatura, la humedad, la precipitación, la presión y los vientos de un determinado territorio, así estos elementos estén determinados por factores como la latitud, la altitud, el relieve y la distancia al mar. A modo de ejemplo, el agujero en la capa de ozono descubierto sobre la Antártida en 1985, no sólo parece ser provocado por la actividad humana, sino también por los rayos ultravioletas provenientes del Sol: al debilitarse el efecto fotoquímico con la destrucción de esta capa que filtra la radiación solar, la alta energía incidente que llega a la Tierra modifica nuestro clima, de la misma forma en que lo venimos haciendo con la actividad antrópica durante el último siglo.

Con sus dinámicas estelares, tales como el ciclo de 11 años de las manchas solares, el Sol modifica la estructura del campo magnético de nuestro planeta, presentándose la expansión y contracción de la atmósfera terrestre, con las variaciones en las temperaturas y densidades de la magnetosfera. Evidentemente, la imposibilidad de una predicción a largo plazo del comportamiento solar, así sea teórica, es que al ser la actividad solar un fenómeno caótico, en lugar de predicciones lo que procede es la elaboración de pronósticos. Este tipo de estimaciones, propio para cualquier fenómeno caracterizado por las incertidumbres, se dificulta en el caso del Sol, por el desconocimiento exacto del campo magnético solar y por la falta de registros históricos sobre radiación solar y rayos cósmicos, así la relación entre cambios de luminosidad solar y energía recibida en la Tierra, sea prácticamente lineal.

Para ilustrar los cambios del clima que se han dado en todas las escalas de tiempo, a lo largo de la historia de la Tierra, tenemos además de las cinco grandes glaciaciones, cuyo último evento ocurrió en el Cuaternario, dos situaciones antagónicas y recientes: una, la “pequeña glaciación” asociada a un periodo frío ocurrido entre 1550 y 1850, en el que se presentaron tres picos fríos (1650, 1770 y 1850), pequeña edad del hielo acompañada de lluvias que coincidió con un periodo de baja actividad en las manchas solares. Y dos, el actual “calentamiento global” un efecto invernadero de celeridad excepcional ocurrido en los últimos 50 años, en el que la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera ha alcanzado un nivel sin precedentes en los últimos de 500 mil años, fenómeno cuya característica fundamental es la ocurrencia de eventos climáticos extremos.

Para mostrar el alcance de la actual problemática, dos escenarios. El Ártico, está en peligro por el calentamiento global: el fenómeno facilita actividades depredadoras que amenazan esta “última frontera”, tales como prospecciones petroleras, pesca industrial y tráfico interoceánico. Degradar dicho ecosistema, traerá consecuencias insospechadas como elevación del nivel del mar, erosión costera y temporales. Y la Amazonía, donde el cambio climático y la deforestación comprometen este ecosistema que alberga el 30% de la biodiversidad de la Tierra; allí donde la selva se transforma en sabana, los apetitos del mercado presionan por los recursos del tercer reservorio de materias primas estratégicas del planeta, después del Oriente Medio y la Antártida. La degradación de la Amazonía traerá consecuencias trágicas para los pueblos indígenas que la habitan y para la biodiversidad, además de severas afectaciones climáticas globales.

* [Ref. GDE. La Patria. Manizales, 20014.08.4]

3.7- CIEN AÑOS DEL UNIVERSO RELATIVISTA DE EINSTEIN

Entre 1915 y 1916, tras formular la teoría de la Relatividad General, Albert Einstein desarrolla el primer modelo matemático del universo. Se trata de un universo estático, homogéneo e isótropo a gran escala, para el cual introduce la Constante Cosmológica, soportada en el Principio Cosmológico según el cual el universo observado desde cualquier lugar, siempre tiene la misma apariencia. Einstein resolvió sus ecuaciones, modelando la materia como un fluido de partículas homogéneamente distribuido en el espacio, e introduciendo su constante como una modificación a su ecuación original del campo gravitatorio, necesaria para conseguir una solución ajustada a un universo estático.

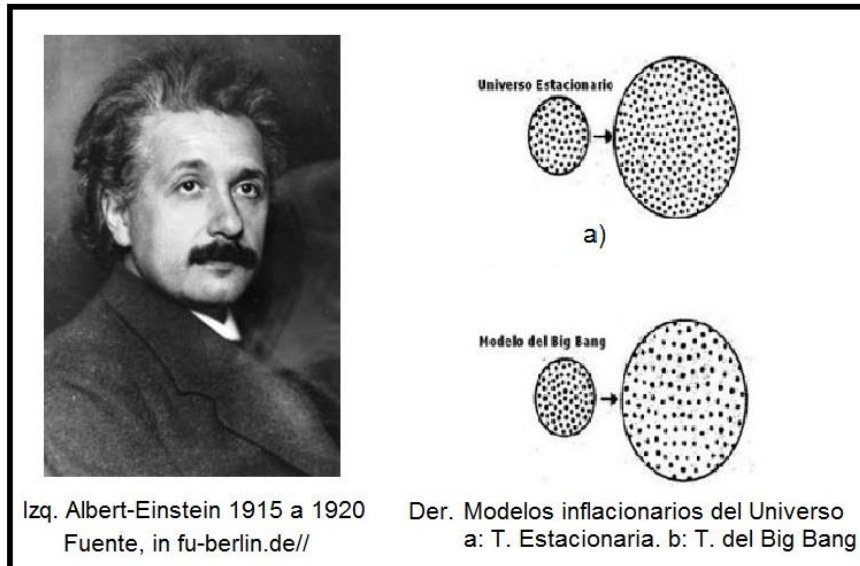


Imagen 11A: Albert Einstein en <http://www.bdigital.unal.edu.co/50753/> y Modelos Cosmológicos Inflacionario y del Big Bang, en fu.berlin.de y en <http://galeon.com/guiaastronomica/>

Dicha visión completamente revolucionaria sobre un universo relativista, donde la materia, el espacio y el tiempo están interconectados, y en el cual la gravedad se interpreta como una curvatura del espacio-tiempo, causa escepticismo general al presentar hipótesis que exigían mayores pruebas. El responsable de verificar una hipótesis fundamental de dicha teoría, en la que uno de los científicos más importante del siglo XX

pronosticaba la curvatura de la luz en un campo gravitatorio, fue Stanley Eddington, quien a petición de la Real Sociedad observa el fundamental hecho en el eclipse del 29 de mayo de 1919, desde la isla Príncipe en la costa este de África.

Al conocerse en la conferencia de Eddington la prueba del efecto gravitacional causado por el Sol en la trayectoria del rayo de luz, el titular del New York Times del 6 de noviembre de 1919, dice: “Descubierto un nuevo universo”, noticia que hace célebre a Albert Einstein de la noche a la mañana, y que consolida la Relatividad General como una teoría que resuelve de forma definitiva problemas fundamentales de la física clásica. Una década después, en 1929 el padre de la cosmología observacional Edwin P. Hubble, al encontrar el corrimiento al rojo en el espectro de las galaxias distantes descubre la expansión relativista del universo, un fenómeno que permite advertir además del movimiento propio de estas enormes islas de estrellas, otro movimiento asociado a la dinámica del espacio-tiempo que las contiene y arrastra.

Frente a la evidencia de que el universo se está expandiendo, y que los cálculos teóricos mostraban que en relatividad general un universo estático era imposible, aunque eminentes astrónomos mantenían su teoría del Estado Estacionario, afirmando que el universo al no cambiar su apariencia con el tiempo tampoco tendría principio ni fin, surge como contraposición la teoría del Estado Inflacionario del universo, propuesta de Bondi y Gold según la cual si el universo se expande como un todo, se requiere la creación continua de materia para que la densidad permanezca constante y su apariencia se mantenga.

Posteriormente, gracias a los trabajos de físicos notables como Alexander Friedman en 1922 y Georges Lemaître en 1927, quienes utilizan la teoría de la relatividad para demostrar la dinámica del universo observada por Hubble expresada en ecuaciones que describen un universo que puede expandirse o contraerse, en 1948 el físico ucraniano George Gamow soportado en la teoría del Núcleo Primordial de Lemaître, construye la teoría del Big Bang en la que plantea que el universo había surgido de una gran explosión.

La prueba definitiva a favor del Big Bang vino con el descubrimiento de la radiación de fondo de microondas al detectarse en 1965 una radiación de fondo omnidireccional con características térmicas, y recientemente con el COBE que puesto en órbita en 1989 logra medir la temperatura residual de esa gran explosión primigenia, y con otros instrumentos que han a detectar las anisotropías de los vestigios del evento que da origen a un universo homogéneo e isótropo lleno de materia ordinaria, el cual podría expandirse indefinidamente o frenar su expansión lentamente, hasta producirse una contracción universal, denominada el Big Crunch.

Hasta acá, este centenario del “universo determinístico” de Einstein, importante hoy como punto de partida para el nuevo “universo probabilístico” de la mecánica cuántica, donde la incertidumbre consustancial a la naturaleza tiene leyes que la gobiernen, máxime ahora cuando la Constante Cosmológica incorpora un papel fundamental en la ciencia del mundo: según las observaciones obtenidas aplicando técnicas recientes se ha conseguido determinar un valor diferente de cero para dicha constante, y su papel como materia oscura en la expansión acelerada del universo.

[Ref.: La Patria. Manizales, 2016-02-1] <http://oam.manizales.unal.edu.co>

3.8- EL MISTERIOSO LADO OSCURO DEL UNIVERSO

Cuando se estima que el universo se constituye en un 73 % de energía oscura, 23 % de materia oscura y 4 % de materia bariónica o en forma de átomos, de conocerse esa materia oscura que se rastrea tanto en laboratorios desde el espacio como en complejos subterráneos, la astronomía podría dar origen a una revolución comparable a la de tránsito del Medioevo al Renacimiento, en tiempos de Nicolás Copérnico (1473-1543) quien sustituye el modelo geocéntrico por el heliocéntrico que consideraba la Tierra centro del universo, o la de hace un siglo cuando el universo pasa a describirse como un todo mediante la teoría de la gravitación de Albert Einstein (1879-1955) que sustituye la gravedad Newtoniana por la curvatura del espacio-tiempo cuya expansión relativista descubre Edwin Hubble (1889-1953) observando los espectros de extrañas nebulosas, que resultan ser otras galaxias ubicadas más allá de la Vía Láctea, alejándose de nosotros a velocidades crecientes.

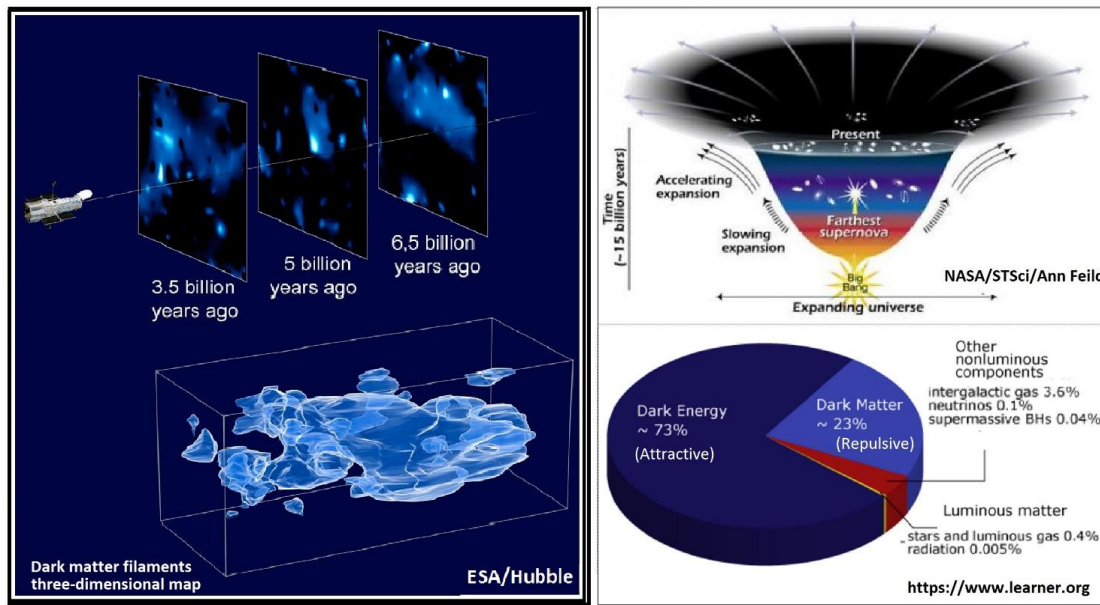


Imagen 11B: Materia oscura y Energía oscura. Imágenes, en: <https://www.spacetelescope.org> and <https://science.nasa.gov> and <https://www.learner.org>

Pero ¿en qué anda la Cosmología moderna?: primerio, tenemos las teorías de Stephen Hawking (1942), quien intenta aunar la relatividad general con la teoría cuántica, e instituye ideas sobre los agujeros negros y el origen del tiempo, en las que argumenta que el universo no tiene bordes y propone el tiempo imaginario, al sostener que en lugar de una singularidad del espacio-tiempo forman una superficie cerrada sin fronteras. Y segundo, la hipotética existencia de una materia oscura que no emite radiación alguna, inferida de las observaciones fundamentales de la astrónoma estadounidense Vera Rubin (1928-2016), pionera en la medición de la rotación anómala de las estrellas dentro de una galaxia, ya que si en el Sistema Solar según las leyes de Newton y Kepler la velocidad de rotación planetaria decrece conforme aumenta la distancia al Sol como centro de masa, mientras en las galaxias se mantiene.

Para conocer la dificultad de obtener evidencias de dicha materia oscura, recordemos cómo las ondas gravitacionales que predice en 1916 Einstein, apenas fueron detectadas un siglo después, en 2015, cuando esos rizos o vibraciones en el espacio-tiempo que viajan a la velocidad de la luz, pudieron ser encontrados

mediante un gran instrumento óptico de precisión desarrollado por los institutos tecnológicos Caltech y MIT en el marco del proyecto de un Observatorio de Interferometría Láser de Ondas Gravitacionales LIGO. El detector subterráneo LIGO con sus brazos ortogonales de 4 km de longitud que comenzó a construirse en 1999, al lograr sus primeras observaciones entre 2001-2007 debió actualizarse para hacerlo una máquina 10 veces más potente, capaz de identificar las ondas gravitacionales cuyas variaciones equivalentes a una diezmilésima parte del diámetro de un átomo, transformarán la astronomía porque el universo es casi transparente a ellas.

Volviendo a la materia oscura: cuando otros astrónomos confirman que a nivel de las galaxias, también las estructuras estelares giraban de una manera inesperada, tal cual lo observa Vera Rubin al encontrar que la velocidad de las estrellas continúa igualmente tan alta en la periferia como en el centro de la Vía Láctea, se formula la hipótesis de la materia oscura diseminada de forma no uniforme y a gran escala, estimándose según dicha teoría que de la masa total de nuestro universo la mayor proporción estaría conformada por otra clase de materia cuya naturaleza desconocemos, ya que apenas se ha mapeado su ubicación en torno a las galaxias gracias a que con su gran masa desvía la luz procedente de objetos distantes y brillantes no visibles que las interfiere, al actuar la materia oscura como lentes gravitacionales.

Incluso, si desde principios del 2000, se propone la existencia de una energía oscura uniforme, que al ejercer una presión negativa en el espacio-tiempo similar a la de la constante cosmológica, explicaría la actual expansión acelerada del universo, también sabemos que la materia oscura, que no son neutrinos, ni átomos, ni materia oscura, es todavía un gran misterio. Al igual que el Bosón de Higgs que teóricamente desde 1964 nace para explicar el origen de la masa de las partículas elementales, solo hasta 2012 pudo comprobarse su existencia con el acelerador de partículas CERN, similarmente el tipo de partículas fantasmas que componen la materia oscura, esperan ser capturadas por sensibles detectores, para desentrañar su misteriosa naturaleza y abrir una nueva era en el conocimiento del universo.

[Ref.: La Patria- Manizales, 2019.01.16]

Lecturas complementarias

La astronomía en Colombia: perfil histórico.

Astronomía Muisca del Altiplano Cundiboyacense. La hazaña de Colón, un desafío para la Navegación y la Cartografía. Localización de Cartagena y Santa Marta. La Expedición de Mutis y la Astronomía en la Nueva Granada. El primer Observatorio Astronómico para América: el de Mutis en Santafé de Bogotá (OAN). El criollismo científico a partir de Francisco José de Caldas. González Benito y Julio Garavito: los máximos exponentes. El OAN y la Astronomía colombiana en el Siglo XX. La creación de la Escuela, la Red de Astronomía de Colombia RAC y algunos hechos notables y exponentes de esta actividad. Nuevos desafíos: a propósito de las dos mayores empresas científicas en la historia de la ciencia colombiana: La Expedición Botánica de Mutis y la Misión Corográfica de Codazzi, vamos ahora por el conocimiento de nuestra biodiversidad para apropiarnos el patrimonio biótico de la Nación, y por una nueva cartografía temática y de detalle, y por la construcción de la identidad cultural de las subregiones en esta Colombia pluricultural. Ver en: http://www.bdigital.unal.edu.co/1703/4/gonzaloduqueescobar.20097_parte2.pdf

Descubrir el Universo desde Colombia.

Los dos hechos científicos más relevantes en la corta historia de Colombia, son la Real Expedición Botánica del Nuevo Reino de Granada y la Misión Corográfica. Hoy cuando los astrónomos, entre otros asuntos que se ubican en la frontera

del conocimiento, intentan conocer la geometría del espacio, la naturaleza de la materia oscura y los misterios del tiempo, en Colombia nuestros científicos tienen pendiente entre otros aportes para la construcción de la Nación, apoyar tareas fundamentales y estratégicas para continuar y complementar la labor de Mutis y de Codazzi.

Ver en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/1588/1/gonzaloduqueescobar.2009.pdf>

Caldas, el precursor de la ciencia neogranadina.

Francisco José de Caldas y Tenorio, un académico granadino, ilustrado naturalista, recolector de minerales y plantas, además de ingeniero militar, geógrafo y astrónomo, también destacó como periodista y prócer de la independencia de Colombia. Se han cumplido 200 años de la muerte de este hombre nacido en Popayán el 4 de octubre de 1768 y muerto en Santafé el 28 de octubre de 1816. Quienes habitamos esta comarca que lleva su nombre, tenemos el deber de conocer su obra y pensamiento, para proyectar y honrar su memoria

Ver en <http://www.bdigital.unal.edu.co/54140/1/caldaselprecursordelaciencianeogranadina.pdf>

Julio Garavito Armero (1865-1920)

Notable astrónomo, matemático e ingeniero colombiano, que nace y muere en Santafé de Bogotá, cuyas investigaciones contribuyeron al desarrollo de las ciencias en Colombia. Fue el primer Director de la Revista Anales de Ingeniería, de la SCI. En 1887 ingresó a como profesor de Universidad Nacional de Colombia, donde se desempeña como Director del Observatorio Astronómico Nacional durante 27 años. Ver en:

<https://godues.wordpress.com/2007/10/02/la-astronomia-en-colombia-julio-garavito-armero-partes-4-y-5-de-5/>

Cultura & Astronomía

Este periplo por los caminos de la ciencia, con información relativa a la astronomía desde las antiguas civilizaciones hasta la época actual, es un material preparado para el Taller de Astronomía que se dicta a alumnos de últimos grados de secundaria, a estudiantes de pregrado y a aficionados a la astronomía desde 1.985 por el Observatorio Astronómico de Manizales OAM, dependencia de la Universidad Nacional de Colombia

Ver en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/12426/1/gonzaloduqueescobar.201416.pdf>

ENLACES TEMÁTICOS DEL OAM

GUÍA ASTRONÓMICA. Book. (15 Book Section). Duque Escobar, Gonzalo (2003) Universidad Nacional de Colombia. <http://www.bdigital.unal.edu.co/1700/>

ENLACES U.N. DEL OBSERVATORIO ASTRONÓMICO DE MANIZALES OAM

<https://godues.wordpress.com/2016/08/03/enlaces-del-observatorio-astronomico-de-manizales-oam/>

TEMAS DE CIENCIA, TECNOLOGÍA, INNOVACIÓN Y EDUCACIÓN U.N.

<https://godues.wordpress.com/2012/06/22/temas-de-ciencia-tecnologia-innovacion-y-educacion/>

JOSÉ MARÍA GONZÁLEZ BENITO (1843-1903) <https://godues.wordpress.com/2007/10/02/la-astronomia-en-colombia-jose-maria-gonzalez-benito-parte-3-de-5/>

ELEMENTOS PARA UNA VISIÓN ESTRUCTURADA DEL DESARROLLO DE CALDAS

<http://www.bdigital.unal.edu.co/44850/1/elementosparaunavisiondecaldas.pdf>

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
(1867-2017)



MANUAL DE GEOLOGIA PARA INGENIEROS

Gonzalo Duque-Escobar

MANIZALES, 2016

<http://www.bdigital.unal.edu.co/1572/>

[Presentación](#)

[Contenido](#)

[Cap01](#) Ciclo geológico
[Cap02](#) Materia y Energía
[Cap03](#) El sistema Solar
[Cap04](#) La Tierra sólida y fluida
[Cap05](#) Los minerales
[Cap06](#) Vulcanismo
[Cap07](#) Rocas ígneas
[Cap08](#) Intemperismo ó meteorización
[Cap09](#) Rocas sedimentarias
[Cap10](#) Tiempo geológico

[Cap11](#) Geología estructural
[Cap12](#) Macizo rocoso
[Cap13](#) Rocas Metamórficas
[Cap14](#) Montañas y teorías orogénicas
[Cap15](#) Sismos
[Cap16](#) Movimientos masales
[Cap17](#) Aguas superficiales
[Cap18](#) Aguas subterráneas
[Cap19](#) Glaciares y desiertos
[Cap20](#) Geomorfología
[Lecturas complementarias](#)
[Bibliografía](#)

Anexo 1: Agua y Clima

<http://www.bdigital.unal.edu.co/54046/>

Anexo 2: Calentamiento global en Colombia

<http://www.bdigital.unal.edu.co/3673/>

Anexo 3: Desafíos del Complejo Volcánico Ruiz – Tolima

<http://www.bdigital.unal.edu.co/9484/>

Anexo 4: Economía para el constructor

<http://www.bdigital.unal.edu.co/1698/>

Anexo 5: Gestión del riesgo

<http://www.bdigital.unal.edu.co/47341/>

Anexo 6: Geotecnia para el trópico andino

<http://www.bdigital.unal.edu.co/53560/>

Anexo 7: La Luna

<http://www.bdigital.unal.edu.co/1663/>

Anexo 8: ¿Para dónde va el Magdalena?

<http://www.bdigital.unal.edu.co/51046/>

Anexo 9: Túnel Manizales

<http://www.bdigital.unal.edu.co/2046/>

Anexo 10: UMBRA: La Ecorregión Cafetera en los mundos de Samoga

<http://www.bdigital.unal.edu.co/50853/>

Anexo 11: Mecánica de los suelos

<http://www.bdigital.unal.edu.co/1864/>

[El Autor:](#) Gonzalo Duque-Escobar

HOME:

<http://www.bdigital.unal.edu.co/1572/>