



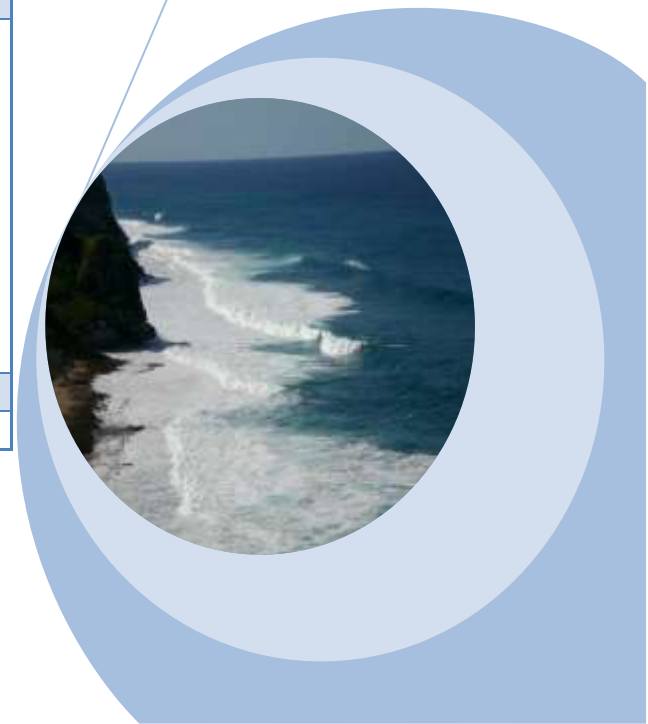
El Mundo Físico

Lecturas Cortas Sobre Los Procesos Físicos Alrededor Del Ser Humano

Un viaje imaginario por la Vía Láctea, el Sistema Solar y la Luna. Arribamos a la Tierra y atravesamos la fina atmósfera terrestre; a la deriva en el Océano Global examinamos las corrientes marinas, las mareas y las olas. Una vez en la costa, vamos descubriendo los procesos geológicos que generaron la isla. Explicamos el impacto del Ser humano sobre el cambio global y las fuentes de energía alternativa disponibles para reducir ese impacto.

Edwin Alfonso-Sosa

7/7/2008



El Mundo Físico

Copyright 2008 by Alfonso-Sosa, Edwin
All rights reserved.



por, (Edwin Alfonso-Sosa) 2009.
© Todos los Derechos Reservados.

El Mundo Físico

EL MUNDO FÍSICO

LECTURAS CORTAS SOBRE LOS PROCESOS FÍSICOS ALREDEDOR DEL SER HUMANO

Por

Edwin Alfonso-Sosa, M.S., Ph.D.

Catedrático Auxiliar
Departamento de Ciencias y Tecnología
Recinto de Arecibo
Universidad Interamericana de Puerto Rico
2008

El Mundo Físico

Dedicatoria

Dedicado con mucho amor y agradecimiento a

Carmen Enid

Hortensia

Lucy

Contenido

EL MUNDO FÍSICO	3
Dedicatoria	4
Prefacio.....	7
Somos Parte del Universo	9
Espacio-Tiempo	10
Escala en el Universo.....	10
El Sol.....	13
Descripción General.....	13
Actividad Solar.....	14
Espectro Solar	17
Origen del Nombre Planeta	19
Definición de Planeta de la IAU	19
Mecánica Planetaria	20
Las Tres Leyes de Kepler para Cinemática Planetaria.....	20
Los Planetas Terrestres.....	21
Mercurio	21
Venus.....	21
Marte	23
Tierra	23
Los Planetas Gaseosos	27
Júpiter	27
Saturno	29
Urano.....	30
Neptuno	30
Cuerpos Pequeños del Sistema Solar	31
Asteroides.....	31
Cometas.....	31
Sistema Tierra-Luna.....	34
Un Sistema Anormal	34
Fases Lunares	36
Eclipses Solares y Lunares.....	36
Eclipse Solar Total	36
Eclipse Lunar Total	37
Declinación Lunar	37
Perigeo Lunar	38
Medición del Tiempo	39
Las Estaciones del Año	42
La Atmósfera.....	44
Composición Química.....	44
Fuente de Origen de los Aerosoles.....	45
Estructura Vertical.....	47
La Ionosfera.....	49

El Mundo Físico

Opacidad de la Atmósfera	49
Presión Atmosférica	50
Vapor de agua y los cambios en presión atmosférica	50
Efecto o Fuerza de Coriolis	52
¿Por qué el Cielo es Azul y las Nubes Blancas?	54
Características de la Transmisión Promedio de la Atmósfera.....	54
La Hidrosfera.....	56
El Ciclo del Agua Global	56
Distribución del Agua en el Planeta Tierra	58
El Océano Global	59
Corrientes Oceánicas.....	60
Las Mareas	63
Cambio en la Fuerza Mareal	67
La Marea Interna	69
Cronología del Oleaje.....	74
La Litosfera	83
Las Placas Tectónicas.....	84
Sismos, Terremotos y Volcanismo.....	86
Origen de la Litosfera Puertorriqueña	87
Ciclo de las Rocas	88
Cambio Global	89
¿Por qué es Global?.....	89
Gases de Efecto Invernadero.....	90
Forzamiento Radiativo y el Calentamiento Global	91
La Fuente de los Gases de Efecto Invernadero	91
Resumen Actual del Cambio Global.....	92
Ventajas Geográficas de PR que Facilitan Generar Energía Renovable.....	94
Análisis del Potencial Energético en Mi Hogar	95
El Sistema Eólico	97
Conclusión.....	101
Preguntas para Ayudar a Repasar las Lecturas	102
Bibliografía.....	107
Índice	108

Prefacio

En el albor del siglo XXI, la humanidad ha despertado a una nueva realidad; el Cambio Global. La comunidad científica mundial ha revelado que el ser humano es responsable de los cambios en el Sistema Terrestre, iniciados con la Revolución Industrial y continuados con la quema de combustibles fósiles para la producción de energía. Los científicos han estudiado el registro climático de los últimos 650,000 años y nunca se había observado una concentración tan alta de dióxido de carbono. El calentamiento y los efectos de éste ya lo estamos viendo con nuestros propios ojos: el derretimiento de los glaciares, el incremento global en el nivel del océano, el derretimiento del hielo en Groenlandia y Antártica, la desaparición del hielo perenne del Océano Ártico, el aumento de la temperatura global. Para sorpresa (*non grata*) de todos, hemos descubierto que el ser humano y sus actividades pueden cambiar a todo el planeta. Realidad impensable de la mayoría, pero anunciada por algunos científicos, hace 20 años atrás. Ahora sabemos que el ser humano es un ente de cambio planetario y por lo tanto es responsabilidad de la humanidad medir, registrar, modelar y predecir ese cambio. El ser humano tiene una obligación de comprender los procesos físicos, químicos y biológicos del Sistema Terrestre que lo rodea. Así podrá tomar decisiones inteligentes y planificar para un futuro sostenible. En estos momentos estamos ante una encrucijada, pero si todos nos comprometemos a cambiar y tomar el camino correcto, entonces será el primer gran reto superado a nivel planetario, sino será el último.

La motivación principal para escribir este libro es que toda persona tenga la oportunidad de familiarizarse con los procesos físicos que ocurren a su alrededor. Este conocimiento le permitirá acertar en el proceso de tomar decisiones responsables y que no afecten de manera adversa al Sistema Terrestre. A modo de introducción al curso titulado *El Ser Humano y el Mundo Físico*, yo le hago diez preguntas a los estudiantes para que reflexionen sobre lo poco que sabemos de los procesos físicos que experimentamos todos los días:

1. ¿Por qué el color del cielo es azul y las nubes son blancas?
2. ¿Por qué el océano es color azul marino y cuando las olas rompen son blancas?
3. ¿Por qué hay mareas en el océano y se incrementan para ciertas fases de la Luna?
4. ¿Por qué el ecuador es más caliente que los polos?
5. ¿Por qué hay estaciones durante el año?
6. ¿Por qué vemos siempre la misma cara de la Luna?
7. ¿Cómo se genera la energía que nos llega del Sol?
8. ¿Por qué los terremotos ocurren frecuentemente en California y no así en Nueva York?
9. ¿Por qué el año se subdivide en meses de aproximadamente 30 días?
10. ¿Por qué los rayos X provenientes del Sol no llegan a la superficie terrestre y en cambio la luz blanca si puede llegar?

El Mundo Físico

En este libro contestamos algunas de esas interrogantes. En la primera lectura describimos las escalas de espacio-tiempo en el Universo. En las subsiguientes lecturas describimos cada uno de los componentes del Sistema-Solar. Definimos lo que es un planeta y enunciamos las leyes de Kepler que describen el movimiento planetario alrededor del Sol. Hacemos una descripción general del Sol y de la Actividad Solar, incluyendo los eventos que en ocasiones afectan a la Tierra. Explicamos como se genera la energía del Sol y como se distribuye sobre la Tierra. Damos un vistazo a los planetas terrestres y los gaseosos; también a los cometas y asteroides. Definimos el Sistema Tierra-Luna. Luego nos concentramos en tres esferas del Sistema Terrestre: Atmosfera¹, Hidrosfera y Litosfera. Describimos los procesos físicos que ocurren en cada una de ellas. Finalmente, terminamos discutiendo el Cambio Global provocado por la actividad humana y que afecta a cada una de las esferas del Sistema Terrestre. La última sección anima al lector a explorar el uso de energía renovable, como lo es la energía eólica, para así reducir la dependencia en la energía extraída en la quema de combustibles fósiles.

Este libro va dirigido a una audiencia general, con una base modesta en matemáticas y ciencia, pero que tienen un gran interés en entender los fenómenos físicos que ocurren a su alrededor. El texto se divide en lecturas concisas y de fácil lectura, abarcando una gran diversidad de temas. Integra temas propios de otros libros tales como: astronomía, ciencias físicas, ciencia del sistema terrestre, física, geología, oceanografía y meteorología. Para aprovechar mejor la lectura recomiendo, aunque no es estrictamente necesario, que el lector tenga a su alcance un libro de física general para aclarar dudas. Las lecturas pueden leerse en cualquier orden pero se organizaron en un orden de mayor a menor escala espacial: Universo, Sistema Solar, Sol, Los Planetas, Tierra-Luna y los componentes físicos del Sistema Terrestre. Espero que les ayude mucho. Finalmente quiero agradecer al Profesor Aurelio Rodríguez Otero por revisar la sección dedicada a la Litosfera y en particular el Ciclo de las Rocas. Mi sincero agradecimiento al Profesor José Deliz por corregir cuidadosamente todo el documento y por sus acertadas sugerencias.

¹ En la lengua Española la palabra *atmosfera* y *atmósfera* con acento son correctas y tienen el mismo significado. Cuando la utilizo sin acento, lo hago para enfatizar que trato con una de las cuatro esferas del Sistema Terrestre.

Somos Parte del Universo

El Universo es el todo y el ser humano es parte de ese todo. Algunos usan la palabra griega *cosmos* que quiere decir orden, es la antítesis del *caos*. El Universo tiene cierto orden ya que se rige por las leyes de la Física. Esas leyes son las mismas no importa en que parte del Universo nos encontremos. Gracias a esa universalidad de las leyes podemos entender lo que sucede a enormes distancia de nuestro planeta. Por ejemplo, cuando se detecta la presencia de un planeta orbitando alrededor de otra estrella, nosotros sabemos que la fuerza gravitacional entre los dos cuerpos es la que mantiene unido a ese sistema y que esa es la misma fuerza de gravedad que nos mantiene pegados al suelo aquí en la Tierra.

El diccionario Larousse define la palabra mundo así: “*Conjunto de todo lo que existe.*”. Nuestra definición de mundo físico será entonces: *Conjunto de todo lo que existe que se rige por las leyes de la Física*. El concepto mundo físico es más difícil de comprender ya que depende de la extensión del conocimiento humano. Algunos perciben el mundo físico como el ambiente en el que se desenvuelven día a día, otros dirán que se refiere a los procesos físicos que ocurren sólo en el planeta Tierra, y otros como los astrónomos extenderán la definición hasta los confines del Universo. La comprensión del mundo físico dependerá de la esfera de influencias físicas que ese ser humano pueda reconocer. Por lo tanto el nivel de conocimientos del individuo puede expandir el concepto. A veces ocurre lo contrario, que la ignorancia le asigna influencias al mundo físico que en realidad no tiene. Por ejemplo, algunas personas creen que si un planeta en particular como Venus atraviesa una constelación, digamos Leo, entonces toda persona que tenga ese signo zodiacal va a experimentar la llegada del amor a su vida. Absurdos como ese se publican todos los días en periódicos y revistas. La única influencia que Venus puede ejercer sobre nosotros es la gravitacional. Pero las leyes físicas nos han revelado que la fuerza de gravedad del planeta Venus sobre la Tierra es ínfima debido a su masa y distancia de la Tierra. En cambio, la Luna ejerce una fuerza de gravedad no-depreciable sobre la Tierra, provocando las mareas. Esto sí puede afectar tu vida, veamos un ejemplo: si acampas en la playa y colocas tu caseta cerca de la orilla durante la marea baja digamos a las seis de la tarde y luego seis horas más tarde durante la marea alta, tu caseta se inunda. De seguro esto echaría a perder tu noche en la playa. Si estuvieras consciente, hubieras buscado en el periódico de ese día las tablas de marea. Fíjate que el mundo físico sí te está afectando en ese momento y recordando que eres parte de él. Los seres humanos nos desenvolvemos en el mundo físico que nos rodea y conocemos muy poco sobre él. Finalmente, el mundo físico es un subconjunto del Universo, pero es un subconjunto arbitrario definido por nosotros mismos y que puede crecer si el ser humano aumenta su conocimiento y reconocimiento de los fenómenos físicos que afectan su existencia.

Espacio-Tiempo

Escalas en el Universo

El concepto de escalas del espacio-tiempo es fundamental para comprender el mundo físico. Los cosmólogos estudian el mundo físico en escalas de tiempo desde 10^{-15} s hasta 13.7 billones de años, y el espacio desde una singularidad hasta el futuro tamaño del Universo en expansión. En cambio, un físico de partículas estudia el mundo físico desde 10^{-31} m hasta unas decenas de nanómetros (10^{-9} m). Esta lectura nos ayudara a entender el concepto de escalas del espacio y tiempo.

Definamos escala como un sistema de niveles o grados, o una serie continua y progresiva. Los seres humanos usamos escalas para ordenar y comparar la posición de dos objetos o eventos. A veces usamos la escala de longitud kilómetro (km), basada en la unidad metro, para determinar la distancia a la que nos encontramos de la Universidad Interamericana en Arecibo. Si dos estudiantes se conocen el primer día de clase y se preguntan donde vive cada uno. Uno contesta que es de Quebradillas (20 km) y el otro que es de Camuy (10 km). Si ambos conocen su posición en la escala, entonces pueden determinar que el estudiante quebradillano se encuentra 10 km más lejos de la Universidad. Ni siquiera tienen que saber la distancia exacta en kilómetros que los separa de la Universidad, sólo basta saber la posición relativa que se mantiene en esa escala. Usando esta información, el estudiante de Camuy podría pedirle al otro que lo lleve a la Universidad al siguiente día. Ahora, si no conocieran su posición en la escala esta conversación no tendría sentido. En este sistema, el punto de origen es la Universidad y la distancias se miden utilizando la unidad del Sistema Internacional (SI) para longitud, que llamamos metro. El metro (m) es una unidad basada en un estándar. Se definió en el 1983 como la trayectoria recorrida por un haz de luz en el vacío durante un intervalo de tiempo igual a dividir un segundo en 299,792,458 partes. Entienda que la unidad metro está fundamentada en la velocidad de la luz y el tiempo.

Tabla 1. Escala espacial expresada en potencias de diez de la unidad metro (m).

Referencia	Potencia de diez (m)	Año-Luz
Un ser humano	10^0	-
Una ciudad	10^4	-
Norteamérica	10^7	-
Distancia Tierra y la Luna	10^8	-
Distancia Tierra y el Sol	10^{11}	-
Nube de Oort	10^{14}	-
Espacio Interestelar (1 ly)	9.5×10^{15}	1
Diámetro de la Vía Láctea	10^{21}	105,708
Súper-cúmulo de Galaxias	10^{24}	105,708,245
Universo Visible	10^{26}	13,742,071,882

El Mundo Físico

Asimismo, como conocemos nuestra posición en Puerto Rico debemos entender nuestra posición en el Universo, en cualquier dimensión del espacio-tiempo, con coordenadas (x , y , z , t). Esa posición nos permitirá alcanzar una nueva perspectiva, para entender lo que nos rodea. El Universo es muy, pero muy grande y el ser humano ha diseñado diversas escalas para tratar de ordenar los eventos u objetos que observamos. Para entender la posición de los objetos del Sistema Solar se utiliza la Unidad Astronómica (AU). La Tierra se encuentra por definición a un 1 AU del Sol. Mercurio a menos de la mitad de esa distancia (0.387 AU). Neptuno se encuentra a 30 veces esa distancia (30 AU). Esta unidad facilita entender y recordar la posición relativa entre los planetas. Es más fácil decir 1 AU en lugar de 150,000,000 km. Las distancias entre las estrellas requieren una nueva escala en lugar de la unidad astronómica, debido a que la distancia que las separa una de otra es inmensamente grande. La estrella más cercana al Sol es *Proxima Centauri*, una estrella en la constelación del Centauro. Sólo podemos verla con telescopio porque es una estrella de poca masa, baja temperatura y poca luminosidad. Se encuentra a una distancia de 270,000 AU que equivale aproximadamente a 4×10^{16} m. Si para la estrella más cercana al Sol el número de unidades astronómicas es alto, entonces imagínate cuanto sería para las estrellas lejanas. La luz de las estrellas siempre se propaga en el espacio vacío con una celeridad $c = 3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$ o sea a 300,000 km s^{-1} . O sea que c es una constante en el espacio vacío. Podemos usar esa propiedad de la luz como base de nuestra nueva unidad de distancia. Usando la fórmula para calcular distancia, $d = c t$, donde t representa el tiempo que le toma a la luz atravesar esa distancia d . Si c es un valor constante entonces la única variable de interés es el tiempo t . Por lo tanto, la distancia a *Proxima Centauri* se puede expresar como 4 años-luz (ly); la distancia que recorre la luz en cuatro años. O sea una distancia $d = (3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}) (4 \text{ años}) (31557600 \text{ s año}^{-1}) = 3.79 \times 10^{16} \text{ m}$. El resultado es un número asombrosamente grande. Demostramos con este ejercicio que la unidad año-luz es más fácil de usar que la unidad astronómica o la unidad kilómetro. La estrella más brillante después del Sol se conoce como *Sirius* y se encuentra a 9 ly. Le sigue la estrella *Canopus* que se encuentra a 200 ly. Sin embargo, si ambas estrellas estuvieran localizadas a la misma distancia de la Tierra, *Canopus* sería más brillante que *Sirius*. La estrella más brillante en la Vía Láctea es *Eta Carinae*, se encuentra a 4000 ly. Abajo mostramos una tabla que resume las unidades y sus equivalentes.

Tabla 2. Equivalentes de distancias astronómicas.

Unidad Astronómica (AU)	Kilómetros (km)	Año-luz (ly)
1	149,600,000 ó 1.5×10^8	8 minutos-luz
63,240	9,460,055,000,000 ó 9.5×10^{12}	1

Nuestra galaxia La Vía Láctea es una galaxia espiral con una barra y dos brazos principales: *Perseus* y *Scutum-Centaurus*. Tiene un diámetro de 120,000 ly y el Sol se encuentra a 30,000 ly de su centro (Vea Fig.). Esto lo coloca a tres quintas partes del radio del disco galáctico, en el borde interior de uno de los brazos espirales. Además nos encontramos a 26 ly por encima del disco. La galaxia contiene entre 200 a 400 billones de estrellas, y existen estrellas similares al Sol. El Sol le toma 240 millones de años en

El Mundo Físico

completar una vuelta alrededor de su centro. Gira alrededor del centro galáctico a una velocidad de 220 km s^{-1} (137 millas por segundo).² La mayor cantidad de estrellas están cerca del centro. En el centro hay un hoyo negro masivo, con una masa equivalente a 3 millones de veces la masa del Sol. Genera una atracción gravitacional tan fuerte que influencia estrellas completas y gas estelar. Nuestro Sol **no** ocupa una posición especial en la galaxia, y es una estrella más, entre las miles de millones que componen la Vía Láctea. No obstante, es importante para nosotros porque es la que mantiene con vida a este planeta. Las distancias que separan las galaxias se miden en millones de años-luz. La galaxia espiral más cercana de la Vía Láctea es Andrómeda; se encuentra a 2 millones de años-luz. O sea, que cuando observamos esa galaxia, estamos viendo como era hace 2 millones de años en el pasado. El telescopio Hubble ha podido detectar galaxias a distancias de billones de años-luz, cuando el Universo era muy joven. La edad del Universo es 13.7 billones de años. Se sabe que comenzó en una gran explosión llamada el *Big Bang*, el espacio sigue expandiéndose y está acelerando esa expansión. Las galaxias cada vez están más separadas entre sí. Astrónomos estiman conservadoramente que hay 50 billones de galaxias en el Universo. Nuestro Sol y los Planetas se formaron hace 4.5 billones de años y la vida apareció en la Tierra hace 3.8 billones de años. El ser humano (*Homo Sapiens*) lleva en la Tierra menos de un cuarto de un millón de años. Si comprimieramos la edad del Universo en un solo año, todo lo que conocemos de la historia humana ocurriría en los últimos segundos, del último minuto del 31 de diciembre. De esa inmensidad de tiempo y espacio que es el Universo, nosotros somos sólo un granito de arena. Pero los seres humanos somos muy valiosos porque somos aquella parte del Universo que puede conocerse a sí misma.

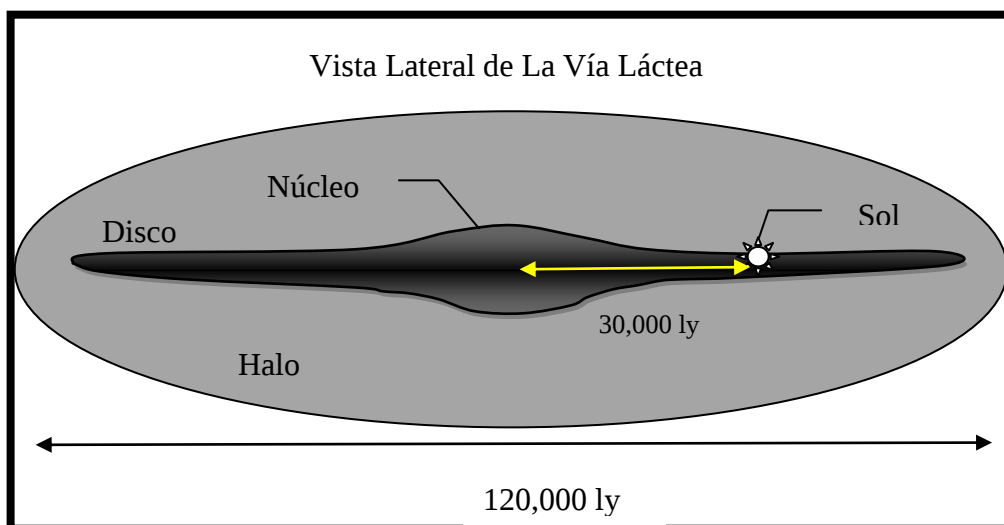


Figura 1. Posición del Sol en la Vía Láctea. Nos encontramos a 30,000 ly del Núcleo.

² Investigaciones recientes apuntan a que la velocidad es mayor por un 15% o sea 254 km s^{-1} (158 millas por segundo). El año galáctico se reduciría a 205 millones de años.

El Sol

Descripción General

La vida del ser humano depende de nuestra estrella, el Sol. Se clasifica como una enana amarilla de tipo espectral G2. Es una estrella de brillantez promedio. Se encuentra a una distancia de 150,000,000 km (por definición 1 AU). Tiene un diámetro 109 veces mayor que la Tierra. Su materia está en forma de plasma. Un estado de la materia diferente al gaseoso. Si un gas lo ionizamos extremadamente, o sea, que los átomos los descomponemos en una sopa de electrones y núcleos, obtenemos plasma. El Sol libera en un segundo más energía que la que la humanidad ha utilizado en toda su historia. La fuente de energía es la fusión termonuclear. Se fusionan núcleos de átomos de hidrógenos para convertirlos en núcleos de átomos de helio. En el proceso el excedente de materia se convierte en energía ($E=mc^2$). Este proceso ocurre en el núcleo a una temperatura de 15,000,000 K y a presiones altísimas. El 10% de la masa total del Sol se convierte en el núcleo en energía. Este proceso lleva ocurriendo cinco mil millones de años, y se estima que resta la misma cantidad de años, antes que el Sol se convierta en una estrella gigante roja y desaparezcan los planetas terrestres.

El Sol esta compuesto por el:

1. El Núcleo: donde ocurren las reacciones de fusión termonuclear que proveen toda la energía. La energía sale en forma de fotones de rayos gamma.
2. La Zona de Radiación: los fotones gamma son repetidamente absorbidos y remitidos por los núcleos (protones), así reduciendo su energía y aumentando el largo de onda. Pueden pasar millones de años antes que salgan de esa zona.
3. La Zona de Convección: el plasma transporta la energía del interior por convección, a través de celdas de convección. Columnas de gas muy caliente ascienden desde el interior. Ésta es la fuente de la granulación solar observada en la fotosfera. En esta zona se genera el campo magnético solar.
4. La Fotosfera: el plasma se enfría liberando fotones. Es la superficie visible del Sol. Tiene una temperatura de 6000 K. Las zonas donde la temperatura es menor (4000 K) se conoce como manchas solares porque se ven oscuras. En las manchas solares el campo magnético del Sol es bien fuerte, 0.3 T, es 4285 veces más fuerte que el polo norte magnético de la Tierra. El máximo en el número de manchas ocurre cada 11 años. El próximo máximo solar será en el 2012.
5. La Cromosfera: Está localizada por encima de la Fotosfera, allí ocurren las prominencias, los fulgores solares (*solar flares*) y regiones brillantes (*plages*)
6. La Corona Solar: Se puede apreciar desde la Tierra durante los eclipses solares. La temperatura alcanza los 2,000,000 K. Ondas de sonido formadas en la zona de convección llegan hasta la corona y calientan el plasma. Durante actividad solar intensa se desprende material de la corona. Se le conoce como eyección de masa coronal (CME) y afectan el campo magnético de la Tierra.

Actividad Solar

En el 1983, el Prof. José Deliz nos mostró a un grupo de estudiantes las manchas solares, a través del telescopio reflector de 10 pulgadas del Observatorio MIJOVI, de la Escuela Superior de Quebradillas. Era impresionante ver que la superficie de algo tan brillante como el Sol podía tener manchas oscuras y de un tamaño tan grande (30,000 km), con mayor diámetro que el del planeta Tierra. Quedé tan impresionado, que escogí la actividad solar como el tema de mi proyecto de feria científica por tres años consecutivos. Aprendí mucho gracias a la ayuda de mis profesores y del personal del Observatorio Solar de Ramey. El Observatorio Solar era parte de una red de cinco observatorios alrededor de toda la Tierra, que tenía la Fuerza Aérea para monitorear la actividad solar constantemente. En aquellos años no existían satélites como Ulises o SOHO que hace continuamente esa labor. Es imprescindible vigilar la actividad solar especialmente cerca de los periodos de máximos, que ocurren cada 11 años. Durante ese periodo hay destellos o fulgores solares (*Solar Flares*) que emiten gran cantidad de radiación X, UV y que expulsan partículas cargadas tales como: protones, núcleos de átomos de helio, electrones con energías muy altas, pudiendo alcanzar los 20 GeV (10^9 eV) y llegar a la Tierra en tan solo 30 minutos. Estos rayos cósmicos solares son capaces de dañar la electrónica de los satélites, ser letales para los astronautas y dañar sus naves, silenciar las comunicaciones de radio, sobrecargar subestaciones y detener la distribución de la energía eléctrica en países localizados en latitudes altas. La dependencia en los medios de comunicación satelital (TV, radio, celulares) hace que seamos cada vez más vulnerables a la actividad solar. Nuevas tecnologías y agencias encargadas de vigilar el clima espacial envían avisos que permiten a las compañías poner a sus satélites en modos de seguridad y que las compañías de energía eléctrica puedan preparar su sistema de distribución para evitar apagones.

Las manchas solares tienen temperaturas de 3800 K, en cambio el resto de la fotosfera tiene temperaturas de 5800 K. La diferencia en temperatura de 2000 K se manifiesta como menor luminosidad. El contraste entre la luminosidad de la mancha y de la fotosfera circundante provoca que se vea más oscura. La mancha tiene dos componentes: umbra y penumbra. La umbra es la región central más oscura con la temperatura menor y el campo magnético más intenso, alrededor de 0.1T y alcanzando hasta 0.4T. En contraste el campo magnético de la Tierra tiene 5×10^{-5} T. La penumbra tiene mayor temperatura, luminosidad y una estructura radial filamentosa. Las manchas nacen como poros oscuros en los bordes de los gránulos solares creados por la convección. Se desarrollan y pueden estar presentes en la fotosfera entre una a tres semanas. Las manchas grandes y cercanas al ecuador pueden permanecer por una revolución completa del Sol de cerca de un mes (25-27 días). Las manchas solares se encuentran sobre una región activa magnética (0.01T) de carácter bipolar (BMR) con extensiones de cientos de miles de kilómetros. Una porción del BMR es positiva y la otra negativa con una franja neutral entre ambas. Líneas magnéticas salen de las manchas en la parte positiva

El Mundo Físico

del BMR y entran en las manchas en la parte negativa. Estas líneas o tubos de campo magnético pasan la cromosfera y llegan hasta la corona. La región activa en la fotosfera se ve como una zona brillante que llamamos fáculas. Las líneas magnéticas de la región activa aumentan la temperatura y densidad de la cromosfera, se forma un área brillante que flota sobre la región activa, que conocemos con el nombre de *plage*. En respuesta a la reconexión de las líneas magnéticas en un punto neutral en la corona, una corriente de electrones y fotones son acelerados (Ley de Lenz) hacia la cromosfera. De inmediato se incrementa dramáticamente la brillantez del *plage*, en la luz con largo de onda del $H\alpha$, señal de que esta ocurriendo un fulgor solar. Los electrones que son lanzados hacia la Corona elevan las temperaturas a cuatro millones de grados Kelvin, provocando emisión en UV. La radiación de sincrotrón provoca emisión de rayos X y ondas de radio de onda larga. Estos eventos duran a lo sumo 30 minutos. Las partículas con energía más alta interaccionan con la magnetosfera terrestre en tiempos tan cortos como 30 minutos, pero el resto de las partículas con menos energía le toma un día en llegar. Otro evento que puede impactar la Tierra son las eyecciones de masa coronal. En la corona hay plasma atrapado en campos magnéticos y a temperaturas altísimas (2,000,000 K). Cuando estas líneas están sobre BMR pueden ocurrir súbitas eyecciones del plasma y del propio campo magnético hacia el espacio. Cuando la eyección de la burbuja de gas de billones de toneladas y con campo magnético apunta hacia la dirección de la Tierra puede alterar la magnetosfera y provocar tormentas geomagnéticas en la Tierra. La reconexión de líneas en el campo magnético de la Tierra puede acelerar protones y electrones hacia las áreas que circundan los polos magnéticos de la Tierra. Estas partículas excitan los átomos de nitrógeno y oxígeno provocando las auroras. Las auroras se observan generalmente en una franja entre los 60 y 80 grados de latitud. Cuando la actividad geomagnética es extrema se han observado en los estados del sur de los Estados Unidos.

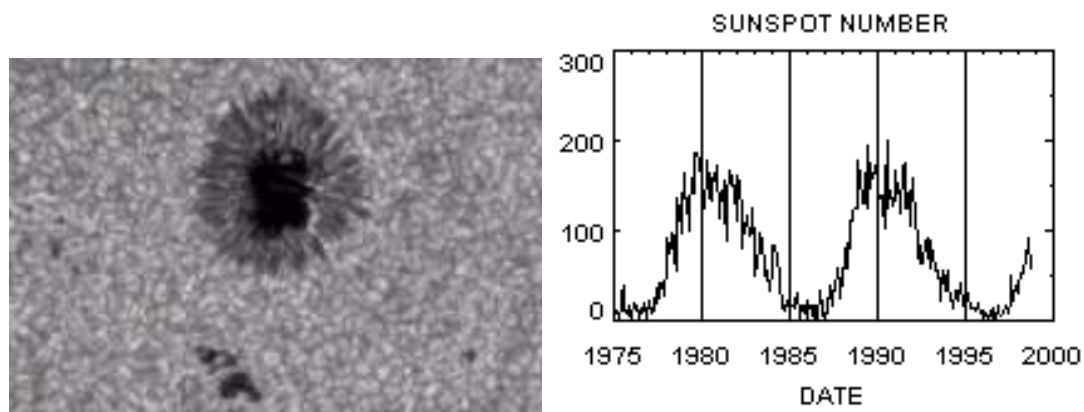


Figura 2. Izquierda. Mancha solar en la fotosfera. Umbra es el área central oscura y la penumbra es el halo con estrías radiales. Estas estrías son el producto de la alineación del plasma en la fotosfera a lo largo de las líneas de campo magnético que emanan del interior. También se aprecia la granulación solar que se asemeja a granos de arroz. Derecha. El número de manchas en la fotosfera llegan a un máximo cada 11 años. Cortesía de: *Space Environment Center/NOAA*.

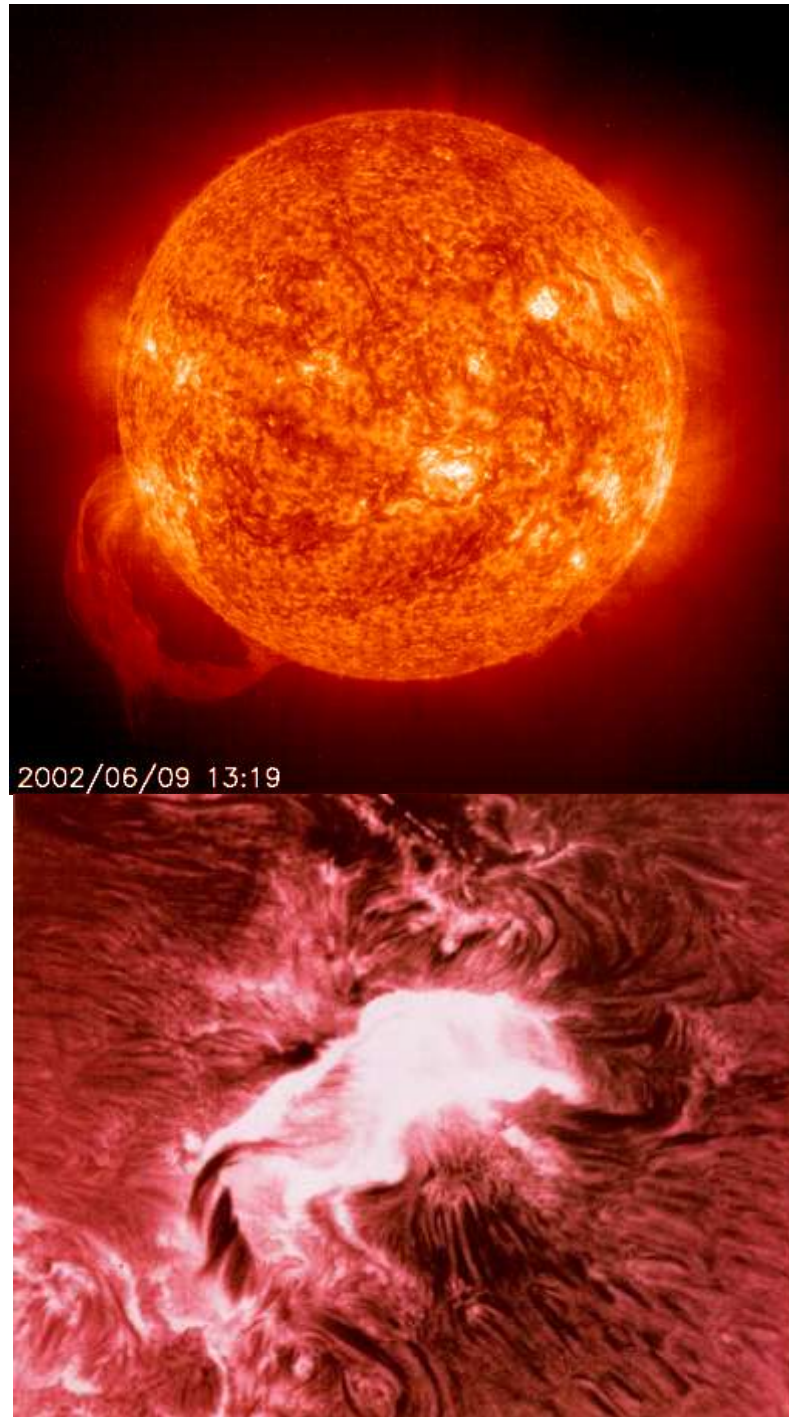
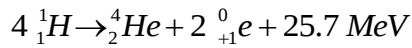


Figura 3. Arriba. Usando filtros especiales se puede ver la cromosfera, capa que esta encima de la fotosfera. Las áreas blancas brillantes se conocen como *plages* y se encuentran sobre las regiones activas magnéticas (BMR). También se observa una prominencia enorme, que son billones de toneladas de plasma atrapado en un tubo de flujo magnético. Cortesía: NASA/JPL/Caltech. Abajo. Cuando un *plage* intensifica súbitamente su brillantez sabemos que esta ocurriendo un fulgor solar. Cortesía de: *Space Environment Center/NOAA*.

Espectro Solar

En el núcleo del Sol la presión y la temperatura son altísimas, alcanzando los 20×10^6 K. Bajo estas condiciones, los núcleos de hidrógeno se pueden fusionar para formar núcleos de helio, positrones y liberar energía. La reacción de fusión termonuclear se puede resumir así:



Cuatro núcleos de hidrógeno se necesitan para formar uno de helio, dos positrones y liberar energía. Los paquetes de energía o fotones de rayos gamma tienen que atravesar desde el interior hasta la superficie del Sol o fotosfera, donde son visibles. ¡Ese viaje puede tomarle a un fotón millones de años! No por la distancia que tiene que atravesar, sino porque el fotón tiene que ser absorbido y remitido innumerables veces. El Sol aproxima ser un radiador completo o cuerpo negro, y obedece la Ley de Stefan-Boltzmann, que dice que la irradiancia es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura. Esto quiere decir que la irradiancia que recibimos se relaciona directamente a la temperatura del Sol. Un cambio pequeño en temperatura corresponde un cambio grande en irradiancia. La temperatura y la irradiancia solar se han mantenido relativamente constantes por miles de millones de años. De acuerdo a la Ley de Wien, la energía de un cuerpo negro se distribuye en un espectro electromagnético y el pico de emisión de la irradiancia dependerá de la temperatura. La irradiancia máxima del Sol ocurre en los 500 nm (color amarillo) y corresponde a la de un cuerpo negro con una temperatura de 5800 K (vea figura). Así es que podemos estimar la temperatura de la fotosfera solar.

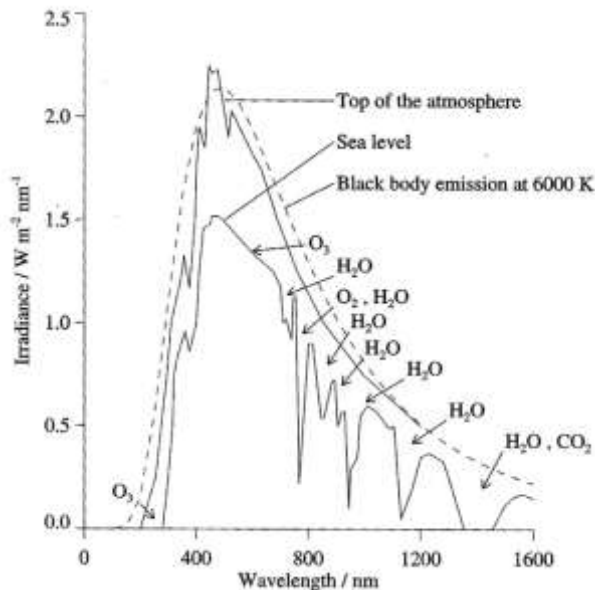


Figura 4. La irradiancia solar extraterrestre que recibimos en el tope de la atmósfera (línea continua) corresponde a la de un cuerpo negro con una temperatura de aproximadamente 6000 K (línea entrecortada). Al nivel del mar la irradiancia es absorbida por los gases y el vapor de agua.

El Mundo Físico

El espectro solar consiste en energía electromagnética distribuida en todos los largos de onda: rayos gamma, rayos X, UV, luz blanca que incluye todos los colores, radiación infrarroja, microondas y ondas de radio. Toda esa energía llega al tope de la atmósfera pero al atravesarla se absorben bandas específicas del espectro y lo que llega a la superficie terrestre es un poco de UV, luz visible, radiación infrarroja y ondas de radio. Telescopios orbitales han podido estudiar el Sol en diversas bandas espectrales y revelar la dinámica de los procesos solares en cada una de sus diferentes capas: fotosfera, cromosfera y corona solar.

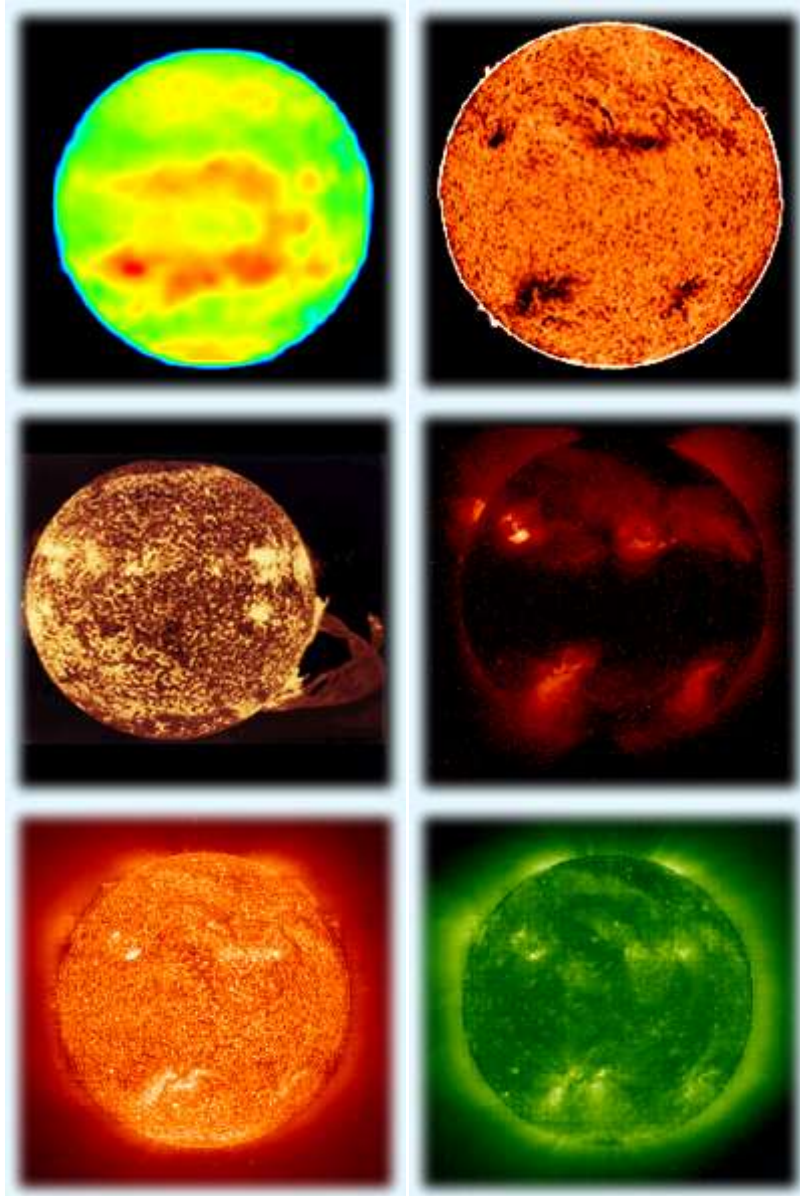


Figura 5. Imágenes del Sol en diversos largos de onda. Primera fila: ondas de radio, infrarrojo. Segunda fila: luz visible, UV. Tercera fila: UV extremo, rayos X. Cortesía de: STScI/NASA. http://amazing-space.stsci.edu/resources/explorations/light/CatchWaves_frames.html

Origen del Nombre Planeta

Hace miles de años que el ser humano estudia el movimiento de los cuerpos en el firmamento. Observaron unos cuerpos celestes brillantes que no centellean y que no están estáticos, como el resto de las estrellas en la bóveda celeste, sino que parecen vagar entre ellas a medida que pasa el año. A estos cuerpos los griegos les dieron el nombre de *planetes*, que quiere decir vagabundos. A cada uno de los cinco planetas les nombraron de acuerdo a las deidades griegas. Los planetas Urano y Neptuno no eran conocidos por los griegos, fueron descubiertos a partir del siglo XVIII cuando ya existía el telescopio.

Definición de Planeta de la IAU

Un planeta de acuerdo a la *International Astronomical Union* (IAU) es un cuerpo celestial que:

1. Está en órbita alrededor del Sol.
2. Tiene suficiente masa para que su propia gravedad pueda superar las fuerzas de cuerpo rígido, de manera que alcance una forma con equilibrio hidrostático (forma aproximadamente esférica).
3. Que haya limpiado los alrededores de su órbita de cualquier otro cuerpo.

Un **planeta enano** es un cuerpo celestial que:

1. Está en órbita alrededor del Sol.
2. Tiene suficiente masa para que su propia gravedad pueda superar las fuerzas de cuerpo rígido, de manera que alcance una forma con equilibrio hidrostático (forma aproximadamente esférica)
3. Que **NO** haya limpiado los alrededores de su órbita de cualquier otro cuerpo.
4. Y que no sea un satélite.

Todo los demás que orbiten el Sol y no sean satélites se conocerán como “Cuerpos pequeños del Sistema Solar”.

Por lo tanto Plutón y Ceres son planetas enanos, los asteroides y cometas son cuerpos pequeños del Sistema Solar. Recientemente se han nombrado dos nuevos planetas enanos Makemake y Haumea.

Mecánica Planetaria

Las Tres Leyes de Kepler para Cinemática Planetaria

Si marcas en un mapa celeste la posición del planeta Marte durante noches seguidas, antes y después de su punto más cercano a la Tierra, verás que su trayectoria en el firmamento es muy peculiar, ya que hace un zigzag o retroflexión. Johannes Kepler analizó las observaciones del movimiento de Marte que Tycho Brahe había recopilado a lo largo de muchos años. Eran las observaciones más precisas de aquella época. Kepler postuló en el 1609 en su libro *Astronomia Nova* las siguientes tres leyes para explicar esas observaciones:

1. Los planetas se mueven alrededor del Sol siguiendo órbitas elípticas, en la que el Sol ocupa uno de los focos.
2. El segmento que va del Sol a cada uno de los planetas cubre áreas iguales en tiempos iguales.
3. Los cuadrados de los periodos de traslación de los planetas alrededor del Sol son proporcionales al cubo de los semiejes mayores de sus respectivas órbitas. Si **P** representa el periodo y **a** represente el semieje mayor entonces se expresa como:

$$P^2 = ka^3$$

donde k es una constante igual a 1, el periodo se mide en años terrestres y el semieje en unidades astronómicas (AU).

La segunda ley se puede visualizar así; un planeta cuando se acerca al Sol (perihelio) se mueve rápidamente y cuando está distante del Sol (afelio) se mueve lentamente. La tercera ley se puede generalizar así: los planetas mientras más alejados del Sol se encuentren, completaran una vuelta al Sol en mayor tiempo. Ahora bien, la ecuación de Kepler establece el tiempo exacto que le tomaran hacerlo. Por ejemplo, si la Tierra se encuentra a 1 AU del Sol, el periodo orbital es 1 año terrestre. Si despejamos la ecuación para el periodo obtenemos,

$$P = ka^{\frac{3}{2}}$$

Júpiter se encuentra a 5.2 AU del Sol, entonces el periodo es igual a 11.86 años terrestres. Mercurio esta localizado a 0.387 AU y su periodo de revolución alrededor del Sol es aproximadamente 87.6 días.

Las tres leyes de Kepler no solo aplican a planetas sino que a todo cuerpo que orbite alrededor de otro. O sea, un satélite alrededor de la Tierra o una nave viajando a Marte obedecen la misma ley, excepto que el valor de la constante k es diferente.

Las tres leyes de Kepler fueron refinadas años más tarde por Isaac Newton y siguen siendo utilizadas en los programas de computadora para el cálculo de las órbitas de las naves espaciales en misiones a otros planetas.

Los Planetas Terrestres

Mercurio

Es el planeta más próximo al Sol. Esto dificulta su observación y la limita a un par de horas antes de la salida del Sol, o después de la puesta del Sol. En el primer caso se observa como una estrella matutina y en el segundo como estrella vespertina. A estas horas de crepúsculo, el contraste del disco planetario y el cielo es pobre por lo tanto limita la observación a través de un telescopio. El albedo del planeta es bien bajo, no obstante se puede distinguir fácilmente de una estrella cualquiera. Con un telescopio mediano (200 mm - 250 mm de apertura) se puede distinguir las fases de Mercurio. Debido a que es un planeta interior a la órbita terrestre presenta fases al igual que en Venus y la Luna. Con telescopio no hay mucho más que ver. Si usas un telescopio más grande no hace mucha diferencia. La turbulencia atmosférica provoca la distorsión óptica de la imagen (titilación).

Mercurio tiene una órbita de gran excentricidad ($e = 0.2056$) alrededor del Sol y una inclinación de 7 grados relativo al plano de la eclíptica. El periodo orbital es de 87.96 días. La elongación de Mercurio es en promedio 23 grados (un poco más de la distancia de cielo que cubre un puño cuando estiras tu brazo). A mayor elongación del planeta, mayor será el tiempo que puede ser observado después de la puesta del Sol. El periodo de rotación sideral es de 58.65 días.

$$\frac{T_{rot}}{T_{orb}} = \frac{58.65 \text{ d}}{87.96 \text{ d}} \cong \frac{2}{3}$$

O sea una rotación de Mercurio ocupa dos terceras partes del tiempo necesario para completar una órbita. Se hacen 3 rotaciones siderales en dos revoluciones alrededor del Sol. Mercurio posee un enorme núcleo de hierro relativo a sus dimensiones, y parte de su interior es fluido. Mercurio y la Tierra son los únicos planetas terrestres que tienen un campo magnético global. Las sondas espaciales han detectado gran cantidad de escarpados distribuidos a lo largo de su superficie. Las temperaturas al mediodía pueden alcanzar los 800° F y en la noche están muy por debajo del congelamiento.

Venus

Se le conoce como Lucero del Alba (antes de la salida del Sol) o Estrella Vespertina (después de la puesta del Sol). Es el segundo planeta en cercanía al Sol. Es el tercer objeto más brillante en nuestro firmamento después del Sol y la Luna. Puede alcanzar hasta una magnitud aparente de -4. Su brillantez se debe a la densa cubierta de nubes que refleja la luz solar. Estas nubes densas nos facilitan observar las fases a medida que orbita el Sol. El tamaño y densidad de Venus son muy parecidos al de la Tierra, hasta ahí su parecido, ya que las nubes densas de CO₂ provocan un efecto invernadero



Figura 6. Arriba. Hemisferio del planeta Mercurio presenta una superficie llena de cráteres similar a la Luna. Imagen tomada por la nave Messenger de NASA. Abajo. La similitud con la Luna termina cuando observamos estructuras enigmáticas como La Araña en *Caloris Basin*. Fotos cortesía de: *MESSENGER Team/NASA/JPL*.

El Mundo Físico

exagerado que eleva la temperaturas hasta 865 grados Fahrenheit. Las nubes de Venus son de gotitas de ácido sulfúrico (H_2SO_4). La circulación de la atmósfera ha sido estudiada usando aparatos de teledetección en el ultravioleta. La atmósfera de la Tierra absorbe la luz UV, y por lo tanto, tiene que estudiarse desde el espacio con observatorios orbitales. El planeta rota lentamente sobre su eje (244 días) en dirección retrógrada. La superficie de Venus se ha estudiado usando radar. Observaciones desde el Observatorio de Arecibo y desde la Nave Magallanes de NASA ayudaron a construir un mapa de alta resolución de la superficie venusina. Hay volcanes inactivos, hay grandes cuencas parecidas a la de nuestros océanos y elevaciones de la corteza similares a continentes.

Marte

El color rojo del planeta Marte se distingue fácilmente desde la Tierra. Es el cuarto planeta distante del Sol y el séptimo planeta en tamaño. Su diámetro es 6,794 km y su masa es 6.4219×10^{23} kg. Marte se ha estudiado por observaciones telescópicas por largo tiempo, pero la primera misión de NASA al planeta fue en el 1965 por el *Mariner 4*. Al momento hay tres orbitadores alrededor del planeta, estudiando la superficie y la atmósfera: *Mars Global Surveyor*, *Mars Odyssey* y *Mars Express*. La órbita de Marte es bien elíptica y repercute en cambios en temperatura subsolar de 30 C entre el afelio y perihelio. Esto tiene una gran influencia en el clima de Marte. La temperatura fluctúa entre 140 K (-133 C, -207 F) en los polos en invierno hasta 300 K (27 C, 80 F) durante el verano en otras partes del planeta. Marte es más pequeño que la Tierra pero su área de superficie es similar a la superficie continental de nuestro planeta. La montaña más alta en el Sistema Solar es el volcán inactivo *Olympus Mons* con una altura de 24 km (78,000 ft). *Valle Marineris* es un sistema de cañones de 4000 km y con profundidades entre 2 a 7 km. Al momento no hay evidencia de placas tectónicas en Marte. Los volcanes parecen formados por puntos calientes debajo de la corteza hace millones de años atrás. En el pasado lejano había presencia de agua en fase líquida en la superficie. Evidencia de ríos antiguos y lagos secos se observan en imágenes obtenidas por los orbitadores. En la zona que comprende el cinturón ecuatorial el agua fluyó durante más de 700 millones de años. En la actualidad el agua está localizada en los casquetes polares, en glaciares y en el permafrost. La atmósfera es muy fina, aproximadamente el 1% de la terrestre. La presión barométrica es de 7 milibares. Se compone de dióxido de carbono (95.3%) nitrógeno (2.7%), argón (1.6%), oxígeno (0.15%) y agua (0.03%). Se ha detectado emisión de metano. Los casquetes polares están compuestos de agua y dióxido de carbono. Vida en el pasado es posible ya que había presencia de agua.

Tierra

La Tierra es el mayor de los planetas terrestres con un diámetro de 12742 km. Es el planeta con mayor densidad en el Sistema Solar y el planeta terrestre de rotación más rápida. En términos dinámicos la Tierra y la Luna se comportan como un sistema binario. En las subsiguientes lecturas estudiaremos las esferas del sistema terrestre: atmósfera, litosfera e hidrosfera.

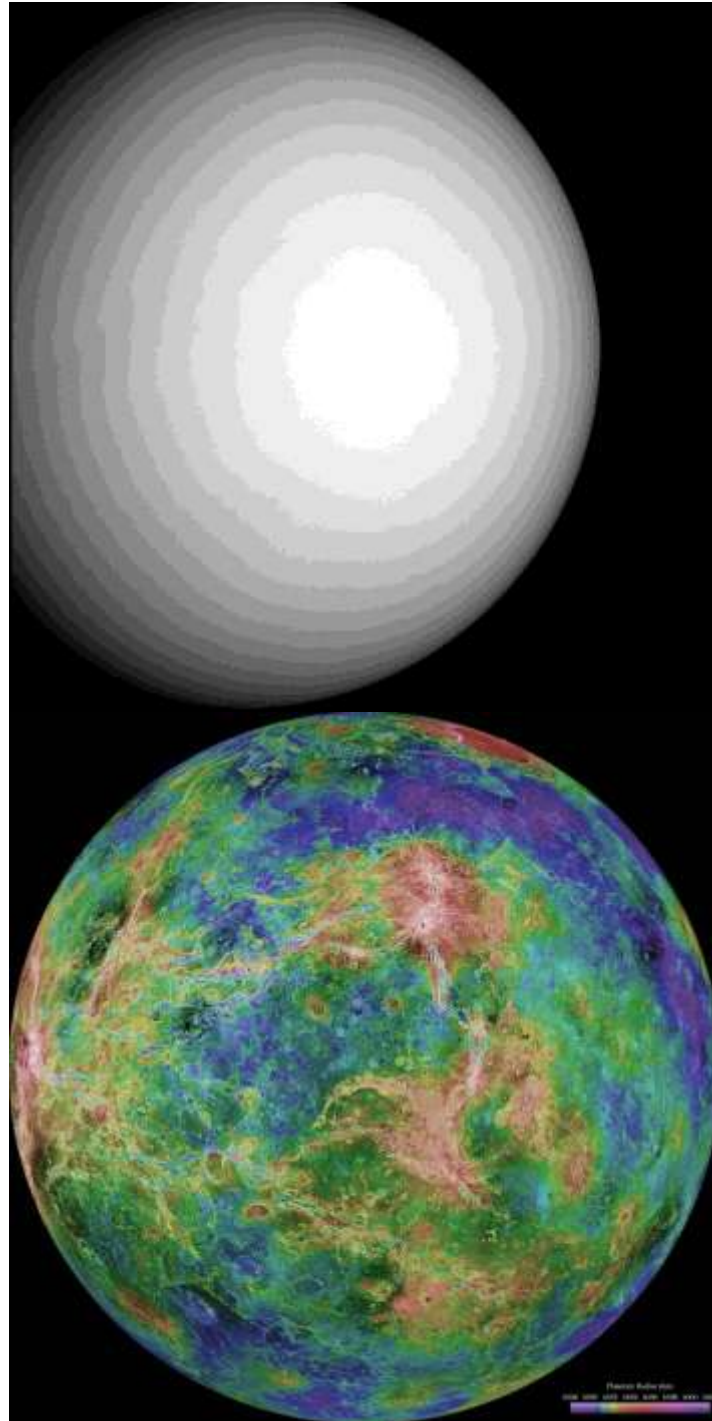


Figura 7. Arriba. Venus siempre esta cubierto de nubes y no se puede ver su superficie. Foto tomada por la Nave Messenger al pasar por Venus cuando se dirigía hacia Mercurio. Abajo. El radar de la nave orbital Magallanes y del poderoso radar del observatorio de Arecibo nos revela la superficie del planeta Venus. Se usa una escala falsa de colores. Tonos marrones son tierras altas y las azules tierras bajas. Fotos cortesía de: *MESSENGER Team/ MAGELLAN Team/NASA/JPL/Arecibo Observatory.*

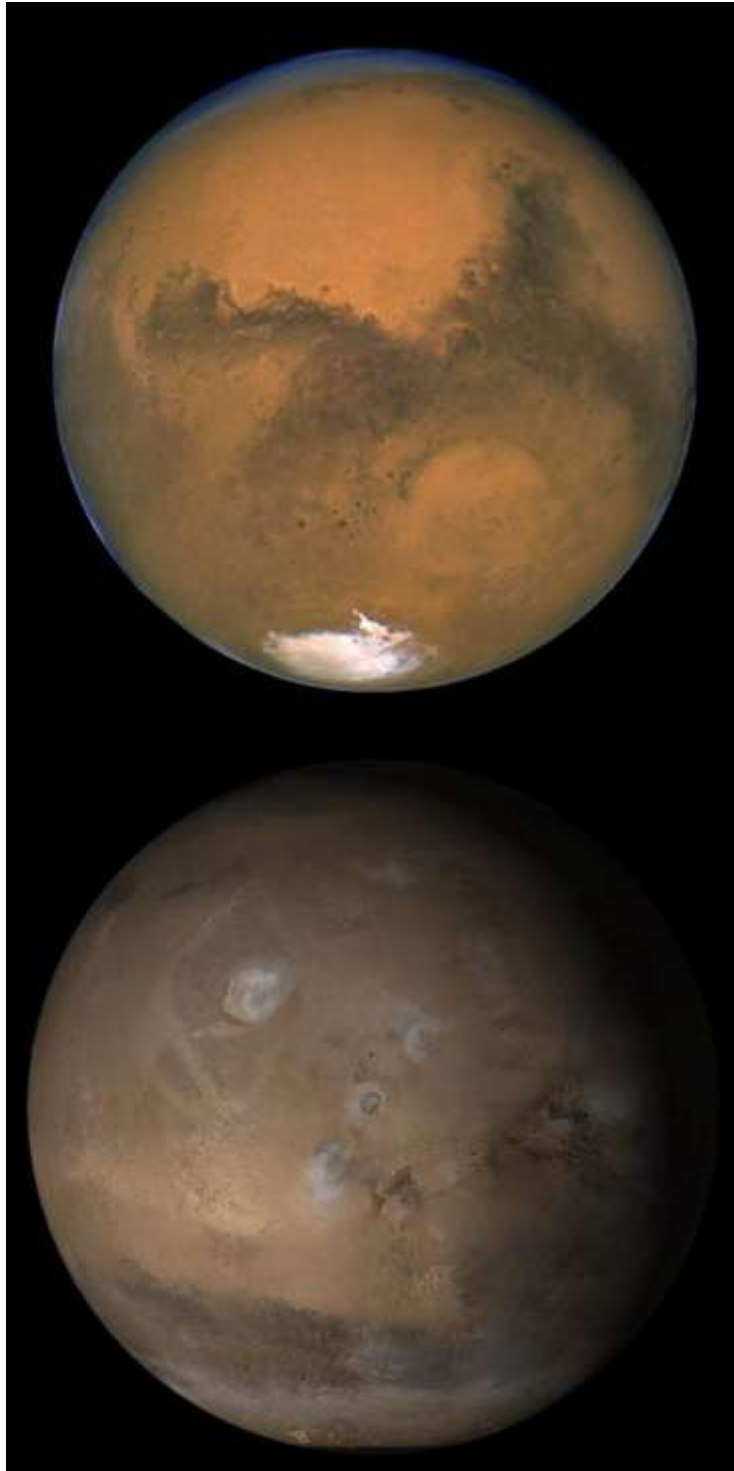


Figura 8. Arriba. Imagen capturada por el telescopio Hubble muestra a Marte y el casquete polar. Remanente del agua líquida que corrió sobre su superficie hace millones de años. Abajo. Tres volcanes inactivos y Olympus Mons el volcán de mayor altura en todo el Sistema Solar. Fotos cortesía de: STScI/NASA/JPL.

El Mundo Físico

Tabla 3. Propiedades físicas de los planetas del Sistema Solar. Datos de: [National Space Science Data Center's Fact Sheet](http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/) ; <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/>

planeta	masa	diámetro	densidad	rotación	distancia	revolución	inclinación orbital	inclinación del eje
	* M_E	km	g/cm^3		AU		Deg.	Deg.
Mercurio	0.0553	4880	5.43	58.81 d	0.387	87.97 d	7.0	0.1
Venus	0.815	12,104	5.20	243.69 d	0.723	224.70 d	3.4	177.3
Tierra	1.000	12,742	5.52	23.9345 h	1.000	365.26 d	0.00	23.45
Marte	0.107	6780	3.93	24.623 h	1.524	686.98 d	1.85	25.19
Júpiter	317.83	139,822	1.33	9.925 h	5.203	11.86 y	1.305	3.12
Saturno	95.162	116,464	0.687	10.50 h	9.539	29.46 y	2.489	26.73
Urano	14.536	50,724	1.32	17.24 h	19.182	84.01 y	0.773	97.86
Neptuno	17.147	49,248	1.64	16.11 h	30.06	164.79 y	1.773	29.56

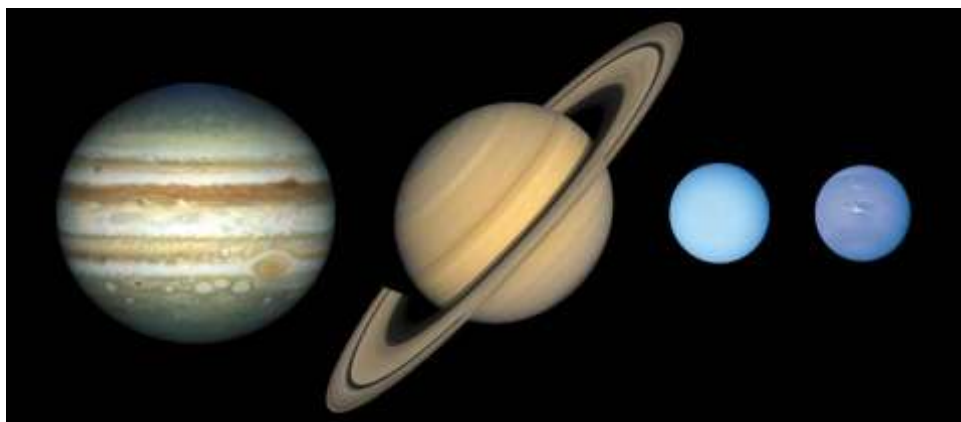


Figura 9. Los cuatro gigantes gaseosos de izquierda a derecha: Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno. Los últimos dos son planetas gemelos si comparamos sus masas, diámetros, densidades y periodo de rotación en su eje. Fotos cortesía de: STScI/NASA/JPL.

Los Planetas Gaseosos

Júpiter

Júpiter es el gigante de los planetas, contiene sobre el doble de la masa de todos los planetas juntos. Es el cuarto objeto celeste más brillante en nuestro cielo (después del Sol, La Luna y Venus). Esto facilita identificarlo entre otros objetos del firmamento. En 1610 Galileo descubrió cuatro grandes lunas: Io, Calixto, Ganimedes y Europa y observó la revolución de éstas, alrededor del planeta. El planeta y las cuatro Lunas Galileanas pueden ser observados fácilmente con un telescopio pequeño. Ganimedes es la luna más grande del Sistema Solar, incluso mayor que el planeta Mercurio. Se cree que debajo del hielo de Europa hay un océano. En la actualidad se han detectado 63 satélites naturales alrededor del planeta.

El planeta no tiene superficie sólida, el gas se hace más denso a medida que penetramos en su interior. Júpiter es aproximadamente 90% hidrógeno y 10% de helio. Lo restante son trazas de metano, agua, amonio y material sólido. Información sobre el interior del planeta es obtenida mediante métodos indirectos, sólo la sonda de la nave Galileo pudo penetrar hasta 150 km por debajo del tope de las nubes. Probablemente el núcleo de Júpiter es sólido y tiene entre 10 a 15 veces³ la masa terrestre. Sobre el núcleo la mayoría del material es hidrógeno líquido metálico. Esta fase del hidrógeno se consigue a una presión que excede los 4 millones de bar.

$$\frac{P_{Jupiter}}{P_{Tierra}} = \frac{4,000,000 \text{ bar}}{1.020 \text{ bar}} \approx 4 \text{ millones}$$

A la temperatura y presión que hay en el interior del planeta, el hidrógeno es líquido. El hidrógeno líquido consiste de protones y electrones en forma ionizada. O sea que actúa como conductor eléctrico y es la fuente del campo magnético intenso que posee Júpiter. Las capas exteriores del planeta son de hidrógeno molecular y helio. El hidrógeno no cambia de fase súbitamente, por lo tanto, es posible un alto grado de estratificación.

Júpiter y otros planetas gaseosos muestran vientos de alta velocidad (más de 400 MPH) confinados en bandas anchas de latitud. Los vientos soplan en dirección contraria en bandas adyacentes. Cambios químicos y de temperatura entre las bandas son responsables de los cambios en color entre cada una. Las de colores claros se les llama **zonas**, y a las oscuras, **cinturones**. Hay vórtices complejos entre las bandas. La atmósfera es muy turbulenta. La energía para esta turbulencia viene del interior mismo del planeta.

³ Investigaciones recientes estiman que el núcleo tiene entre 14 a 18 veces la masa terrestre.

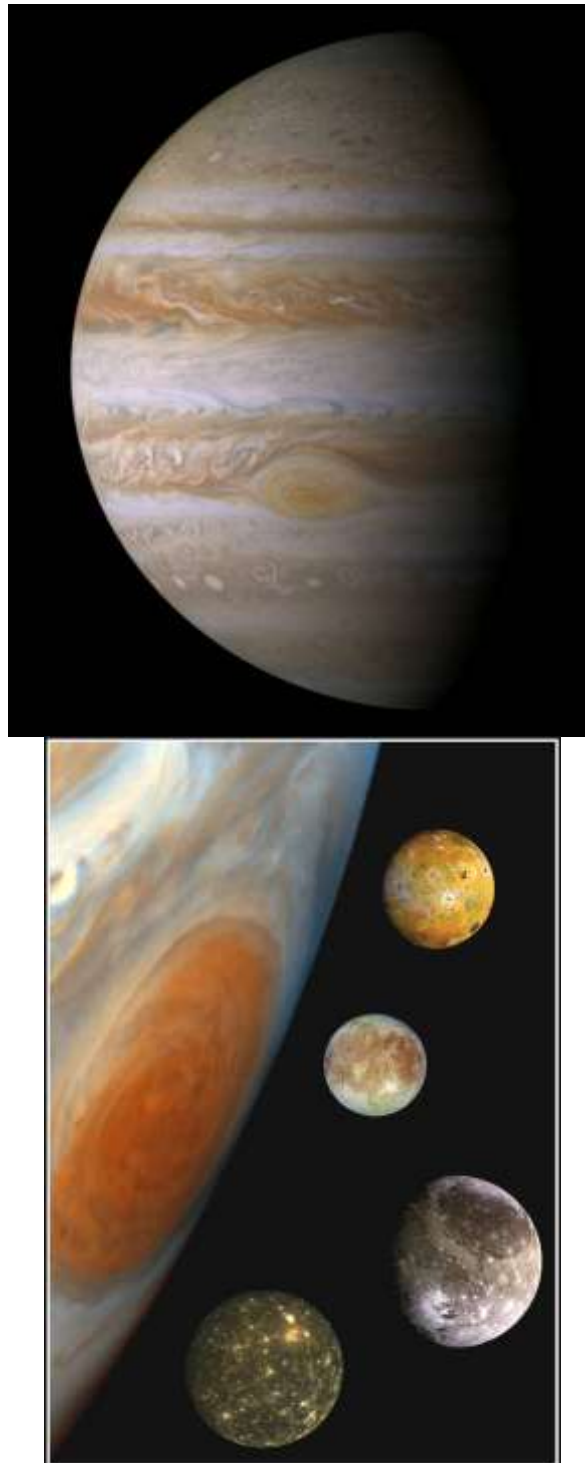


Figura 10. Arriba. Júpiter es un planeta con incesante actividad como lo demuestra los vórtices y festones en su atmósfera. Abajo. La Gran Mancha Roja (GMR) de Júpiter tiene un diámetro equivalente a dos planetas Tierra. Las cuatro lunas descubiertas por Galileo en el 1610 de arriba hacia abajo: Io, Europa, Ganimedes y Calixto. *Fotos cortesía de: NASA/JPL.*

El Mundo Físico

Júpiter se caracteriza por la Gran Mancha Roja (GMR) que se ha observado por más de 300 años. La GMR es un óvalo que mide 12,000 por 25,000 km, suficientemente grande para colmar dos Tierra. Es una región de alta presión cuyas nubes son significativamente más altas y frías que las regiones circundantes. Júpiter tiene un enorme campo magnético, mucho mayor que el de la Tierra. Su magnetosfera se extiende más de 650 millones de km (pasa la órbita de Saturno). El campo magnético atrapa partículas de alta energía que son capaces de dañar los componentes electrónicos de las naves y son fatales para los seres humanos. Auroras se han observado en los polos de Júpiter. El planeta emite ondas de radio de 20 MHz, que algunas veces pueden ser escuchadas en una radio de onda corta.

Saturno

Entre los cinco planetas que se pueden observar a simple vista, Saturno es el más alejado del Sol. Es un planeta gaseoso con una densidad promedio de 687 kg m^{-3} , menor que la densidad del agua de mar (1024 kg m^{-3}) y la del planeta Júpiter (1326 kg m^{-3}). Es el segundo planeta en tamaño del Sistema Solar. Al igual que Júpiter su composición es 75% hidrógeno y 25% helio, con trazas de metano, amonio y rocas. El interior es un núcleo rocoso, con una capa de hidrógeno metálico líquido y una capa de hidrógeno molecular. La energía que emite es mayor que la que recibe del Sol. La temperatura de su interior es de 12000 K.

Al igual que Júpiter y Urano posee anillos, pero sus anillos son los más impresionantes. Están compuestos de hielo, pero incluyen material rocoso cubierto de hielo. Se desconoce el origen de los anillos, probablemente existen desde la formación del planeta y han sido mantenidos por el rompimiento de satélites (lunas) de mayor tamaño. La extensión de los anillos es de 250,000 km, pero su espesor es de menos de un kilómetro. Por lo tanto, son relativamente delgados. En la actualidad, se han detectado 56 satélites naturales alrededor del planeta. La luna Enceladus expelle hielo para formar el anillo E.

Titán es la segunda luna más grande del Sistema Solar con un diámetro de 5550 km. Tiene una atmósfera densa compuesta principalmente de nitrógeno y nubes de metano. La atmósfera de Titán es similar a la de la Tierra hace 4 mil millones de años atrás, cuando no había oxígeno en nuestra atmósfera. La sonda Huygens de la ESA descendió hasta su superficie el 27 de Noviembre del 2004. La nave envió imágenes de la superficie que muestran lagos de metano y etano, además que llueve metano.

Saturno y sus dos anillos más externos: A y B, pueden ser observados con un telescopio refractor pequeño. Sin importar el tamaño del telescopio, la imagen de los anillos deja perplejo a cualquier observador. Yo nunca me canso de ver a Saturno a través del telescopio. A todos mis estudiantes siempre los exhorto a que hagan al menos una observación telescópica de Saturno.

Urano

Primer planeta descubierto mediante telescopio. William Herschel hizo una búsqueda sistemática del cielo y lo encontró en el 1781. Fue visitado por la nave *Voyager 2* en el 1986. La mayoría de los planetas tienen el eje de rotación, perpendicular al plano orbital. En cambio Urano tiene su eje de rotación casi paralelo a su plano orbital. El polo sur de Urano apunta directamente hacia el Sol, durante una parte de su órbita. Esto quiere decir que si estuvieras en el polo sur de Urano, el Sol siempre estaría sobre tu cabeza. Urano se compone principalmente de roca y diversas clases de hielos (agua, metano y amonio) con tan solo 15% hidrógeno y un poco de helio. O sea muy diferente a Júpiter y Saturno. Urano y Neptuno son similares a los núcleos de Júpiter y Saturno una vez que remueves el envoltorio de hidrógeno metálico líquido. La atmósfera de Urano es 83% hidrógeno, 15% helio y 2% metano. En la actualidad se han detectado 27 satélites naturales alrededor del planeta y un sistema de anillos. Urano y Neptuno son planetas muy parecidos.

Neptuno

Neptuno es el planeta más lejano del Sol. El octavo planeta fue descubierto por el efecto que ejercía la gravedad del planeta sobre la órbita de Urano. Cálculos matemáticos demostraron la posible órbita del planeta desconocido. Usando esas posiciones fue localizado por primera vez en 1846. La luna más grande es Tritón, fue descubierta diecisiete días más tarde. Neptuno tiene 8 satélites naturales en total. El planeta se encuentra a 30 AU del Sol y completa una revolución en 164.79 años. Es el planeta gaseoso más denso con 1.64 g cm^{-3} . Su masa es 17.14 masas terrestres y 60 planetas Tierra ocuparían su volumen interior. Se compone de una atmósfera de 79% hidrógeno (H), 18% helio (He) y 3% metano (CH₄). El color azul de la atmósfera se debe a que el metano absorbe el rojo y emite el azul. La parte central del planeta es agua líquida, metano líquido y otros “hielos derretidos” bajo una presión atmosférica extrema. El eje de rotación está inclinado 29.56° . Esto permite que tenga un verano o invierno con una duración de 41 años terrestres ($164.79 \div 4 = 41$). La rotación (día neptuniano) es de 16.11 horas terrestres. La rotación es tan rápida que genera los vientos más rápidos del Sistema Solar. En 1989, la nave espacial de la NASA *Voyager 2* descubrió nubes blancas y una tormenta oscura en forma de óvalo. El planeta presenta 4 anillos muy tenues y algunos incompletos con forma de arco. El telescopio *Hubble* es capaz de distinguir algunos rasgos en su atmósfera.

Es posible la observación con un telescopio pequeño (de 10-20 cm de apertura), pero sólo se observa un pequeño punto color azul. El disco es difícil de distinguir. Para que tengas una idea de lo lejos que se encuentra Neptuno y lo lento que se desplaza en el cielo voy a darte el siguiente ejemplo. En el 1998 yo comencé a observarlo en la constelación de Capricornio, ahora en el 2008 todavía se encuentra en la misma constelación. ¡Sólo se ha desplazado aproximadamente 35 grados de arco en 10 años!

Esto es menos que el espacio que ocuparían tus dos manos una al lado de la otra, al extender completamente tus brazos.

Cuerpos Pequeños del Sistema Solar

Asteroides

Los asteroides son fragmentos rocosos sobrantes de la formación del Sistema Solar hace 4.6 billones de años. La mayoría de estos cuerpos se encuentran entre la órbita de Marte y Júpiter, en una región conocida como el Cinturón de Asteroides. El cinturón está compuesto por millones de asteroides que varían en composición, forma o tamaño. Algunos son irregulares y otros tienen forma de papa. También presentan cráteres generados en las colisiones con otros asteroides. Se conocen alrededor de 20,000. Vesta está entre los más grandes. La mayoría tienen menos de 10 km y son muy oscuros; por eso es difícil detectarlos. La investigación de asteroides ha sido posible gracias a los telescopios (incluye los radio-telescopios), ya que no se pueden ver a simple vista la mayoría del tiempo, excepto cuando pasan muy cerca de la Tierra.

Ocasionalmente las órbitas elípticas de los asteroides pueden ser alteradas por la inmensa gravedad del planeta Júpiter o por encuentros cercanos con el planeta Marte u otros asteroides. Las nuevas órbitas pueden interceptar las órbitas de los planetas interiores, inclusive la Tierra. Cuando se acercan a la Tierra se le conocen como NEAs (*near-Earth asteroids*). En el pasado los asteroides han chocado con la Tierra. Los de mayor tamaño han causado extinciones masivas tales como la ocurrida hace 65 millones de años en la península de Yucatán y que provocó la desaparición de los dinosaurios. En el 2029 se espera que pase el asteroide 99942 Apophis muy cerca de la Tierra. El observatorio de Arecibo tiene un poderoso radar que puede rastrear los cambios en posición del asteroide y con esos datos y modelos computacionales del Sistema Solar pueden calcular la órbita de estos cuerpos. La presión de la luz, la interacción con el viento solar y el spin del asteroide afectan el cálculo de la órbita del asteroide. Condrito carbonífero (tipo C) y ferro-rocosos (tipo S) son las dos composiciones químicas principales de los asteroides. La Nave espacial de la NASA Galileo (1991) y NEAR (2000) fueron la primera en sobrevolar y aterrizar en un asteroide, respectivamente.

Cometas

Los cometas son cuerpos formados por hielo (agua, gases helados) y polvo, remanentes de la formación del Sistema Solar hace 4.6 billones de años. Por eso es importante estudiarlos, ya que han cambiado muy poco y podrían revelarnos información sobre el origen del Sistema Solar. Cuando están cerca del Sol y están activos, muestran las siguientes partes:

- núcleo: relativamente sólido y estable, mayormente hielo y gas helado con una pequeña cantidad de polvo y otros sólidos;

El Mundo Físico

- coma: nube densa de agua, dióxido de carbono y otros gases neutrales sublimados desde el núcleo;
- nube de hidrógeno: gigantesca envoltura de hidrógeno neutral pero muy rarificada;
- cola de polvo: muy visible y puede alcanzar una longitud de hasta 10 millones de kilómetros, compuesta de polvo del tamaño de partículas de humo que es expelido por los gases que escapan del cometa;
- cola de iones: puede alcanzar una longitud de cientos de millones de km compuesta de plasma, ramificada en rayos y chorros provocados por la interacción con el viento solar. Generalmente se aprecia mejor con sensores o cámaras que visualmente.

Algunos cometas tienen orbitas elípticas y pasan cerca de los planetas interiores. Los cometas de periodo corto les toman menos de 200 años en completar una revolución alrededor del Sol. La mayoría de estos cuerpos helados provienen de un lugar más allá de la órbita de Neptuno, por eso se les conoce como objetos Trans-Neptunianos u objetos del Cinturón Edgeworth-Kuiper. Muchos cometas tienen trayectorias hiperbólicas, o sea que pasan una sola vez alrededor del Sol o Júpiter para nunca mas volver. Muchos cometas chocan con el Sol y se vaporizan. Imágenes de la sonda SOHO de la NASA revelan claramente estos encuentros. Los cometas de periodo largo provienen de una región muy distante (100,000 AU del Sol) que se conoce como la nube Oort. A estos cometas le puede tomar hasta 30 millones de años completar una órbita alrededor del Sol. Se estima sobre 1 trillón de cometas en la nube Oort, mantenidos allí por la débil fuerza gravitacional del Sol. Aquellos cometas que pasan más de 500 veces cerca del Sol se volatilizan casi en su totalidad el hielo y gas y lo que queda es un cuerpo rocoso. Algunos astrónomos **especulan** que los NEA son remanentes de cometas.

La presión de la luz solar y la interacción con el viento solar arrastran los materiales de la coma y forman una larga cola que siempre apunta en dirección opuesta al Sol. Se observan dos tipos de colas. Una es una cola de polvo que refleja la luz solar y la otra es una cola de gas ionizado (partículas cargadas eléctricamente) que es excitada por el viento solar. Las irregularidades en la cola de gas ponen de manifiesto los variados embates del viento solar. Las colas de polvo pueden cubrir una gran parte del firmamento e incluso atravesar la órbita de la Tierra. Cuando la Tierra pasa por esa parte sucia del espacio, el polvo es atraído por la Tierra y se observan las lluvias de meteoros. Los meteoros son granos de polvo que se mueven a velocidades sobre 70 km s^{-1} y que al ionizar las moléculas de nuestra atmósfera producen ese destello fulgurante. El polvo del cometa Tempel-Tuttle es el responsable de provocar la lluvia de meteoros conocida como la Leónidas. Los impactos de cometas en el pasado lejano de la Tierra durante su formación trajeron agua y variedad de moléculas orgánicas. El agua de nuestros océanos es producto de la colisión de millones de cometas con la Tierra. El cometa Halley es muy famoso porque su periodo es de 76 años muy similar a la edad promedio de un ser humano. Los chinos registraron su paso 240 AC. Unos amigos y yo lo observamos en el 1986 desde Quebradillas por varios meses, sólo unos tres a cuatro días cuando estuvo

El Mundo Físico

más cerca del Sol fue que se pudo observar una extensa cola de polvo. El cometa Hyakutake (1996) es uno de los que ha pasado más cerca de la Tierra, a 0.230 AU. El cometa Hale-Bopp (1997) y el cometa Ikeya-Seki (1965) han sido uno de los más brillantes observados a finales del siglo XX.



Figura 11. Cometa Hale-Bopp en su máximo esplendor. El cometa libera gran cantidad de polvo sobre el cual se refleja la luz solar. Foto tomada por Edwin Alfonso-Sosa desde Quebradillas, Puerto Rico el 18 de abril del 1997.



Figura 12. Cometa Hale-Bopp se integra al paisaje. Mirando hacia el Noroeste. Foto tomada desde el Merendero de Quebradillas por Edwin Alfonso-Sosa.

Sistema Tierra-Luna

Un Sistema Anormal

La Luna es nuestro único satélite natural. Su radio ecuatorial es $0.272R_E$, aproximadamente una cuarta parte el de la Tierra.

$$\frac{R_L}{R_E} = \frac{1738 \text{ km}}{6378 \text{ km}} = 0.27$$

Usando la fórmula para el área de una superficie esférica, $S=4\pi r^2$, y tomando en cuenta el factor cuadrático, obtenemos que la superficie terrestre es 13.5 veces la superficie lunar.

$$S_L = 4\pi(R_L)^2 = 4\pi(0.27R_E)^2 = (0.27)^2 4\pi(R_E)^2 = 0.074 S_E$$

despejando obtenemos

$$S_E = \frac{1}{0.074} S_L = 13.5 S_L$$

Si repetimos el ejercicio anterior para el caso de Júpiter y su satélite de mayor tamaño Ganimedes, obtenemos que la superficie de Júpiter sea 736 veces la de Ganimedes.

$$S_J = \frac{1}{0.0014} S_G = 736.43 S_G$$

Comparando el sistema Joviano con el sistema Tierra-Luna nos damos cuenta que nuestro satélite nos queda demasiado grande. Similarmente la masa de la Luna es una centésima parte la de la Tierra ($M_L = 0.0123M_E = 7.35 \times 10^{22} \text{ kg}$), en cambio, Ganimedes representa tan solo 78 millonésimas la masa de Júpiter ($M_G = 7.8 \times 10^{-5} M_J$). Esta característica hace que la Tierra y la Luna se comporten como planeta binario. La Luna no orbita alrededor del centro de la Tierra sino que la Tierra y la Luna orbitan alrededor de un punto que llamamos baricentro, que se encuentra aproximadamente a 1707 km bajo la superficie terrestre. Conociendo la distancia d_L entre la Tierra y la Luna podemos determinar la posición del centro de masa del sistema (baricentro).

$$\frac{M_L d_L}{M_E + M_L} = \frac{(0.0123)(384,405 \text{ km})}{1.0123} = 4671 \text{ km del centro de la Tierra}$$

$$R_E - 4671 \text{ km} = 1707 \text{ km}$$

El Mundo Físico

Los dos cuerpos completan una revolución alrededor del baricentro en 27.322 días (periodo sideral). Ese es el mismo tiempo de la rotación lunar. Este hecho implica que la rotación lunar y el periodo de revolución alrededor del baricentro están sincronizados. Por eso siempre vemos la misma cara de la Luna sin importar el día del ciclo lunar. Se ha establecido que una distribución asimétrica de la masa en el interior de la Luna podría explicar la sincronización. Hay mayor masa en dirección hacia la Tierra. La cara que siempre vemos es la más interesante ya que presenta la mayoría de los “mares y océanos” de basalto. O sea, las áreas bajas y oscuras en la superficie lunar producidas por grandes impactos que ocurrieron temprano en la era lunar, hace más de 3,900 millones de años atrás, y que fueron luego rellenados con material fundido del interior de la Luna, hace 3,200 millones de años atrás. El basalto es una roca volcánica oscura y densa con alta concentración en metales tales como hierro, níquel, titanio y cobalto. Las tierras altas son más viejas y tienen edades entre 3,800 y 4,000 millones de años.



Figura 13. Arriba. Océanos y Mares de basalto se ven como depresiones oscuras. Foto por Edwin Alfonso. Abajo. El hemisferio sur de la Luna muestra tierras altas y gran cantidad de impactos. Foto por Luz E. Butler y David Rodríguez, MIJOVI 2, Quebradillas, Puerto Rico.

Fases Lunares

Las fases lunares son cambios en la dirección de la iluminación solar que incide sobre la única cara que vemos de la Luna. El Sol siempre ilumina un hemisferio completo de la Luna, pero nosotros vemos fracciones de ese hemisferio a lo largo del ciclo lunar. Las fases son provocadas por cambios en la conjunción entre la Tierra, la Luna y el Sol. Durante conjunción inferior y oposición los tres cuerpos están alineados, entonces tenemos fase de luna nueva (novilunio) y llena (plenilunio), respectivamente. Durante las cuadraturas, los tres cuerpos forman un ángulo recto, entonces observamos cuarto creciente y cuarto menguante. La misma fase se repite cada 29.531 días. Esto se conoce como el periodo sinódico. El periodo sinódico y el sideral se diferencian en 2.209 días. La diferencia es provocada por el movimiento de traslación del sistema Tierra-Luna alrededor del Sol. Se requieren 2.2 días adicionales para que los tres objetos celestes vuelvan a la misma conjunción. Las fases de la Luna correlacionan con su posición en el cielo. Esto quiere decir que para fase de cuarto creciente, la Luna sale por el Este, al mediodía pasa sobre el meridiano local cuando el Sol se pone y seis horas más tarde, a la medianoche, se pone por el oeste. Para fase de luna llena, la Luna sale por el Este exactamente cuando el Sol se pone por el Oeste.

En la antigüedad, el ciclo sinódico de $29 \frac{1}{2}$ días era la base de los calendarios lunares. Nuestro calendario moderno aún mantiene 11 meses que tienen 30-31 días y un mes de 28-29 días. En el calendario judío-cristiano para determinar la fecha de la Pascua se marca con el primer plenilunio justo después del equinoccio de primavera. En el Islam es de suma importancia determinar la fecha de la creciente más temprana.

Eclipses Solares y Lunares

El plano de la órbita lunar alrededor de la Tierra está inclinado 5° respecto al plano orbital de la Tierra alrededor del Sol (la eclíptica). Los dos planos se intersectan en sólo dos puntos llamados nodos. Se conocen como nodo ascendente y nodo descendente. Durante Luna Nueva el disco lunar se encuentra abajo o encima del disco solar y durante Luna Llena no pasa por la sombra de la Tierra. Sólo cuando La Luna pasa por cualquiera de los nodos, durante Luna Nueva o Luna Llena, es que en la Tierra experimentamos eclipses solares y lunares, respectivamente. Separados entre sí por 15 días.

Eclipse Solar Total

El diámetro aparente de la Luna promedia $31'$ de arco que son aproximadamente $\frac{1}{2}^\circ$ de arco. Equivale a la mitad del grueso de tu dedo índice cuando extiendes tu brazo al cielo. ¡El diámetro aparente del Sol son $32'$! Esto permite que el disco solar pueda ser exactamente cubierto por el disco lunar bajo cierta alineación específica. No es

El Mundo Físico

suficiente una conjunción inferior de la Luna (luna nueva), sino que necesitamos también que el plano orbital de la Luna interseque la Eclíptica (línea de nodos apunta al Sol), esto ocurre dos veces al año. Asombrosamente bajo esas condiciones ocurre un eclipse del disco solar. Los eclipses solares parciales, en los cuales la sombra central de la Luna toca a la Tierra, ocurren tres a cuatro veces al año. Los eclipses solares totales ocurren una vez cada 18 meses. Es posible un máximo de cinco eclipses solares en un año. Ningún eclipse solar debe observarse directamente. Puede ocurrir daño irreversible a la retina y ceguera. Se necesitan filtros especiales que absorben el 99.9% de la luz. Durante el eclipse solar total el disco lunar tapa en su totalidad al disco solar, durante ese tiempo el cono de sombra (*umbra*) arroja cierta parte de la Tierra. A medida que la Tierra rota y la sombra atraviesa la superficie terrestre se traza un sendero de totalidad. Las personas que vivan a lo largo del sendero de totalidad verán el cielo oscurecerse y ver las estrellas. El horizonte permanece iluminado con luz crepuscular. Alrededor del Sol eclipsado se observa la corona solar como un halo luminoso con destellos cambiantes. Prominencias solares han podido fotografiarse durante la totalidad. La totalidad puede durar cerca de 5 minutos. El tiempo máximo posible es de 7 minutos con 31 segundos. El eclipse solar del 25 de Junio del 2150 durará hasta 7 minutos con 14 segundos. Este fenómeno es un regalo de Dios que debe ser apreciado por todos en la Tierra. En Puerto Rico, el 26 de febrero del 1998, se presencié un eclipse solar parcial que cubrió cerca del 90% del disco solar. Durante el evento descendió la luz, la temperatura descendió y el comportamiento de las aves se alteró. En la isla de Aruba y Guadalupe fue total (100%) y tuvo una duración de aproximadamente tres minutos.

Eclipse Lunar Total

La misma condición en la línea de nodos (esta vez apuntando hacia la sombra de la Tierra) se tiene que cumplir para los eclipses lunares totales, pero durante oposición (luna llena). Esto quiere decir que transcurridos 15 días a partir de un eclipse solar total tenemos un eclipse lunar total, no necesariamente en el mismo lugar de la Tierra. La Luna pasa por la sombra de la Tierra (*umbra*) durante hora y cuarenta minutos (100 min.) a lo sumo. A pesar de eso, se ve color rojizo debido a que le llega luz roja que pasa por nuestra atmósfera. Esa luz se conoce como luz cenicienta. La sombra de la Tierra en la órbita lunar es de 9212 km, un diámetro angular de $1^{\circ} 22.4'$ de arco. Esto explica porque un eclipse lunar transcurre durante tanto tiempo.

Declinación Lunar

Cuando observes la Luna Llena levantarse por el horizonte, marca el punto por donde salió con alguna referencia (un árbol, edificio, poste de alumbrado, etc.). Al ver la salida de la Luna tres noches después, notarás que no sale por el mismo sitio. Si usamos la coordenada celestial declinación lunar podemos observar que cambia a lo largo del ciclo sideral. El plano orbital de la Luna y el plano de la eclíptica hacen un ángulo de 5° entre sí. Por eso la Luna se desplaza a lo largo del cielo 5° por abajo o 5° por encima de la

El Mundo Físico

eclíptica. Ya que la eclíptica hace 23.5° respecto al ecuador celeste, al sumarle los 5° la declinación lunar puede alcanzar hasta 28.5° . Generalmente la Luna alcanza declinaciones máximas entre 27° y 28° . La declinación tiene valores positivos si la Luna está sobre el ecuador celeste y negativos si está por debajo. Cuando pasa por los nodos la declinación es cero. Por lo tanto si la declinación lunar hoy es de 27° , siete días más tarde es 0° y catorce días más tarde es de -27° . Al completarse el ciclo sideral vuelve a tener el valor original de 27° . A grosso modo la declinación lunar cambia poco menos de 4° cada noche.

Perigeo Lunar

La órbita lunar no es perfectamente circular, es un elipse ($e = 0.055$). La distancia entre la Tierra y la Luna tiene un rango de 363,263 km durante el perigeo hasta 405,547 km durante apogeo. Una diferencia de 42284 km o 26428 millas. El diámetro angular de la Luna varía de 32.9 a 29.5 minutos de arco. La reducción angular del disco lunar explica porque hay eclipses solares anulares.

Medición del Tiempo

La rotación de la Tierra hace que el Sol y todos los cuerpos celestes crucen el cielo de este a oeste todos los días. Este es un movimiento aparente, ya que la Tierra es la que se está moviendo y no los astros. En la antigüedad la perspectiva era muy diferente, por eso se decía que la Tierra estaba estática y que todos los cuerpos cruzaban la bóveda celeste por sí mismos. Ahora con los avances en navegación espacial, todos podemos ver imágenes de la Tierra rotando. Por supuesto que Copérnico, Galileo y Kepler ya sabían esto hace más de 400 años, gracias a sus cuidadosas observaciones astronómicas y el análisis matemático de las mismas.

Si una persona localizada en el ecuador terrestre, mide el intervalo de tiempo que le tomaría a una misma estrella pasar dos veces sobre su cabeza, estaría midiendo el periodo de rotación de la Tierra. Si la persona usa una estrella cercana como nuestro Sol, el intervalo de tiempo sería cuatro minutos más largo. El periodo de la Tierra cambia en milisegundos, pero jamás por cuatro minutos. Por lo tanto, la explicación radica en que el Sol se ha desplazado hacia el Este respecto a las otras estrellas en el firmamento. La Tierra tiene que rotar más de 360 grados para que el Sol vuelva a quedar sobre la cabeza del observador, así se consumen los cuatro minutos adicionales. Esta situación ocurre por la translación de la Tierra alrededor del Sol. Todos los días las estrellas de trasfondo al Sol cambian ligeramente su posición, claro está, que esto sólo se puede apreciar justo antes de la salida y justo después de la puesta del Sol. Si la Tierra no rotara le tomaría 365 días al Sol, salir por el oeste, cruzar el cielo y ponerse por el este. ¡Eso sí es un día largo!

La proyección del ecuador terrestre en la bóveda celeste se conoce como **ecuador celeste**. La **eclíptica** es el sendero aparente seguido por el Sol, a través de la bóveda celeste durante el año. La intersección de la eclíptica con el ecuador celeste se conoce como el **equinoccio vernal**, cuando el Sol cruza hacia latitudes septentrionales (norte). Otra forma de llamarlo es el primer punto de Aries. El equinoccio vernal se utiliza como punto de origen para el sistema de coordenadas celestes con el que se marcan la posición de las estrellas en la bóveda celeste. Las coordenadas son ascensión recta (R.A.) y declinación, que son análogas a longitud y latitud, respectivamente. El valor de la declinación se mide en grados y se parece a latitud. Los objetos celestes se encuentran arriba o abajo del ecuador celestial, igual que en cualquier localidad de la Tierra. La ascensión recta se mide en horas, minutos y segundos de arco y se parece a la longitud, excepto por una diferencia mayor. A medida que la Tierra rota, la ascensión recta sobre nuestras cabezas va cambiando. O sea, que la coordenada está anclada a los objetos celestes y no a la superficie terrestre. Las estrellas siempre tienen las mismas coordenadas celestes. Al menos durante el periodo corto de nuestras vidas.

El Mundo Físico

Cuando medimos el tiempo de rotación de la Tierra respecto a las estrellas lejanas o mejor dicho respecto al equinoccio vernal se le conoce como **día sideral**. Pero cuando medimos el periodo de rotación usando el Sol se conoce como **día solar aparente**. La diferencia entre las dos definiciones son cuatro minutos (3 min. 56 s) por lo que ya explicamos arriba. Esa diferencia hace que cada noche las estrellas aparezcan por el Este cuatro minutos antes. Este tiempo equivale a poco menos de un grado de arco. Si todas las noches las estrellas se desplazan hacia el oeste por un grado, ya para 360 noches hemos completado una revolución y volvemos a ver la mismas estrellas de hace un año. En un año completamos una vuelta alrededor del Sol.

Si usamos el **sol aparente** (el real) como referencia celestial para medir el tiempo tendríamos una medida de tiempo que no es constante. El tiempo solar aparente es el que se mide con un reloj solar. La primera razón es explicada por la Segunda Ley de Kepler. La segunda ley se puede visualizar así; un planeta cuando se acerca al Sol (perihelio) se mueve rápidamente y cuando está distante del Sol (afelio) se mueve lentamente. Desde la Tierra durante el perihelio, el Sol se desplaza rápido hacia el este y durante el afelio se desplaza lento. La segunda razón es que el Sol se desplaza a lo largo de la eclíptica y el tiempo se mide a lo largo del ecuador celestial. Tercero la rotación axial de la Tierra no es constante. Es un efecto pequeño pero es medible. Para evitar estas complicaciones se sustituye el sol aparente por un sol ficticio llamado el **sol medio**. Esta idea se concibe como que el sol medio se mueve con una rapidez uniforme a lo largo del ecuador celestial. La rapidez uniforme se define como la rapidez promedio del sol aparente que se desplaza a lo largo de la eclíptica. Tiene un valor de 15 grados por hora del tiempo solar medio. Las diferencias entre el tiempo solar medio y el tiempo solar aparente se pueden conseguir con la ecuación del tiempo. Esta te permite calcular cuanto tiempo de atraso o adelanto tiene el tiempo solar aparente respecto el tiempo solar medio para cada día del año.

Cuando se parte de un meridiano celeste para calcular el tiempo solar medio se le asigna el nombre del meridiano, por ejemplo si el meridiano pasa sobre el Observatorio de Greenwich en Gran Bretaña se le conoce como **Tiempo Medio de Greenwich (GMT)**. Donde GMT son las siglas en ingles. Si usas el meridiano que pasa sobre tu ciudad se llama **Tiempo Medio Local**. Si usamos como referencia un meridiano estándar o zona como referencia tenemos el **Tiempo Estándar o Tiempo de Zona**. En Estados Unidos hay cuatro tiempos estándar: Tiempo Estándar del Este (EST), Tiempo Estándar del Centro (CST), Tiempo Estándar de la Montaña (MST) y Tiempo Estándar del Pacífico (PST). Si escogemos meridianos separados por 15 grados entonces creamos zonas de tiempo para todo el mundo, separadas por una hora de tiempo solar medio. Puerto Rico, y Caracas están en la misma zona, en el Tiempo Estándar del Atlántico. Si son las doce de la medianoche en Greenwich, en Puerto Rico son las 8:00 PM AST, en Washington las 7:00 PM EST, en Houston las 6:00 PM CST, en Denver las 5:00 PM MST y en San Diego las 4:00 PM PST. Una forma de sincronizar la hora de todo el mundo es usar GMT o Tiempo Universal (UT1). Estaciones de radio en onda corta transmiten constantemente el tiempo universal coordinado (UTC) de los servicios de tiempo

El Mundo Físico

mundiales en frecuencias de: 5000 kHz, 10,000 kHz, 15,000 kHz, y 20,000 KHz desde Colorado, Estados Unidos. Relojes atómicos usan ondas electromagnéticas de una frecuencia particular de 9,192,631,770 ciclos por segundo emitidas durante transiciones electrónicas en el isótopo de Cesio 133 en el vacío. Cuando contamos ese número de ciclos ha pasado un segundo. El segundo atómico (A1) es la unidad de tiempo del Sistema Internacional de Medidas (SI). Su exactitud es de 1 segundo por cada millón de años.

Las Estaciones del Año

Todos los planetas que giran alrededor del Sol lo hacen en un mismo plano. Ese plano se le conoce como el plano de la eclíptica. Esto es así, porque los planetas se formaron del mismo disco de gas comprimido. La acreción de ese gas y el polvo formaron los protoplanetas, que evolucionaron hasta convertirse en los planetas que hoy conocemos. Una revolución alrededor del Sol es diferente para cada planeta. O sea, el año de la Tierra es menor al de Marte, equivalente a dos años terrestres. El del Planeta Neptuno es de aproximadamente 165 años terrestres. ¿Cómo podemos saber si existe ese plano, llamado eclíptica? Los antiguos astrónomos hace más de 3000 años se dieron cuenta que el Sol año tras año atravesaba las mismas constelaciones en el firmamento. Se les conoce como las constelaciones zodiacales. Nosotros sabemos ahora, que el Sol está en el centro del Sistema Solar y no es el Sol el que se mueve, sino que la Tierra esta completando una vuelta durante el año. O sea, que el trasfondo de estrellas que cambia mes tras mes en la bóveda celeste es simplemente un cambio de perspectiva, a lo largo de las diferentes posiciones de la órbita terrestre. También observaron que los otros planetas atravesaban las mismas constelaciones zodiacales. Ese camino en el cielo por donde pasan los planetas traza la posición de la eclíptica. El eje de rotación de la Tierra, llamado eje polar, atraviesa los polos de la Tierra y apunta hacia la estrella Polaris. Este eje no es perpendicular al plano de la eclíptica, sino que esta inclinado 23.45° hacia un lado. Asimismo ese número indica la separación angular entre el plano ecuatorial terrestre (celeste) y la eclíptica. Otros planetas tiene diferentes inclinaciones (ver tabla planetaria), por ejemplo: Marte es 25.19° y Urano es 97.86° .

Las estaciones de la Tierra: primavera, verano, otoño, e invierno; surgen como consecuencia de que el plano ecuatorial de la Tierra hace 23.45° respecto al plano de la eclíptica (vea figura). La trayectoria de la órbita terrestre es un elipse con una excentricidad pequeña ($e = 0.017$). Esto quiere decir, que el rango entre la distancia más cercana (perihelio) y la más lejana (afelio) al Sol es pequeño. Por lo tanto, las estaciones no se deben a cambios en la distancia a la que estamos del Sol. Una prueba de ello es que el invierno en el hemisferio norte ocurre durante el perihelio (2 enero). El número de horas de luz y la altura del sol durante el mediodía controlan las temperaturas particulares de cada estación; ambas dependen de la latitud a la que se encuentra el observador y la posición del Sol en la eclíptica. Que tan severa es una estación depende de la latitud a la que tú te encuentres. Un invierno a una latitud de 60°N no es igual que a 18°N , lo mismo con el verano. La diferencia estriba en que el ángulo de incidencia de la energía del Sol sobre la superficie terrestre varía debido a que la Tierra es una esfera.

Ya sea durante el equinoccio de primavera (marzo 21) o el de otoño (septiembre 23), el Sol pasa justo por encima del ecuador. Las personas que viven a lo largo de ese paralelo van a ver al Sol pasar al mediodía justo por el cenit. Recibirán la radiación solar más directa posible a esa latitud. Todos los puntos en la Tierra tendrán exactamente 12 horas

El Mundo Físico

de luz y 12 horas de noche. En el solsticio de verano (junio 21-22) la declinación del Sol es máxima y pasa justo sobre el paralelo $+23.5^{\circ}$ N, llamado el Trópico de Cáncer. Ese día en el hemisferio norte las horas de luz es máxima y las de oscuridad es mínima; comienza el verano en el hemisferio norte. En el hemisferio sur es viceversa de lo anterior; comienza el invierno en el hemisferio sur. En el solsticio de invierno el Sol tiene declinación mínima y pasa sobre el paralelo -23.5° S, llamado el Trópico de Capricornio. Ese día en el hemisferio norte las horas de oscuridad son máximas y las horas de luz son mínimas; comienza el invierno en el hemisferio norte. En el hemisferio sur es viceversa de lo anterior; comienza el verano en el hemisferio sur.

La latitud 66.5° N se conoce como el Círculo Ártico. El día del Solsticio de Verano, el Sol no se pone en 24 h, sino que rodea el horizonte. En latitudes por encima del Círculo Ártico, el Sol no se pone durante el verano. Se le conoce como sol de medianoche. En el invierno a esas latitudes, el Sol no se levanta. La noche dura muchos días.

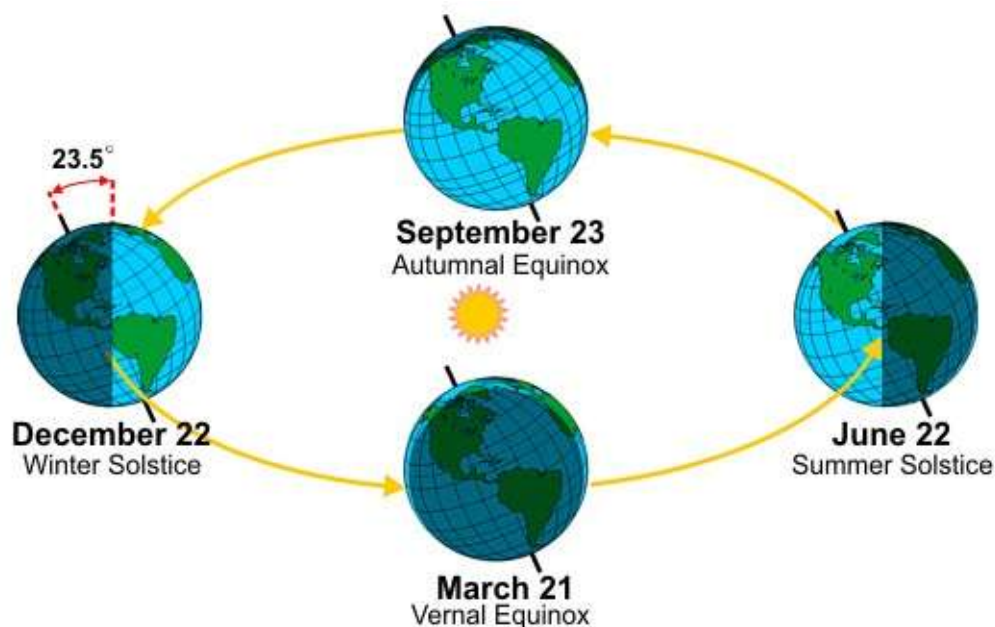


Figura 14 Las cuatro estaciones se deben a la posición inclinada del hemisferio terrestre relativo al Sol. El equinoccio de otoño es el 23 de septiembre y el de primavera el 21 de marzo. Imagen es cortesía de NOAA National Weather Service: www.srh.noaa.gov/jetstream/global/images/seasons.jpg

La Atmósfera

La **atmósfera o atmosfera**⁴ es una gran nube de gas y de sólidos suspendidos (aerosoles) que envuelve a toda la Tierra, y se extiende desde su superficie hasta 10,000 kilómetros de altura. La capa adelgaza progresivamente con la altura. Esta masa de gas se mantiene pegada a la masa de la Tierra exclusivamente por la fuerza de gravedad entre ambas. Junto con las otras tres esferas (hidrosfera, litosfera, biosfera) componen el **Sistema Terrestre**. A diferencia de las otras esferas, es muy dinámica y presenta cambios rápidos en su estado, al que llamamos **tiempo**. La prueba de esto es la mucha atención que le prestamos todos los días el estado del tiempo, ya sea en los noticieros o periódicos. El otro concepto, **clima** se refiere a las condiciones atmosféricas propias de una parte de la Tierra y que se mantienen similares por años. La atmósfera es similar a la hidrosfera, ya que son fluidos geofísicos, dinámicos y que obedecen los mismos principios físicos. La atmósfera está estratificada verticalmente, o sea como las capas de un bizcocho. Cada capa tiene propiedades físicas que la distingue de las otras. La atmósfera contiene el aire que respiramos y diversos gases que nos sirven de escudo de la radiación proveniente del Sol y de otros objetos en el Cosmos. Sólo en la última década, la humanidad ha comenzado a entender el impacto que puede tener sobre la composición de la atmósfera y el cambio del clima.

Composición Química

La Tierra perdió su atmósfera original de hidrógeno y helio hace mucho tiempo pero produjo una atmósfera secundaria como resultado del volcanismo y gases expelidos por las rocas que componen la Tierra. La gran masa de la Tierra y su gravedad, no permiten que los gases escapen al espacio. Así esta masa de gas ha modificado lentamente su composición química por la vida en el Planeta.

La **composición química** de la atmósfera, nuestra capa protectora, consiste 99.998% de su totalidad, de sólo cuatro gases: nitrógeno (N₂), oxígeno (O₂), argón (Ar) y dióxido de carbono (CO₂) (Ver Tabla). Por lo tanto, nuestra atmósfera es bastante simple. La sobreabundancia de nitrógeno permite que el oxígeno se diluya, y evita que la atmósfera sea explosiva y se incendie. Todos sabemos lo inflamable que puede ser el oxígeno puro. Los dos nitrógenos son separados por bacterias nitrificantes y por las descargas eléctricas en los rayos. Una vez separados pueden combinarse con hidrógenos, oxígenos y carbonos, para formar las proteínas presentes en los organismos vivos. La mayoría de los organismos vivos respiran oxígeno para completar sus procesos metabólicos. El dióxido de carbono es fundamental en la fotosíntesis y es opaco a la radiación de onda

⁴ En la lengua Española la palabra *atmosfera* y *atmósfera* con acento son correctas y tienen el mismo significado. Cuando la utilizo sin acento, lo hago para enfatizar que trato con una de las cuatro esferas del Sistema Terrestre.

El Mundo Físico

larga, infrarroja, por lo tanto mantiene el calor atrapado. El argón es un gas inerte, o sea, que no reacciona fácilmente, y se utiliza en las lámparas. Las concentraciones de dióxido de carbono, de metano (CH_4), y de óxido nitroso (N_2O) son bajas: 330 PPM, 2 PPM y 0.5 PPM, respectivamente. No obstante estos gases son los principales gases de efecto invernadero y los que mantienen la temperatura de la Tierra.

Tabla 4. Composición química de la atmósfera terrestre en términos de su porcentaje o partes por millón (PPM). Datos extraídos de la página Web:

http://www.srh.noaa.gov/srh/jetstream/atmos/atmos_intro.htm

Nitrógeno	N_2	78.084%	} 99.998%
Oxígeno	O_2	20.947%	
Argón	Ar	0.934%	
Dióxido Carbono	CO_2	0.033%	
Neón	Ne	18.20 PPM	
Helio	He	5.20 PPM	
Kriptón	Kr	1.10 PPM	
Dióxido de Azufre	SO_2	1.00 PPM	
metano	CH_4	2.00 PPM	
Hidrógeno	H_2	0.50 PPM	
Oxido Nitroso	N_2O	0.50 PPM	
Xenón	Xe	0.09 PPM	
Ozono	O_3	0.07 PPM	
Dióxido de Nitrógeno	NO_2	0.02 PPM	
Ioduro	I_2	0.01 PPM	
Monóxido de Carbono	CO	traza	
Amonio	NH_3	traza	

Fuente de Origen de los Aerosoles

Los aerosoles son partículas o gotitas suspendidas en la atmósfera, y van a la deriva por el viento, tales como: humo, polvo, contaminantes industriales como el hollín, gotitas de agua salada (salitre), ceniza volcánica. Proviene de diferentes fuentes tales como: fuegos forestales, tormentas de polvo del desierto, industrialización, rompimiento de las olas o erupciones volcánicas. Los aerosoles pueden elevarse a gran altura y ser arrastrados por los vientos globales. Generalmente a finales de la primavera se generan tormentas de polvo en los desiertos del norte de África, el polvo es arrastrado por los vientos alisios y puede cruzar el Océano Atlántico, depositándose en las Antillas.

El Mundo Físico

Durante el mes de Junio, estos aerosoles producen las brumas más densas en Puerto Rico. La masa de aire brumosa se intercala entre las ondas tropicales provenientes de África. La deposición de este polvo sobre los arrecifes de coral ha contribuido a la merma de los mismos. Otro evento frecuente es la bruma producida por la ceniza del volcán Soufrière en la isla de Montserrat, que llega a PR cuando el viento sopla del Sureste. En la costa Atlántica de Puerto Rico el rompimiento de la marejada produce nubes de salitre que se propagan tierra adentro.

Tabla 5. Eventos que generan aerosoles sobre Puerto Rico.

Aerosol	Evento que lo genera
Polvo	Tormentas de polvo del Desierto del Sahara
hollín	Chimeneas de plantas de energía
salitre	Rompiente de marejadas por el viento o la costa
ceniza	Erupción volcánica en la isla de Monserrate

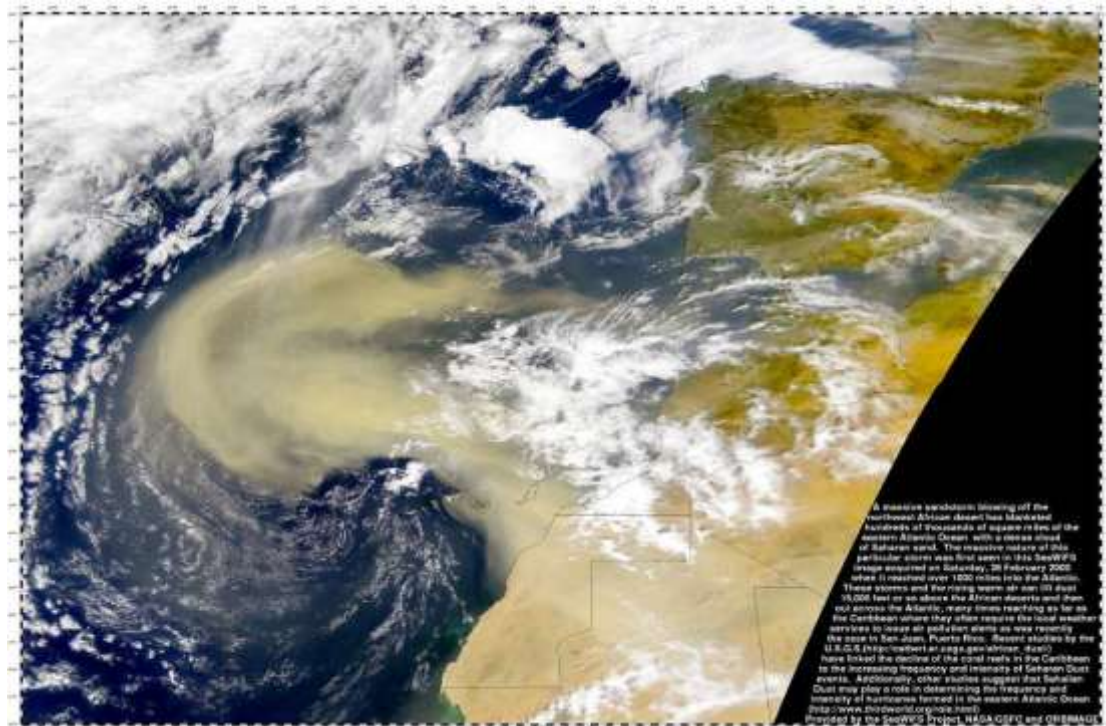


Figura 15. Imagen satelital de una tormenta de polvo masiva expelida del Desierto del Sahara al Norte de África el sábado 25 de febrero del 2000. La nube alcanza una altura de 15,000 pies y se extiende hasta 1000 millas dentro del Océano Atlántico. Esta nube de polvo alcanzó llegar hasta Puerto Rico y el Servicio Nacional de Meteorología tuvo que alertar a los ciudadanos. Imagen cortesía de: SEAWiFS/NASA/GSFC and ORBIMAGE.

Estructura Vertical

La envoltura de gas que rodea a la Tierra es bastante homogénea en el plano horizontal, pero esta estratificada en el plano vertical. Se pueden distinguir cinco capas, basándonos en las siguientes propiedades físicas: cambios en temperatura, densidad, composición química y movimiento. Partiendo desde la superficie terrestre las capas son: troposfera, estratosfera, mesosfera, termosfera, exosfera. Cada capa esta separada por una capa de transición, donde la temperatura no cambia con la altura y a la que llamamos pausa. Estas son: tropopausa, estratopausa y mesopausa (vea Figura).

La troposfera es la capa donde vivimos, se extiende desde la superficie hasta una altura entre 6 a 20 km (4 -12 mi). La troposfera es tres veces más gruesa en el ecuador que en los polos. En el ecuador alcanza los 20 km y en los polos solo 6 km. La temperatura decrece con la altura desde 17° C (62° F) hasta unos -51° C (-60° F). Es la capa más densa y responsable por el tiempo meteorológico y el clima. Casi la totalidad del vapor de agua y nubes se forman en la troposfera. Contiene el 90% de los gases atmosféricos.

La estratosfera se extiende desde la tropopausa (6-20 km) hasta unos 50 km de altura y contiene el 19% del total de gases. La temperatura asciende debido a que el oxígeno absorbe la radiación ultravioleta para formar la molécula triatómica de oxígeno, el ozono. A mayor altura, mayor será la radiación ultravioleta y aumenta la temperatura. Ocurre formación de nubes llamadas PSC (*Polar Stratospheric Clouds*) que se forman en el Polo Sur, cuando las temperaturas son extremadamente bajas en el invierno austral. En la parte superior de la estratosfera tenemos la capa de ozono, responsable en detener la mayoría de la radiación ultravioleta. Las nubes PSC sirven de sustrato, lugar donde ocurre la reacción entre el Cloro (Cl) y el ozono (O₃). Reacción responsable de la destrucción del ozono.

La mesosfera se extiende desde los 52 km hasta los 85 km de altura. La concentración de oxígeno es menor y la absorción de energía por éste decrece. Esto explica porque la temperatura decrece a mayor altitud. A pesar que la densidad es mucho menor que en la troposfera, hay suficiente gas para detener a los meteoros que bombardean constantemente a la Tierra. El meteoro entra con una rapidez de 70 km s⁻¹ provocando la ionización extrema del gas (plasma) que interfiere con su paso. El plasma emite la luz característica que observamos cuando ingresa el meteoro. Aquí se forman las nubes noctilucientes o PMC (*Polar Mesospheric Clouds*), nubes que emiten luz propia. Se pueden observar en latitudes altas en noches bien oscuras.

La termosfera se extiende de 90 km hasta 690 km de altura. Aquí los gases se han rarificado en tal grado, que sólo es posible la absorción de rayos ultravioleta y rayos x. Esto provoca aumentos de temperatura de hasta 2000° C (3600° F). Pero si pudieras respirar a esa altura, cosa que no es posible, te morirías de frío. Esto se debe a que la

El Mundo Físico

densidad del aire es muy baja. En la termosfera ocurren las auroras boreales. Partículas del Sol de alta energía (protones) que se liberan en eyecciones de masa coronal, (CME's *Coronal Mass Ejections*) chocan con los átomos de nitrógeno y oxígeno, provocando excitación electrónica. Para que los electrones retornen a sus niveles previos de energía tienen que liberar fotones. Esa cascada de fotones produce la luz roja y verde típica de la aurora boreal.

La exosfera es la capa más externa y marca la región donde la atmósfera puede escapar al espacio. Se extiende hasta una altura de 10,000 km. En esta región se encuentran los satélites y estaciones espaciales.

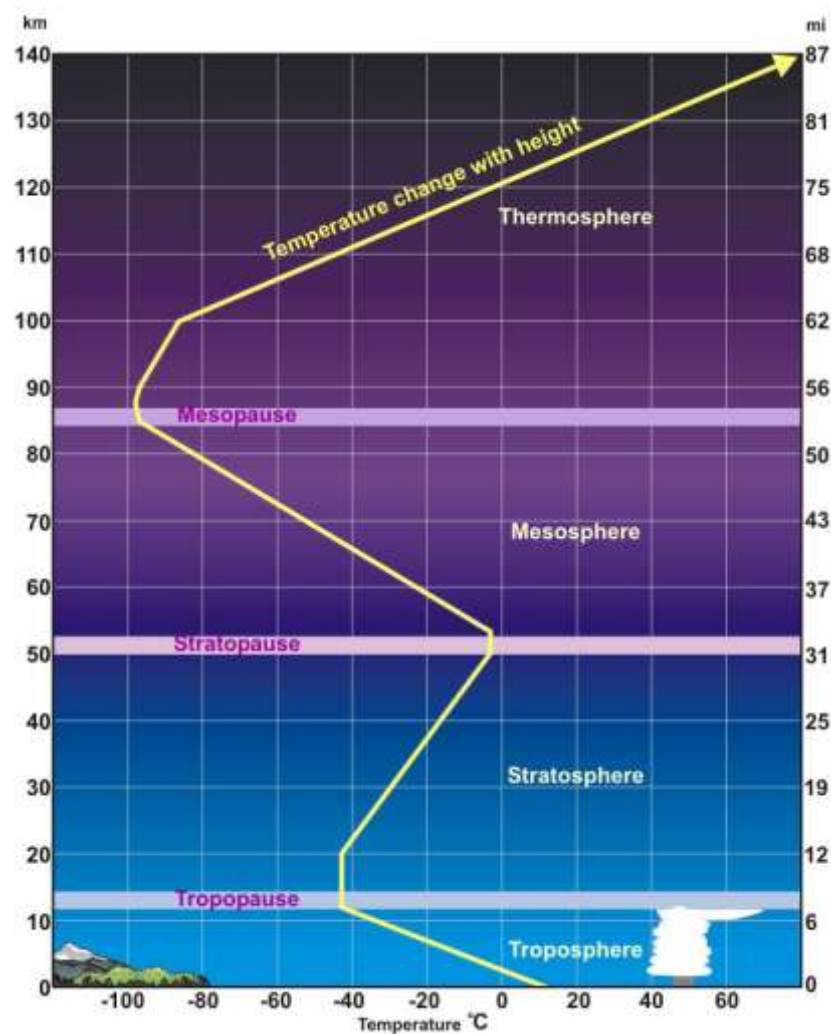


Figura 16. Perfil de temperatura en las capas más bajas de la atmósfera. En la troposfera y mesosfera la temperatura decrece directamente con la altura. En la estratosfera y termosfera la temperatura incrementa directamente con el aumento en la altura. Las capas donde la temperatura no cambia se les conocen como pausas. Dibujo cortesía del Servicio Nacional de Meteorología, <http://www.srh.noaa.gov/srh/jetstream/atmos/atmprofile.htm>

La Ionosfera

Entre la mesosfera y termosfera tenemos una fuerte ionización de gases por la radiación x, radiación ultravioleta y partículas cargadas provenientes del viento solar. La radiación disocia las moléculas de nitrógeno, oxígeno y de algunos átomos, liberando electrones libres. Se establece un equilibrio entre los electrones libres y los iones, generando una densidad estratificada de iones. En la ionosfera podemos identificar tres capas importantes, éstas son: D, E y F; con elevaciones de 50 km, 100 km y 400 km, respectivamente. Durante el día penetra más la radiación X y UV, que genera la capa D y E. Las tres capas reflejan las ondas de radio de alta frecuencia (HF) y permiten la transmisión de onda corta entre países. La onda es reflejada por la capa y por la superficie del mar y tierra. Así se mantiene una trayectoria en forma de zigzag, y la onda puede ser captada por receptores localizados más allá del horizonte de la estación de transmisión. Ondas electromagnéticas con una longitud de onda menor de 40 m y frecuencias mayores de 7000 kHz (7 MHz) son reflejadas por la capa D y E. En cambio, frecuencias menores de 7000 kHz son absorbidas durante el día. Al anochecer estas capas bajas desaparecen y permanece la capa F. Las ondas con frecuencias menores de 7000 kHz ya no son absorbidas y pueden alcanzar la capa F. La capa F refleja ondas con longitudes entre 40 m hasta 160 m y frecuencias tan bajas como los 1800 kHz (1.8 MHz). Si la onda es reflejada de una altura mayor, entonces puede abarcar una distancia mayor. Esto explica porque durante la noche podemos recibir transmisiones de países lejanos. La capacidad de absorber y reflejar ondas electromagnéticas depende de las propiedades físicas de la capa. Estas propiedades a su vez dependen de la cantidad de radiación y de partículas cargadas que excitan la atmósfera. La duración del día, las estaciones del año, y el ciclo de actividad solar de 11 años modulan la cantidad de radiación y partículas que recibe la atmósfera, y por lo tanto, las propiedades físicas de la ionosfera. En el Observatorio de Arecibo se hacen estudios de la ionosfera.

Opacidad de la Atmósfera

La radiación electromagnética es absorbida, difundida y refractada por la atmósfera y estos fenómenos dependerán del largo de onda de la radiación incidente. La atmósfera es opaca a la mayoría de los largos de onda. Sólo se transmiten ondas de radio con largos de onda entre 1 mm hasta 20 m y luz visible desde 290 nm (ultravioleta cercano) hasta 1 μm (infrarrojo cercano). Esta es la ventana que tenemos para ver hacia el Universo con nuestros telescopios y radiotelescopios. Largos de onda menores de 290 nm disocian e ionizan la atmósfera, por eso son absorbidos por ésta. La capa de ozono absorbe la radiación ultravioleta de 300 hasta 210 nm. En la región del infrarrojo, largos de onda de 1 μm hasta 1mm son absorbidos al excitar las moléculas de agua (H_2O), de dióxido de carbono (CO_2), nitrógeno (N_2) y oxígeno (O_2). En largos de onda mayores de 13 m la ionosfera actúa como un escudo conductor que absorbe y refleja la radiación incidente. Esta propiedad de la ionosfera permite la radiodifusión de onda corta alrededor del

mundo. Al generarse la ionosfera se absorbe parte de la radiación X, eso no permite que llegue a la troposfera.

Presión Atmosférica

La masa atmosférica ejerce una fuerza sobre la superficie de la Tierra. Esta fuerza por unidad de área se conoce como presión atmosférica. La presión atmosférica es un indicador de la situación del tiempo atmosférico, ya que el contenido de vapor de agua cambia la presión atmosférica. A mayor vapor de agua menor es la presión atmosférica. Por lo tanto una presión alta de 1020 mb implica buen tiempo y una presión barométrica de 930 mb ocurre durante un huracán clase cuatro. Un barómetro es una buena adquisición para cada hogar, ya que te ayuda a predecir el tiempo. El viento del ciclón incrementa a medida que la presión atmosférica va descendiendo. En un ciclón (en el hemisferio norte) los vientos rotan en contra de las manecillas del reloj y en un anticiclón (en el hemisferio norte) a favor. Una depresión atmosférica y una tormenta son ciclones, la diferencia estriba en que la tormenta tiene una presión atmosférica menor, que genera vientos más fuertes. Abajo mostramos la escala de intensidad de los ciclones del Océano Atlántico.

Tabla 6. Escala Saffir-Simpson para la intensidad de los huracanes.

Intensidad de los Huracanes			
	Presión mb	Vientos MPH	Marejada Ciclónica pies
Depresión	--	<39	--
Tormenta	--	39-73	--
Huracán 1	> 980	74-95	5
Huracán 2	965-980	96-110	8
Huracán 3	945-965	111-130	12
Huracán 4	920-945	131-155	13-18
Huracán 5	< 920	> 155	> 18

Vapor de agua y los cambios en presión atmosférica

La atmósfera está compuesta de gases y aerosoles. Los principales gases son: nitrógeno (78.08%) y oxígeno (20.95%). Estos gases están compuestos de átomos que tienen una masa. La masa del aire es la suma de la masa de la inmensa cantidad de átomos. La masa de la columna de aire es atraída por la masa de la Tierra mediante la fuerza de gravedad, en otras palabras, la columna de aire tiene peso. El peso de la columna de aire (en Newton, N) sobre un área (metros cuadrados, m²) se le conoce como presión atmosférica

El Mundo Físico

(en Pascal, Pa). La unidad atmósfera estándar (atm) es igual a 1.013×10^5 Pa, equivalente a 101.3 kPa o 1013 mb.

El aire contiene en promedio 1% de vapor de agua. El vapor de agua afecta la densidad del aire, ya que ocupa el espacio de las otras moléculas de aire y tenemos menos peso por unidad de volumen. Veamos abajo porque el vapor de agua pesa menos:

Tabla 7. Masa atómica de las moléculas que componen la atmósfera.

Molécula	Masa Atómica	Masa Total
N ₂	14	28
O ₂	16	32
H ₂ O	1 (H)	18

La tabla muestra que la molécula de agua tiene una masa menor que la molécula biatómica de oxígeno y del nitrógeno. Por lo tanto, la fuerza de gravedad sobre una columna de aire, o sea su peso, será menor a medida que incrementa el vapor de agua. Si añadimos a esto que la molécula de agua es muy efectiva en atrapar radiación infrarroja, la columna se expande con el calor, y decrece la densidad por el aumento en temperatura. La ecuación hidrostática nos ayuda a calcular la presión atmosférica: $P = \rho g h$, tal que ρ representa densidad, g la aceleración gravitacional 9.81 m s^{-2} , y h es la altura de la columna. Si usamos una densidad de 1.029 kg m^{-3} , a una temperatura de cero grados Celsius y la columna de aire con una altura de 10,000 m obtenemos un valor de 100,945 Pa ó 1009 mb. La presión atmosférica generalmente se expresa en milibares (mb) y el instrumento para medirlo es el barómetro. Cuando la presión baja más de lo normal, provocado por un aumento en el vapor de agua o en temperatura, decimos que hay una zona de presión baja. Las vaguadas, los ciclones y cualquier mal tiempo en general tienen bajas presiones barométricas ($< 1008 \text{ mb}$). Si la presión aumenta más de lo normal, provocada por un descenso en el vapor de agua o en temperatura, decimos que hay una zona de presión alta ($> 1017 \text{ mb}$). La masa de aire fría y seca detrás de un frente frío generalmente está asociada a una extensa zona de presión alta. Estas últimas representan zonas de buen tiempo. Cuando tenemos una zona de presión alta adyacente a una zona de presión baja generamos un gradiente de presión. La corriente de aire (el viento) se mueve desde el alta hacia la baja presión. Mientras más grande el gradiente mayor serán los vientos. Presiones altas extremas ($> 1027 \text{ mb}$) en el Atlántico pueden generar vientos de galerna (38 MPH). No obstante, los ciclones son los responsables de gradientes de presión extremos que pueden generar vientos de hasta 160 MPH.

La dirección de los vientos se suele indicar con los puntos cardinales **de donde proviene**. Un viento del *Este*, es aquel que proviene de ese punto cardinal. Esto contrasta con las corrientes marinas ya que una corriente del *Este*, es aquella que apunta o se dirige hacia ese punto cardinal.

Efecto o Fuerza de Coriolis

Para entender este concepto, tenemos que hacer un experimento mental. Imaginemos que lanzamos un misil hacia el norte, desde una localidad en el ecuador (Lat. 0°). El lanzador de cohetes está sobre la superficie de la Tierra y **no** está en reposo, debido a la rotación terrestre. El lanzador tiene un componente de velocidad hacia el *Este*, ya que la Tierra gira de *Oeste* a *Este*. Cuando el misil es lanzado, éste se desplaza hacia el *Norte* a la velocidad de disparo, pero al mismo tiempo se desplaza hacia el *Este* con la misma velocidad de la superficie de la Tierra en esa latitud. Inicialmente, el componente de velocidad hacia el *Este* es igual al de la superficie terrestre, donde está localizado el lanzador. En ese momento, el misil parece moverse en línea recta hacia el *Norte*. Pero a medida que avanza hacia latitudes más altas, la velocidad hacia el *Este* de la superficie terrestre se reduce. **La velocidad hacia el *Este* en el ecuador es máxima y se va reduciendo paulatinamente, mientras aumenta el valor de la latitud, hasta reducirse a su valor mínimo en los polos.** El misil como no está atado a la Tierra, mantiene un componente de velocidad *Este*, mayor que el de la superficie terrestre que sobrevuela. Esa diferencia se hace mayor a medida que el misil se sigue moviendo hacia el *Norte*. Todo esto tiene como resultado, **respecto a un marco de referencia atado a la Tierra**, que el misil trace una trayectoria inicial hacia el *Norte* y progresivamente más hacia el *Este*. En resumen, el misil comienza a girar hacia la derecha. Ese giro lo llamamos deflexión o efecto de Coriolis. Para explicar ese cambio en dirección de la velocidad (o sea la aceleración), incluimos en las ecuaciones de fuerza, un término que llamamos fuerza de Coriolis. La fuerza de Coriolis surge porque estamos describiendo la dinámica de un cuerpo que se mueve en un marco de referencia no-inercial, que no está en reposo y es acelerado. En este caso el misil se dispara en el ecuador, pero si hubiésemos disparado de otra latitud norte, el efecto hubiera sido el mismo, una deflexión a la derecha. Si por el contrario, disparamos hacia el *Sur* del ecuador, la deflexión hubiera sido hacia la izquierda. La fuerza de Coriolis cumple siempre las siguientes condiciones:

1. La magnitud de la fuerza es cero en el ecuador y aumenta paulatinamente hasta alcanzar su valor máximo en los Polos.
 2. La fuerza actúa perpendicular a la dirección del movimiento. Provoca deflexión hacia la derecha en el hemisferio Norte y deflexión hacia la izquierda en el hemisferio Sur. Vea la Figura.
 3. Mientras más lento es el movimiento del objeto, más será afectado por la fuerza.
- Esto último, explica porque la fuerza de Coriolis afecta significativamente a las masas de aire y agua, ya que se mueven mucho más lento que un misil. Cuando vemos películas tomadas por satélites de cómo se mueve la masa de aire sobre la Tierra, notamos los muchos giros que hacen las nubes alrededor de las altas o bajas presiones atmosféricas. Se observan vórtices de variadas escalas de tamaño. La rotación de los vientos alrededor de una presión alta son a favor de las manecillas del reloj, y en sentido contrario para una presión baja. En el hemisferio sur una presión alta rota en contra de las manecillas del reloj, y una baja a favor.

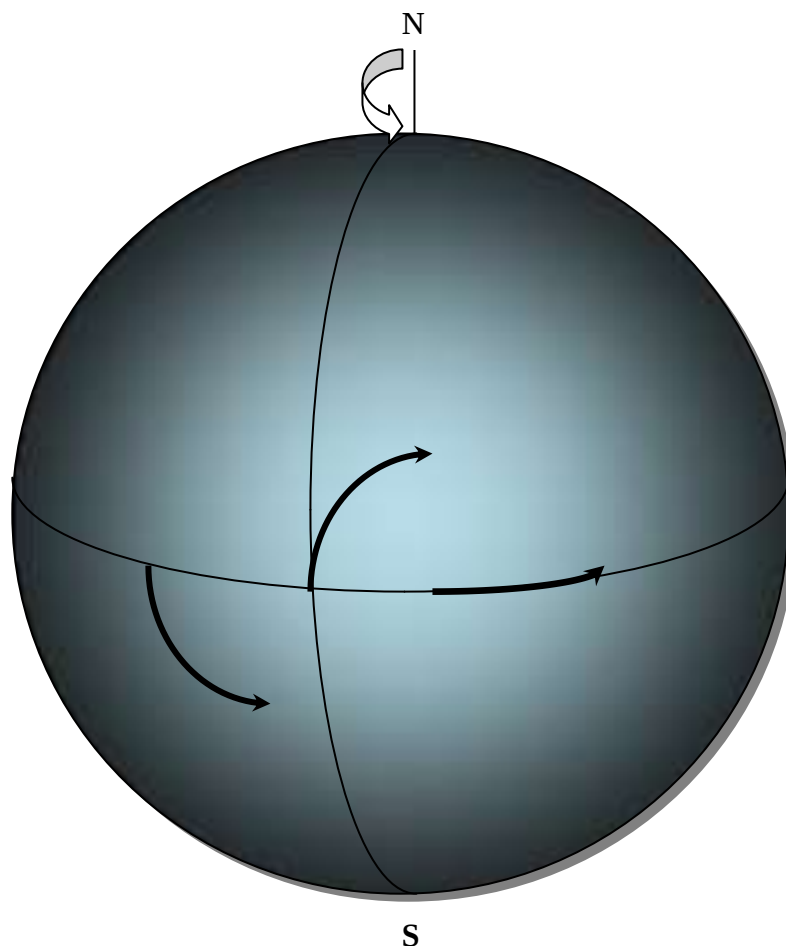


Figura 17. La deflexión de Coriolis es a la derecha en el hemisferio norte, a la izquierda en el hemisferio sur y no hay deflexión si se desplaza a lo largo del ecuador.

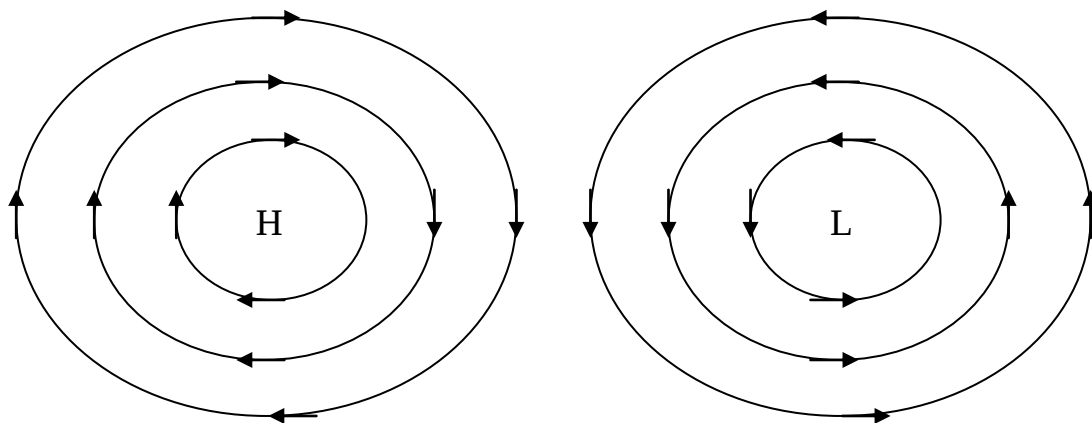


Figura 18. En el hemisferio norte una zona de presión alta (H) presenta vientos que giran a favor de las manecillas del reloj. En una zona de presión baja (L) los vientos giran en contra de las manecillas del reloj. En el hemisferio sur es en sentido contrario a lo que vemos arriba.

¿Por qué el Cielo es Azul y las Nubes Blancas?

Las moléculas de nitrógeno y oxígeno son mucho más pequeñas que el largo de onda de la luz visible ($400 \text{ nm} \leq \lambda \leq 700 \text{ nm}$), por lo tanto pueden difundir con facilidad la luz. La intensidad de la difusión, I , obedece la ley de difusión de Rayleigh:

$$I_{\text{difusion}} \propto \frac{1}{\lambda^4}$$

la difusión es inversamente proporcional a la cuarta potencia del largo de onda. Esto quiere decir que la luz azul de 450 nm se difunde seis veces más que la luz roja de 700 nm. Eso explica porque el cielo despejado se ve de color azul. Abajo lo demostramos.

$$I_{\text{difusionazul}} \propto \frac{1}{\lambda^4} = \frac{1}{(450\text{nm})^4} = \frac{1}{4.1 \times 10^{10} \text{ nm}} = 2.44 \times 10^{-11} \text{ nm}^{-1}$$

$$I_{\text{difusionrojo}} \propto \frac{1}{\lambda^4} = \frac{1}{(700\text{nm})^4} = \frac{1}{2.4 \times 10^{11} \text{ nm}} = 4.16 \times 10^{-12} \text{ nm}^{-1}$$

$$\frac{I_{\text{difusionazul}}}{I_{\text{difusionrojo}}} = \frac{2.44 \times 10^{-11} \text{ nm}^{-1}}{4.16 \times 10^{-12} \text{ nm}^{-1}} = 5.77$$

Las nubes están compuestas de gotas de agua que son más grandes que las moléculas de nitrógeno y oxígeno. Por lo tanto no ocurre difusión de Rayleigh y reflejan todos los largos de onda de la luz visible, en otras palabras la luz blanca. Por eso cuando hay mucha luz, las nubes son de color blanco. Cuando hay escasez de luz, las nubes reflejan menos luz blanca y se oscurecen, especialmente en la parte inferior de la nube.

Características de la Transmisión Promedio de la Atmósfera

La irradiancia que recibimos del Sol (flujo de energía solar total) fuera de la atmósfera prácticamente es constante. Nos referimos a ella como la Constante Solar y tiene un valor de 1370 W m^{-2} . Es útil separar en partidas de un presupuesto, la energía total que recibimos del Sol. Esto nos permite entender mejor el rol de la atmósfera en los procesos terrestres.

Tabla 8. Presupuesto de la energía total del Sol que recibe el planeta Tierra.

		Absorbido	Reflejado	
Albedo		0%	30%	
Atmósfera	Gases y polvo	16%	6%	
	Nubes	3%	20%	
	Subtotal	19%	26%	
Superficie		51%	4%	
	Total	70%	30%	100%

El Mundo Físico

La superficie de la Tierra, incluyendo a los océanos, absorbe más energía que la atmósfera. Los dos juntos absorben el 70% de la energía del Sol, y el restante 30% es reflejado al espacio. Este último componente se conoce como el albedo terrestre. A medida que incrementamos los gases de efecto invernadero en la atmósfera aumentará la absorción de radiación a un valor mayor que el actual de 16%. En la primera semana de mayo y de agosto, es cuando la irradiancia solar en la superficie es máxima, para la latitud de Puerto Rico. Debido a que en agosto la cubierta de nubes es mucho mayor que en mayo, los valores de irradiancia mayores son registrados en mayo, con 380 W m^{-2} .

La Hidrosfera

El Ciclo del Agua Global

Las antiquísimas moléculas de agua (H_2O) vienen realizando un viaje interminable a través de la atmósfera, la biosfera, la litosfera y la hidrosfera, al que conocemos como **ciclo hidrológico**. La mejor forma de entenderlo es haciendo el viaje. Veamos, durante un caliente día de verano en el Este de África Tropical, la evaporación y transpiración de las plantas libera una gran cantidad de vapor de agua a la atmósfera. El vapor de agua y las nubes, formadas por la acumulación de gotitas de agua, son transportados por los vientos alisios. Durante ese trayecto parte de las moléculas de agua regresan a la tierra

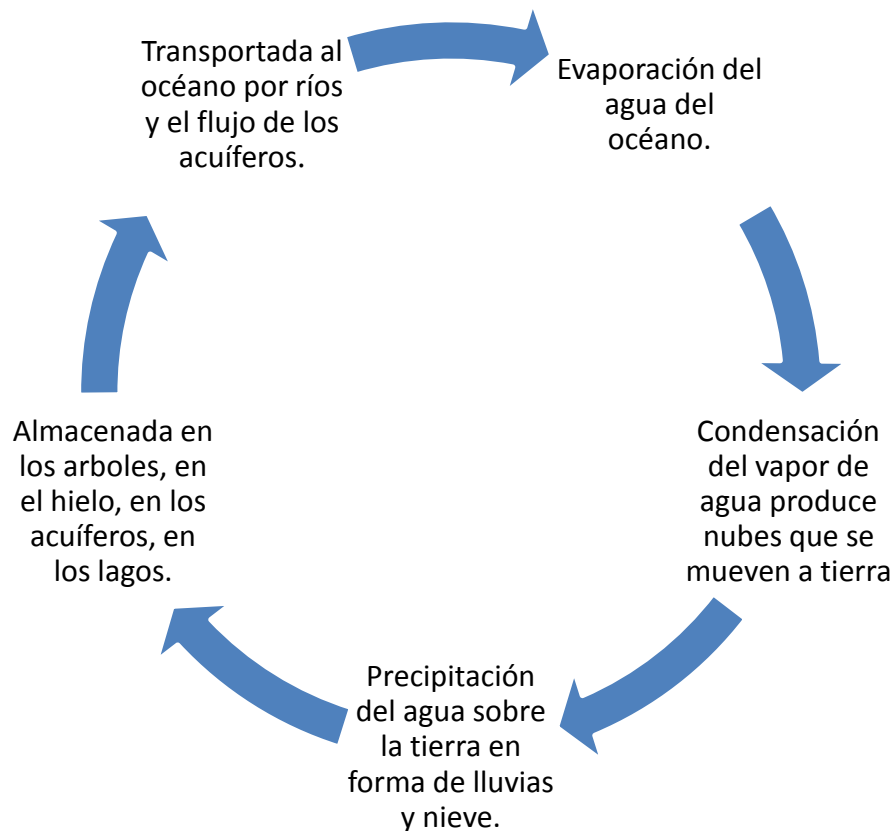


Figura 19. Representación del Ciclo Hidrológico.

por la precipitación, pero otra parte cruza África hasta alcanzar las Islas de Cabo Verde en el Atlántico Tropical. En el océano la evaporación es mayor que la precipitación, y por lo tanto, aumenta el vapor de agua y las nubes. El aumento en vapor de agua provoca un descenso en la presión barométrica y se forma una onda tropical. La onda se

El Mundo Físico

desplaza hacia el oeste y aumenta su extensión y la altura de las nubes debido a que se desplaza sobre aguas más cálidas, con temperaturas mayores de 27 C (79° F). En poco tiempo la presión baja desarrolla su propia circulación, se forma un ciclón tropical. El vapor de agua y las nubes se elevan hasta alcanzar el tope de la troposfera. El ciclón tropical cobra intensidad, convirtiéndose en huracán. El huracán entra a Puerto Rico y en dos días deja una precipitación de 25 pulgadas. Hay crecidas en los ríos y quebradas provocando inundaciones. Los ríos desbordados transportan gran cantidad de agua de vuelta al océano. Una pequeñísima parte del agua se queda almacenada en los árboles, plantas, lagos, sedimentos y acuíferos de Puerto Rico. La mayoría del agua regresa al océano. Al día siguiente tenemos un cielo despejado y el Sol comienza a calentar, las plantas y árboles comienzan a liberar gran cantidad de vapor de agua a la atmósfera. Así hemos completado el ciclo hidrológico. En el Océano Global la evaporación sobrepasa a la precipitación, y sobre tierra la precipitación es mayor que la evaporación. Los ríos y el flujo subterráneo del agua son los responsables de retornar el agua al Océano Global.

En Puerto Rico la climatología de la precipitación presenta dos temporadas. La temporada de sequía, que comprende los meses de enero, febrero, marzo y abril; y la temporada de lluvias que son los restantes meses (Vea Figura). Las ondas tropicales que salen de África son responsables de gran parte de la precipitación durante la temporada de lluvias. Históricamente agosto y septiembre son los meses de embates de huracanes en Puerto Rico. Un huracán puede aumentar la precipitación hasta en 30 pulgadas de lluvia.

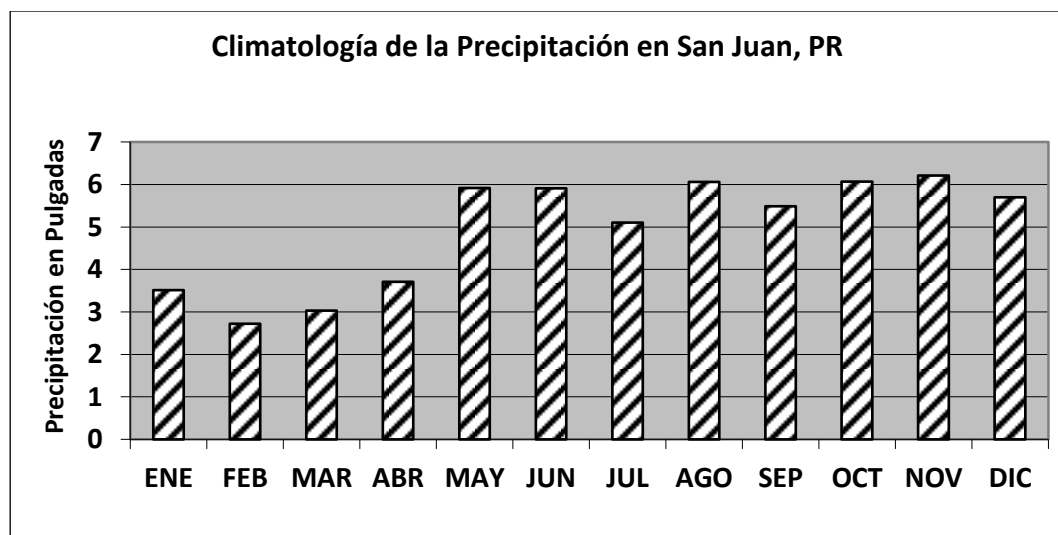


Figura 20. Climatología de la Precipitación en San Juan, Puerto Rico. El registro de datos comprende desde el 1/1/1955 hasta el 5/31/1977. A partir de mayo comienza la temporada de lluvias. La gráfica fue preparada con datos disponibles de la página web del *National Weather Service*.

Distribución del Agua en el Planeta Tierra

La hidrosfera es toda el agua líquida en el Sistema Terrestre, y cubre el 73% de la superficie terrestre. Consiste en su mayoría en océanos y mares (97.6%), y el restante es agua dulce (2.4%). El agua dulce se reparte en su mayoría en forma de hielo (78.5%), almacenada en los casquetes polares y Groenlandia. El agua en ríos, arroyos y lagos representa tan solo el 0.8% del agua dulce. Ese último valor, revela lo limitada que es la disponibilidad de agua para el consumo humano y la importancia de conservarla limpia.

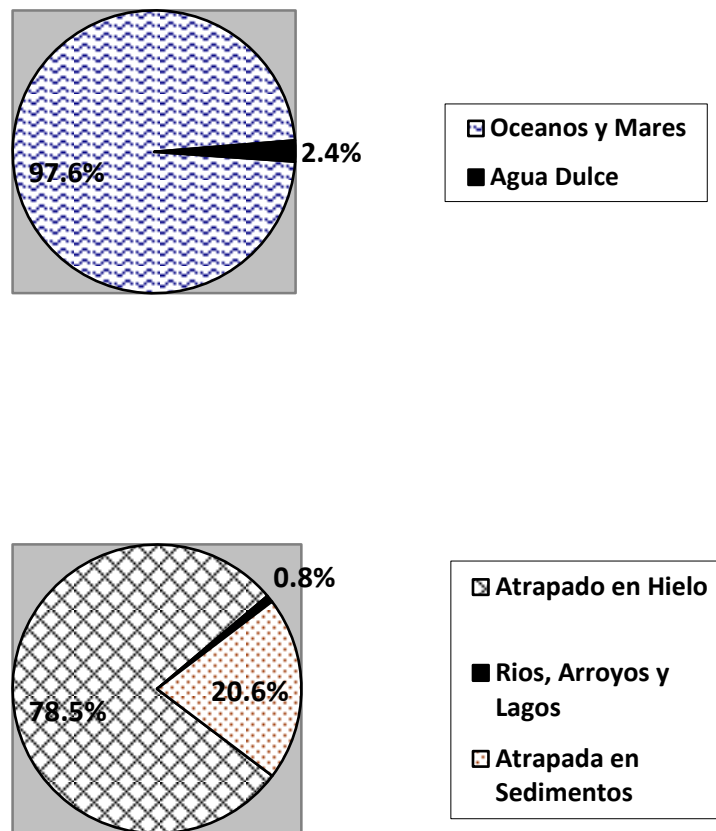


Figura 21. Arriba. Distribución de toda el agua del planeta Tierra. Abajo. Distribución de toda el agua dulce en la Tierra.

El Océano Global

Dedicaremos esta lectura a estudiar el Océano Global, componente principal de la hidrosfera. Imágenes tomadas por satélites en órbitas suficientemente alejadas (geoestacionarias) para tener una visión completa del Planeta, tal como la que proveen la constelación de satélites meteorológicos GOES de NOAA, revelan claramente un solo océano que conecta todas las costas del mundo. La mayor parte de su superficie está localizada en el hemisferio sur. A esa gran masa de agua la llamamos el Océano Global. Previo al siglo XX no sabíamos que había un Océano Global. Esta nueva forma de ver el océano es reciente, ya que avances en la tecnología aeronáutica y espacial de finales del siglo XX facilitaron esta nueva perspectiva. Esto no fue siempre así, el descubrimiento de los cuatro océanos ocurrió lentamente, como lo demuestra la historia de la conquista europea de las nuevas posesiones transoceánicas. La cartografía del océano Atlántico se la debemos a los viajes de los españoles y portugueses al Nuevo Mundo. Estos últimos fueron los primeros europeos en navegar el océano Índico y llegar a la India. Balboa fue el primer europeo que vio el océano Pacífico en el siglo XVI. En la década del 1960, los submarinos de Estados Unidos fueron los primeros en cruzar el Océano Ártico por debajo del hielo. Avances en navegación, cartografía, oceanografía y aeronáutica en los últimos 500 años le han permitido al Ser Humano descubrir y describir el Océano Global.

El radio ecuatorial de la Tierra R_E es 6378 km. Si asumimos que la Tierra es una esfera, podemos calcular su área superficial, S_E .

$$S_E = 4\pi R_E^2 = 4\pi (6378 \text{ km})^2 = 12.56 (40678884 \text{ km}^2) = 510,926,783 \text{ km}^2$$

De esos 511 millones, hay 361 millones de kilómetros cuadrados de Océano Global. O sea, 71% de la superficie de nuestro planeta. Entonces, casi tres cuartas partes de nuestro planeta es océano. Por lo tanto, en vez de referirnos a nuestro planeta como Planeta Tierra, deberíamos llamarlo Planeta Océano. La profundidad promedio es 4 km, pero hay lugares donde puede alcanzar hasta 11 km, tal como en el caso de la Trincheras de las Islas Marianas en el Océano Pacífico. Otra trinchera importante se encuentra al norte de Puerto Rico donde la profundidad es de 10 km, que equivale a 32,488 pies. Para tener una noción de la escala, veamos si la altura de la montaña del Yunque es cerca de 4,000 pies, esto quiere decir que la trinchera puede contener hasta; ¡Ocho Yunque uno puesto sobre el otro! No obstante, el océano es más ancho que profundo. Veamos, el Océano Pacífico tiene una anchura de 13,000 km y una profundidad promedio de 4 km, si hacemos una razón matemática entre estas dos cantidades obtenemos, que

$$\frac{13000 \text{ km}}{4 \text{ km}} = 3250$$

es 3250 veces más ancho que profundo. Existen cuatro océanos cartografiados, estos son el: Pacífico, Atlántico, Índico, Ártico, en orden descendente de extensión. En la tabla se muestran sus respectivas dimensiones.

El Mundo Físico

Tabla 9. Dimensión y estructura de los océanos. Referencia: *Oceanography: An Introduction to Planet Oceanus*, Paul. R. Pinet .

Océano	Área de superficie (10 ⁶ km ²)	Volumen de agua (10 ⁶ km ³)	Profundidad promedio (km)	Profundidad máxima (km)	Área de Islas 10 ⁶ km ²
Pacífico	180	700	4.2	11.0	3.9
Atlántico	93	335	3.6	9.2	1.0
Índico	77	285	3.7	7.5	0.8
Ártico	15	17	1.1	5.2	3.8

El área de superficie y el volumen del océano Pacífico es casi el doble del Atlántico. También podemos inferir de la tabla que el número de islas es 3 veces mayor. Si promediamos la profundidad de los tres principales océanos obtenemos 3.83 km.

Corrientes oceánicas transportan el agua y todo lo que hay en ella a todas partes del Planeta. Lo que tú lances al océano puede llegar a cualquier costa del mundo, si le das el tiempo necesario. La contaminación del océano en cualquier parte del mundo nos afecta a todos por igual. Por último, el tsunami que ocurrió el 24 de diciembre del 2005 en el océano Índico no solo afectó trágicamente a los países de esa cuenca, sino que su energía se propagó por todo el Océano Global, incluso llegando a PR; claro que la ola sólo tenía unos pocos centímetros cuando fue detectada por el mareógrafo de Isla Magueyes en Lajas.

Corrientes Oceánicas

El Sol irradia diferencialmente la superficie esférica de la Tierra (tierra + océano) con radiación de onda corta (UV y luz visible 300-700 nm). La energía es reflejada como onda larga (infrarroja), y pasa a la atmósfera. La radiación infrarroja es absorbida por el vapor de agua, gotas de agua y los gases de efecto invernadero tales como, el dióxido de carbono CO₂. Las diferencias latitudinales en el calor absorbido por la atmósfera, generan cambios en densidad y presión atmosférica. El gradiente de presión atmosférica genera los vientos globales. Estos vientos sirven como mecanismos para transferir energía cinética de la atmósfera a la hidrosfera. Los vientos ejercen una fuerza de fricción de contacto lateral sobre la superficie del agua (*wind stress*). Probablemente has visto ésta cuando el mar está como un espejo y sopla una brisa leve, se forma una pequeña rugosidad sobre el agua que se conocen como ondas capilares. Estas olas tienen largos menores de 1.7 centímetros y la fuerza restauradora es la misma tensión superficial del agua. Las ondas capilares se superponen constructivamente y generan olas más grandes, en las cuales la fuerza restauradora es la gravedad. Estas olas a su vez se superponen unas con otras, para formar olas de mayor tamaño. Estas olas son capaces de generar una corriente de arrastre (*wave drift*). La rapidez de las corrientes es del orden

El Mundo Físico

de unos pocos milímetros por segundo y pueden alcanzar hasta varios centímetros por segundo. Si el viento sopla a 10 m s^{-1} (cerca de 20 nudos), la rapidez de la corriente solo alcanza un 3% de ese valor, 30 cm s^{-1} (0.6 nudos). Veamos como se transfiere la energía cinética entre las capas superficiales y las interiores. La transferencia del *momentum* (producto de la masa por la velocidad) de las capas superficiales del agua a las capas más profundas, ocurre por medio de turbulencia.

Todo el proceso discutido anteriormente, es responsable en transferir la energía cinética de la atmósfera, al océano. Si este proceso se extiende por varios días y extensiones grandes del mar, es capaz de producir corrientes oceánicas de hasta 200 cm s^{-1} .

Las corrientes oceánicas son el resultado de la interacción de las siguientes fuerzas:

1. Fuerza de fricción por contacto lateral del viento con la superficie del agua (*wind stress*).
2. Fuerza de Coriolis, provocada por la rotación del Planeta.
3. Gradiente de Presión, provocado por diferencias en la altura del océano.
4. Fuerza de fricción y turbulencia en el interior de la masa de agua.

Cada una de estas fuerzas genera diversos tipos de corriente. Por ejemplo, si actúa la fuerza de Coriolis y la fuerza de fricción es despreciable, entonces resulta en la generación de **corrientes inerciales**. En el caso que exista un balance entre el gradiente de presión con la fuerza de Coriolis, se genera una corriente **geostrófica**. La palabra *geos* significa tierra y *trofica* significa giro.

Veamos en detalle como se genera una corriente inercial. Digamos que el viento lleva soplando varios días y de repente éste cesa. Una vez la fuerza de fricción por contacto lateral del viento cesa, la fricción dentro de la propia masa de agua empieza a reducir la rapidez de la corriente, debido que el viento deja de impartir la energía necesaria para mantener la corriente. La corriente se mantiene sólo por la propia inercia del agua. Este periodo de desaceleración puede durar varios días. Si a esto añadimos la fuerza de Coriolis, entonces esta corriente empieza a cambiar su dirección, desviándose en el hemisferio norte hacia la derecha y a la izquierda en el hemisferio sur. La corriente hace un giro completo en un periodo inercial **T**. El periodo dependerá de la latitud Φ a la que se encuentra la corriente.

$$T = \frac{1}{2} \left(\frac{23.9344 \text{ horas}}{\sin \Phi} \right)$$

La fórmula incluye el día sideral terrestre de 23.934 horas. La mitad del día sideral es el día pendular. Para Puerto Rico ($\Phi=18^\circ\text{N}$), el periodo inercial **T** es 38.73 horas, en cambio en New Jersey ($\Phi=40^\circ\text{N}$), el periodo inercial es de 18.62 horas. A una latitud de 30° N , el periodo inercial es de 24 horas, que es el mismo periodo de la marea astronómica diurna.

El Mundo Físico

La superficie del océano muestra topografía, unas partes están más elevadas que otras. En el centro del Atlántico Norte la superficie está elevada hasta por medio metro relativo a sus márgenes occidental y oriental. Este levantamiento del agua produce un gradiente de presión que es capaz de generar una corriente pendiente abajo, pero es contrarrestada por la fuerza de Coriolis. Esto obliga a la corriente a girar a la derecha en el hemisferio norte y en vez de girar pendiente abajo, mantiene una trayectoria a lo largo de la isobara (línea de igual presión). Por lo tanto las corrientes giran en trayectorias concéntricas alrededor del área elevada. Esto ocurre de manera similar en la atmósfera. Por eso los vientos giran a favor de las manecillas del reloj alrededor de una alta presión atmosférica en el hemisferio norte y de manera contraria en el hemisferio sur.

Un ejemplo de corrientes geostróficas es la Circulación Subtropical del Atlántico Norte y es el sistema de corrientes más cercano a Puerto Rico. Está formado por las siguientes corrientes:

1. Corriente Ecuatorial del Norte.
2. Corriente del Caribe
3. Corriente del lazo
4. Corriente de la Florida
5. Corriente del Golfo
6. Corriente de las Azores
7. Corriente de las Canarias

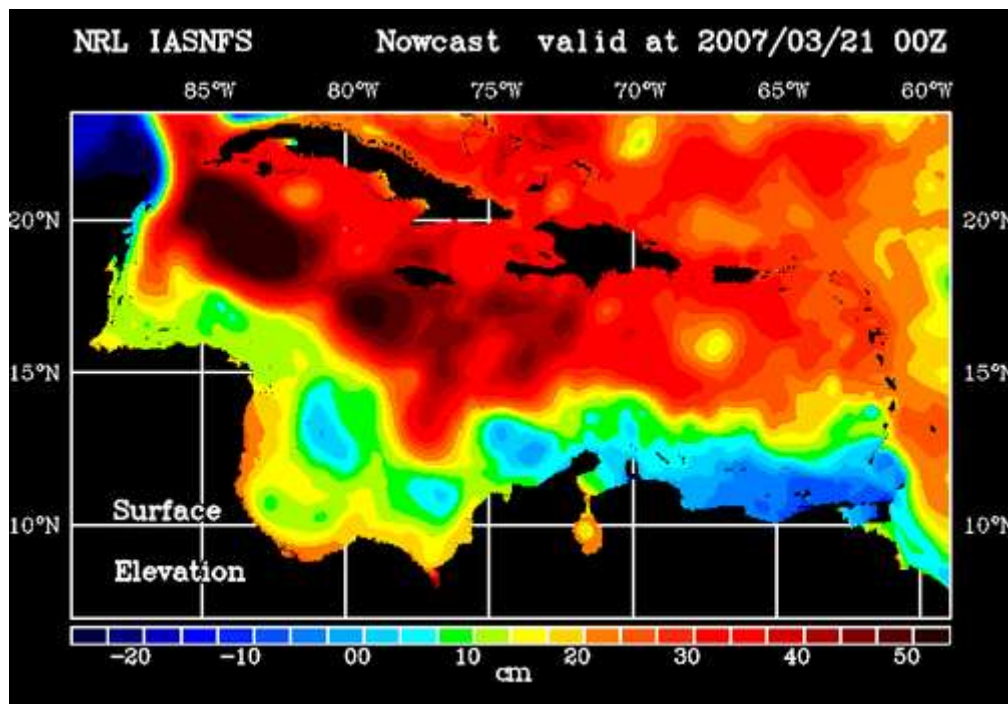


Figura 22. Topografía del Mar Caribe el 21 de marzo del 2007 simulada por un modelo numérico. La diferencia en elevación de la superficie del Mar Caribe al Sur de Cuba y al Norte de Venezuela es un poco más de medio metro. Cortesía de: *Naval Research Laboratory/IASNFS*.

Las Mareas

El sistema binario Tierra-Luna se mantiene por una fuerza fundamental y que muchos menospreciamos, la gravedad. Esta fuerza se manifiesta vigorosamente entre objetos que poseen una masa extrema. Esta fuerza es directamente proporcional al **producto de las masas** e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa. Se resume en la Ley de Gravitación Universal formulada por Sir Isaac Newton,

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

$$G = 6.67 \times 10^{-11} \frac{N \cdot m^2}{kg^2}$$

La masa del ser humano (54 kg) es tan pequeña, que entre nosotros no sentimos esa fuerza (Ej. 1.945×10^{-7} N). Pero sí experimentamos la fuerza de gravedad que ejerce la Tierra sobre nosotros, a la que conocemos como peso. Esta vez, la masa de la Tierra es enorme, 5.974×10^{24} kg (81 veces la masa de la Luna), y por tanto, el producto (resultado de la multiplicación) de la masa terrestre y la masa humana es un número enorme. Para una persona de 54 kg, equivale a una fuerza igual a 529 N ó 120 lb. Esta fuerza es 2.7 billones mayor que la fuerza de gravedad entre dos humanos. Algunos humanos desafían inútilmente la fuerza gravitatoria, dando grandes saltos pero no tienen mucho éxito, ya que la Tierra los vuelve atraer a su centro. Los astronautas que fueron a la Luna son los únicos que han podido vencer la gravedad terrestre, o más bien, la han cambiado por la de nuestro satélite natural. La gravedad lunar es una sexta parte la terrestre. O sea que si pesas 180 lb., en la Luna tu peso es solo 30 lb. Los astronautas que orbitan la Tierra aún experimentan microgravedad. Ese ambiente no es saludable, ya que nuestro cuerpo se deteriora (osteoporosis, enfermedad renal, enfermedades coronarias, hipotrofia, etc.), aparte de una sensación constante de náuseas. Una forma de imaginarlo, es como un ascensor que nunca deja de caer. Los cosmonautas rusos han estado más de un año en microgravedad, y estoy seguro, que aprecian la gravedad terrestre mucho más que nosotros.

El sistema Tierra-Luna es anormal relativo a los otros planetas del Sistema Solar. La Luna nos queda demasiado grande (vea discusión en la lectura titulada: *Un Sistema Anormal*). La Luna ejerce una fuerza considerable sobre la Tierra. Dado que nuestro planeta es 72% agua, esa fuerza se manifiesta fácilmente, al interactuar con un fluido tan grande como el Océano Global. Esa manifestación se conoce como la **marea astronómica**. Primero definamos que es la **marea**. La forma más simple de definirla es como el levantamiento y descenso vertical de la superficie del agua. Este movimiento vertical puede ser producido por la interacción gravitacional entre la Luna, la Tierra y el Sol, y también por cambios en presión atmosférica. La primera se conoce como marea astronómica y la segunda como **marea atmosférica**. La marea atmosférica producida

El Mundo Físico

por un huracán se conoce como marea ciclónica. Ésta última, responde al fenómeno del barómetro invertido. A menor presión atmosférica, mayor la altura del nivel de agua. Esto sin contar el efecto del oleaje producido por el viento huracanado.

La marea astronómica es un fenómeno cíclico o repetitivo. ya que los cuerpos celestes que la producen, orbitan o rotan con un periodo específico. Eso se traduce en cambios periódicos en la fuerza de gravedad que ejerce la Luna y el Sol sobre la Tierra y por ende en los océanos. Por eso tenemos que una marea alta, baja o cualquier otra fase particular, puede repetirse con variadas periodicidades. Periodos cortos comunes son 12 horas con 25 minutos (semidiurno) y 24 horas con 50 minutos (diurno). El periodo diurno de la marea es el tiempo necesario para que la rotación terrestre permita que la Luna aparezca en la misma posición en el cielo. El periodo semidiurno es la mitad de ese periodo. Los 50 minutos adicionales se deben a que la Luna, cada día, se desplaza hacia el *Este*, unos 12.53° ; siguiendo su órbita alrededor del baricentro, por lo tanto a la Tierra le toma ese tiempo adicional en rotar para que la veamos en la misma posición en el cielo. Si divides 360 grados entre 12.5 grados por día, aproximamos el periodo sinódico, 28.8 días. También hay un periodo largo bisemanal de 14 días, equivalente a la mitad del periodo sinódico. Esta oscilación de la marea se debe a que la Luna, el Sol y la Tierra están alineados entre sí cada 14 días. Esto corresponde a la fase de luna nueva y luna llena. Durante ese momento tenemos el rango máximo en altura de marea. El **rango** es la diferencia en altura entre la marea alta y baja. A estas mareas extremas se les conoce como **mareas vivas** (*spring tides*). En cambio, cuando los tres cuerpos celestes forman un ángulo de noventa grados (cuadratura) tenemos las **mareas muertas** (*neap tides*). Las mareas muertas corresponden al rango mínimo en la altura. La fuerza que ejerce el Sol es la mitad de la que ejerce la Luna debido a su gran distancia, por lo tanto la Luna tiene un rol principal en modular la marea. Cambios en la distancia de la Luna (apogeo y perigeo) y en la declinación lunar afectan el carácter de las mareas. En lugares como el sur de PR, donde la marea es predominantemente diurna, hay que tomar en cuenta a la declinación lunar como un factor principal para determinar las mareas vivas. Cuando la declinación lunar se va acercando a 18° N (Lat. de PR), las mareas en el sur pueden ser vivas. ¡Incluso cuando la Luna no esta alineada con el Sol!

El análisis armónico de un registro mareal de cualquier localidad por 18.6 años, puede revelar con mucha confiabilidad, decenas de constituyentes armónicos. Una vez conocido el periodo, amplitud y fase de cada constituyente podemos predecir la marea astronómica en ese lugar con bastante confianza. Esto es precisamente lo que hacen los mareógrafos de NOAA alrededor de Puerto Rico. La grafica de los datos de altura del nivel de agua registrados por el instrumento, consiste en una curva armónica compleja. Se utilizan métodos matemáticos para descomponerla en curvas armónicas simples, o sea en sus constituyentes. La recombinación de una decena de constituyentes es suficiente para generar un modelo para la predicción de la marea en ese lugar. En algunos lugares fuera de Puerto Rico, tales como en estuarios y bahías de gran complejidad, se necesitan hasta 65 constituyentes. Cada constituyente es una función

El Mundo Físico

seno a la que se le asigna una amplitud, periodo y fase. Estas tres cantidades se conocen como las constantes armónicas.

La altura de marea, para la Bahía de San Juan y para La Parguera, se ha registrado por más de 30 años y pueden verse en tiempo real visitando la página en Internet de NOAA o de NOS (*National Ocean Service*). Uno de los primeros registros de marea en PR se hizo en la primera década del siglo XX en la Bahía de Guánica. La marea en el norte de PR tienen un carácter mixto dominando el periodo semidiurno (ver Figura), esto quiere decir que entre la marea alta y baja transcurren 6 horas, y necesitamos 6 horas adicionales para la próxima alta. En el sur de PR la marea es de carácter diurno, o sea, vemos solo una alta o una baja cada día. En la Bahía de Mayagüez la marea es de carácter mixto. Si la marea en el norte de PR es mixta dominando la semidiurna y la del sur es diurna, entonces el reporte de mareas basado en el mareógrafo de la Bahía de San Juan, que es el que aparece en los medios de comunicación, no sirve para la costa sur de PR.

Una forma matemática de describir el tipo de marea es creando una razón entre la suma de las amplitudes de los constituyentes diurnos ($O1 + K1$) y los constituyentes semidiurnos ($M2 + S2$). A esta razón la conocemos como la razón de forma F (*Form Ratio*)

$$F = \frac{(O1 + K1)}{(M2 + S2)}$$

Si F es menor de 0.25, la marea es de tipo semidiurno, si F se encuentra entre .25 y 1.5 la marea es de tipo mixta dominando la semidiurna. Si F se encuentra entre 1.5 y 3 la marea es de tipo mixta dominando la diurna y si F es mayor de 3 la marea es de tipo diurno.

Tabla 10. Razón de forma y amplitud de los constituyentes de la marea barotrópica en PR y en las Islas Vírgenes.

Localidad	Razón de Forma	M2	S2	K1	O1
Aguadilla	0.67	0.51	0.089	0.219	0.182
San Juan	0.93	0.522	0.069	0.295	0.253
Culebra	1.21	0.331	0.046	0.259	0.197
Vieques	3.40	0.092	0.047	0.269	0.203
Mona	5.42	0.05	0.045	0.303	0.212
Magueyes	7.00	0.025	0.038	0.261	0.18
Charlotte Amalie, VI	2.81	0.137	0.028	0.264	0.199
Christiansted Harbor, St. Croix	3.09	0.115	0.036	0.269	0.197
Lameshur Bay, St. John	2.28	0.178	0.03	0.278	0.197

El Mundo Físico

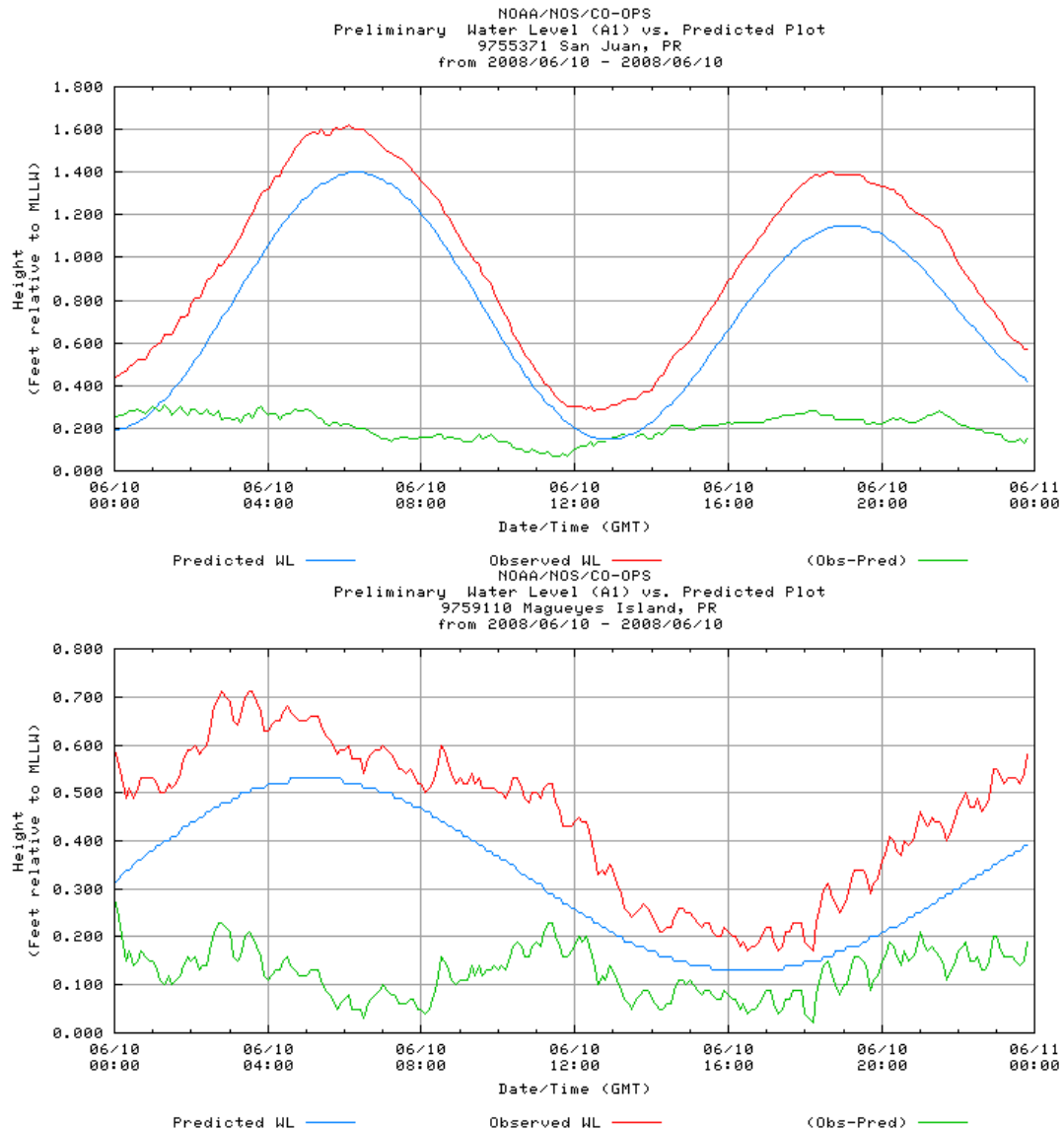


Figura 23. Registro de la altura de la marea en el puerto de San Juan muestra que su carácter dominante es el semidiurno (periodo 12.4 horas). Abajo, la marea registrada en Isla Magueyes al Sur de Puerto Rico muestra que su carácter es diurno (periodo aproximadamente 24 horas). Gráficas son cortesía de NOAA/NOS/CO-OPS.

El movimiento vertical de las aguas debido a la marea, requiere que se acumule o rebaje la cantidad de agua en ese lugar. Por lo tanto, necesitamos mover agua hacia dentro o hacia afuera de ese lugar. Esta corriente horizontal de agua se conoce como la **corriente mareal**. La corriente mareal tiene la misma periodicidad que la marea astronómica. O sea que una corriente semidiurna responde a una marea semidiurna. La magnitud de la corriente mareal comienza a incrementar a partir del descenso de la marea alta y alcanza su valor máximo cuando estamos a medio camino de llegar a marea baja. O sea, que durante el pico de la marea alta y el valle de la marea baja, la velocidad de las corrientes

El Mundo Físico

es mínima. Sucede lo mismo, cuando partimos de una marea baja hacia una marea alta. La magnitud de una corriente mareal en PR suele estar por debajo de los 10 cm/s, en aguas llanas y protegidas del viento. Aunque corrientes de 50 cm/s se han registrado como eventos

Las mareas es un ejemplo de cómo la hidrosfera afecta a la biosfera. Organismos en la zona inter-mareal, en los mangles, planicie mareal y estuarios dependen de ella. También en el arrecife de coral muchos de los periodos reproductivos están sincronizados con las mareas.

Cambio en la Fuerza Mareal

La fuerza de la marea cuando la Luna se encuentra justo encima de un punto en la Tierra esta dado aproximadamente por

$$F \approx G \frac{M_T M_L 2R_T}{r^3}$$

$$G = 6.67 \times 10^{-11} \frac{N \cdot m^2}{kg^2}$$

M_T es la masa de la Tierra, 5.974×10^{24} kg; y M_L es la masa de la Luna 7.35×10^{22} kg. R_T es el radio de la Tierra 6.378×10^6 m y r es la distancia que separa los centros de la Tierra y la Luna. La fuerza expresada en newton es igual a 6.51×10^{17} N. La fuerza que ejerce la Tierra sobre un ser humano es un poco más de 500 N. La fuerza mareal por unidad de masa o sea la aceleración es de $1.096 \times 10^{-7} \text{ m s}^{-2}$. La aceleración gravitacional (9.81 m s^{-2}) es 8.95×10^7 mayor que la aceleración provocada por la fuerza mareal.

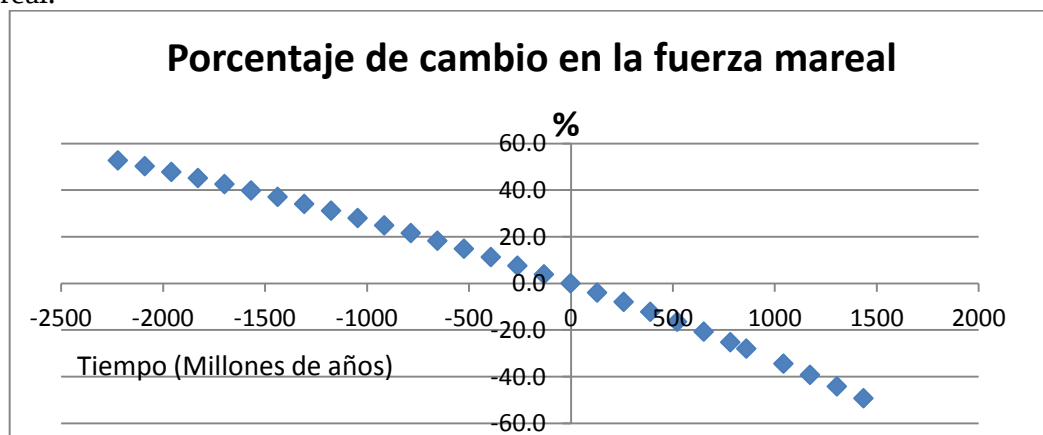


Figura 24. Porcentaje de cambio en la fuerza que genera la marea en la Tierra a lo largo de millones de años en el pasado (valores negativos) y en el futuro (valores positivos). Note que la fuerza se reduce más rápidamente en el tiempo futuro.

El Mundo Físico

Pero la fuerza mareal calculada arriba, es para la actual distancia entre los cuerpos. La Luna se aleja de la Tierra a una razón de 3.83 cm por año. Esto parece poco comparado con la distancia r que separa a los dos cuerpos, 3.85×10^8 m. Pero a lo largo de millones de años representa un cambio considerable en la distancia. En 1044 millones representaría un cambio de 40,000 km. La fórmula muestra que la fuerza es inversamente proporcional al cubo de la distancia r , los cambios en distancia de ese orden provocan cambios grandes en la fuerza mareal. O sea que hace 1044 millones de años en el pasado la fuerza que genera la marea era 9.05×10^{17} N, un 28% más fuerte que la actual (Figura). Para reducir la fuerza actual por esa misma magnitud, tienen que pasar 862 millones de años en el futuro.

La tercera Ley de Kepler (ley armónica) establece una relación directa entre el radio orbital a y el periodo orbital P , dado por,

$$P^2 = \frac{4\pi^2 a^3}{G(M_T + M_L)}$$

$$G = 6.67 \times 10^{-11} \frac{N \cdot m^2}{kg^2}$$

donde M_T es la masa de la Tierra, 5.974×10^{24} kg; y M_L es la masa de la Luna 7.35×10^{22} kg. Para un radio orbital igual a 3.85×10^8 m obtenemos un periodo orbital sideral igual a 27.3 días. De nuevo la distancia que separa la Tierra y la Luna no es la misma siempre, por lo tanto hace 1044 millones de años, el periodo orbital era de unos 23.21 días (Figura). De aquí a 862 millones de años en el futuro, obtenemos 31 días.

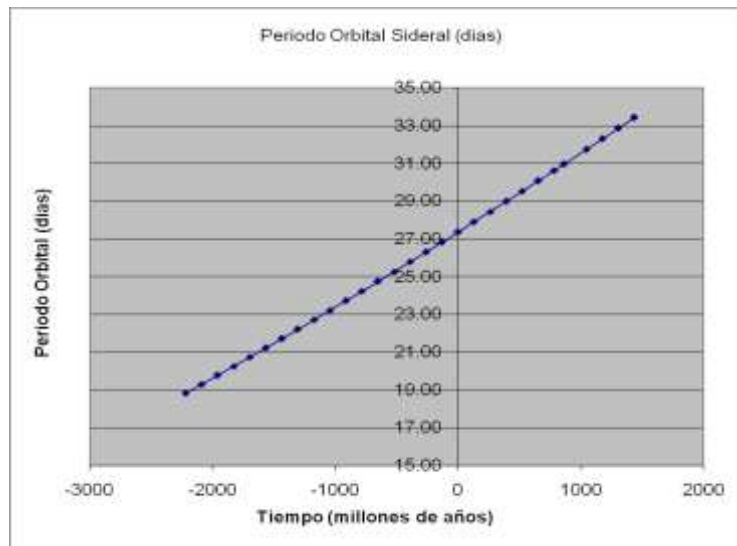


Figura 25 Periodo sideral de rotación de la Luna a lo largo de millones de años en el pasado y en el futuro.

La Marea Interna

La marea interna es una ola submarina que se propaga a lo largo de una discontinuidad en densidad y que puede tener una longitud de onda desde 30 km hasta 100 km. Una longitud de onda es la distancia que separa a las dos crestas. La altura de la marea interna puede oscilar entre 10 m (33 pies) hasta 200 m (656 pies). Esto la hace una de las olas más largas y altas observadas en el Océano. El periodo de oscilación de la onda es principalmente semidiurno, o sea, que transcurre un periodo de 12 horas entre el arribo de cada cresta. Dado que la distancia L que se recorre son 30 km, en un tiempo T igual a 12 horas, la celeridad C de la ola estaría dada por

$$C = \frac{L}{T} = \frac{30 \text{ km}}{12 \text{ h}} = 2.5 \text{ km h}^{-1}$$

Esto quiere decir que la velocidad de fase de la ola es tan solo de 1.6 MPH. La ola es súper lenta si la comparamos con las olas de superficie.

Las corrientes de la marea de superficie en el océano profundo oscilan principalmente con un periodo semidiurno. Debido a que ésta periodicidad es análoga a la observada en la ola submarina, se le conoce como marea interna. Una diferencia fundamental entre la marea interna y la marea de superficie es que las corrientes de la marea de superficie son a groso modo uniformes con profundidad, en cambio, las corrientes generadas por la marea interna cambian marcadamente con profundidad.

Marea interna diurna con un periodo de 24 horas han sido registradas por instrumentos en la franja de océano entre el norte de Puerto Rico y el Sur de la Isla de Bermuda. También han sido registradas por instrumentos en el área de Punta Tuna en Maunabo.

Generación de la Marea Interna

La relación entre la marea de superficie y la marea interna es una estrecha, ya que una genera a la otra. El océano no es homogéneo, sino que está estratificado verticalmente en capas de diferente densidad. Cuando las corrientes de la marea de superficie, chocan con las pendientes submarinas, o pasan perpendicularmente a lo largo de un umbral (levantamiento) o cañón submarino, alteran su dirección y pueden empujar y poner a oscilar a la interface de las dos capas de diferente densidad; entonces se genera la marea interna.

En las aguas tropicales existe una zona donde el cambio en densidad con profundidad es máximo y se conoce como el picnoclino. Cuando una corriente barotrópica asciende siguiendo la pendiente submarina puede empujar el picnoclino verticalmente y crear oscilaciones de relajación. La gran diferencia en densidad en el picnoclino, permite que la marea interna alcance una mayor energía.

El Mundo Físico

Las islas y cordilleras submarinas son lugares idóneos para la generación de la marea interna, ya que las corrientes de la marea de superficie, chocan perpendicularmente con éstas y facilitan así su generación. En cambio, en las plataformas continentales las corrientes se mueven paralelo a éstas. Sólo cuando las corrientes interactúan con cañones submarinos a lo largo de la plataforma, es posible que se desarrolle la marea interna. Por lo tanto las islas son uno de los focos de generación más importantes. Puerto Rico siendo una isla con una topografía submarina extrema, se convierte en un lugar excelente para estudiar este tipo de fenómeno. Los oceanógrafos del Departamento de Ciencias Marinas, vienen estudiando de hace años la marea interna alrededor de Puerto Rico, en particular en el Canal de Mona. En el Canal de Mona se han detectado una marea interna entre 25 m y 50 m de altura y con largos de onda de 30 km. También se ha detectado en fotos tomadas por astronautas desde las misiones del trasbordador espacial. Se ha encontrado que el área conocida como El Pichincho (localidad famosa por la pesca de marlin) es un foco de generación de la marea interna. La marea de superficie se propaga de norte a sur a lo largo del Canal y choca con el área de El Pichincho. Además, se han detectado saltos hidráulicos de forma cuadrada en el beril (margen exterior de la plataforma insular) de la Bahía de Añasco que pueden representar la generación de la marea interna o el choque de la marea interna con nuestra plataforma.

Turbulencia Generada por la Marea Interna

El gradiente vertical de las velocidades horizontales es una diferencia crucial, que hace a la marea interna, un mecanismo capaz de mezclar el agua en el océano profundo. La marea interna en el picnoclino puede hacerse inestable y romper. Cuando la ola rompe genera turbulencia, que permite la mezcla de aguas de la capa inferior con la capa superior.

En cambio la marea de superficie sólo puede provocar mezcla turbulenta en una capa estrecha pegada al fondo. Esto sólo ocurre en las aguas costeras de las plataformas, pero ese mecanismo no puede explicar la presente estructura térmica y de salinidad del océano.

Al momento, la marea interna es el principal mecanismo capaz de explicar la mezcla en las aguas profundas. Oceanógrafos de la Universidad de Hawaii en Manoa (SOEST) y del Departamento de Ciencias Marinas de la Universidad de Puerto Rico en Mayagüez dedican esfuerzos para entender el mecanismo.

Impacto de la Marea Interna Sobre la Disponibilidad de Nutrientes y la Productividad Primaria en el Canal de Mona

Lo más sorprendente sobre este fenómeno se ha descubierto recientemente. Se ha descubierto un rol insospechado de la marea interna. Estudios realizados entre el 1999-2001 demuestran que la marea interna en el Canal de Mona es capaz de hacer disponibles nutrientes (Ej. nitrógeno y fósforo) que están atrapados en las capas más profundas debajo del picnoclino (Figura).

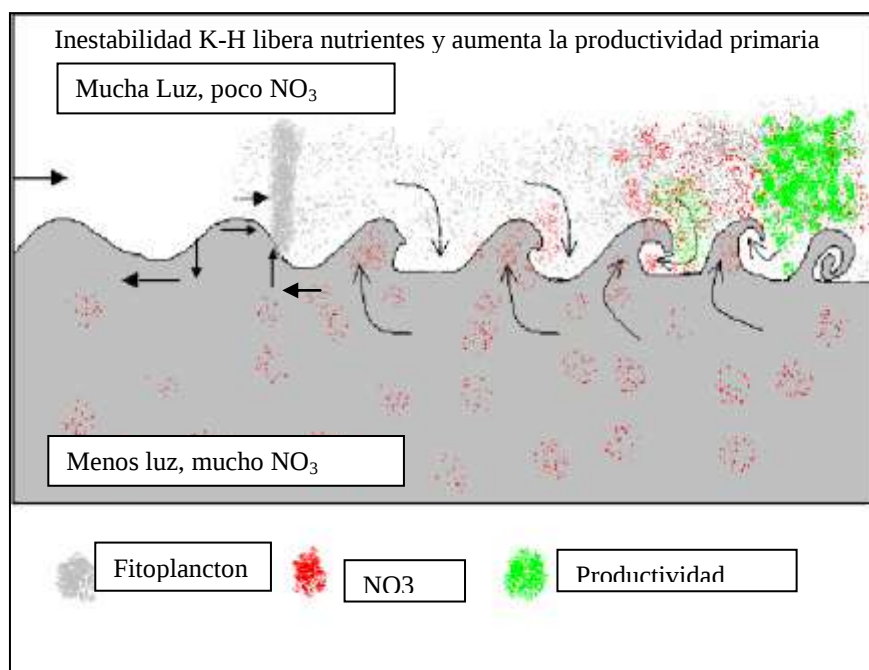


Figura 26. Desarrollo de la inestabilidad K-H y rompimiento de la marea interna genera turbulencia y mezcla. El fitoplancton junto con los nutrientes fertiliza las capas superiores donde reciben más luz y aumenta la productividad primaria. Cortesía: Disertación Doctoral de Edwin Alfonso-Sosa (2001), Ciencias Marinas, UPRM.

La inestabilidad generada por la marea interna y su rompimiento generan turbulencia, que permiten el traspaso de nutrientes de las capas inferiores a las superiores. Estos nutrientes son utilizados por el fitoplancton. El fitoplancton consiste de plantas microscópicas que están a la deriva de las corrientes oceánicas. Fijan el dióxido de carbono en el mar, y son los responsables del 30% de la producción primaria global. El fitoplancton absorbe el dióxido de carbono que penetra al mar desde la atmósfera. Por lo tanto, mientras más carbono fije el fitoplancton más dióxido de carbono se remueve de la atmósfera. La marea interna en el Canal de Mona aumenta la turbulencia, en tal manera, que una gran cantidad de nutrientes son liberados y provocan un aumento

El Mundo Físico

marcado en las tasas de fijación de carbono. Las aguas en Mar Caribe Nororiental por lo general disponen de muy pocos nutrientes, por lo tanto, la marea interna es un mecanismo muy importante que provee nutrientes esenciales para sostener tasas significativas de fijación de carbono.

Este fenómeno se intensifica durante ciertos periodos, cuando las condiciones astronómicas (fase, perigeo y declinación) de la luna y de la estratificación del Mar Caribe son favorables. A finales del mes de octubre las aguas del Río Orinoco alcanzan nuestra región y reducen la densidad del agua de mar (Figura). Esta situación aumenta la estratificación y se facilita la generación de la marea interna. Cuando las condiciones astronómicas y de estratificación coinciden, tenemos aumentos dramáticos en turbulencia que liberan mucho nitrógeno necesario para la fotosíntesis del fitoplancton.

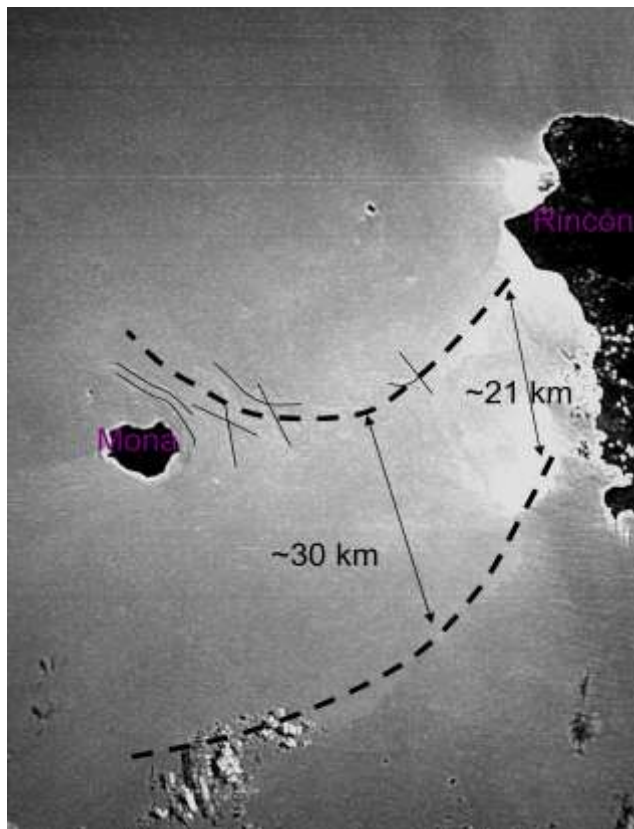


Figura 27 Fotografía del Canal de la Mona tomada por un astronauta en junio de 1983 (misión STS-007) que muestra la interacción de las ondas internas con la plataforma insular al oeste de Puerto Rico. Se tomó con una cámara Hasselblad con un lente de 100mm a un ángulo bien oblicuo. La foto es cortesía de NASA en <http://eol.jsc.nasa.gov/sseop/clickmap>.

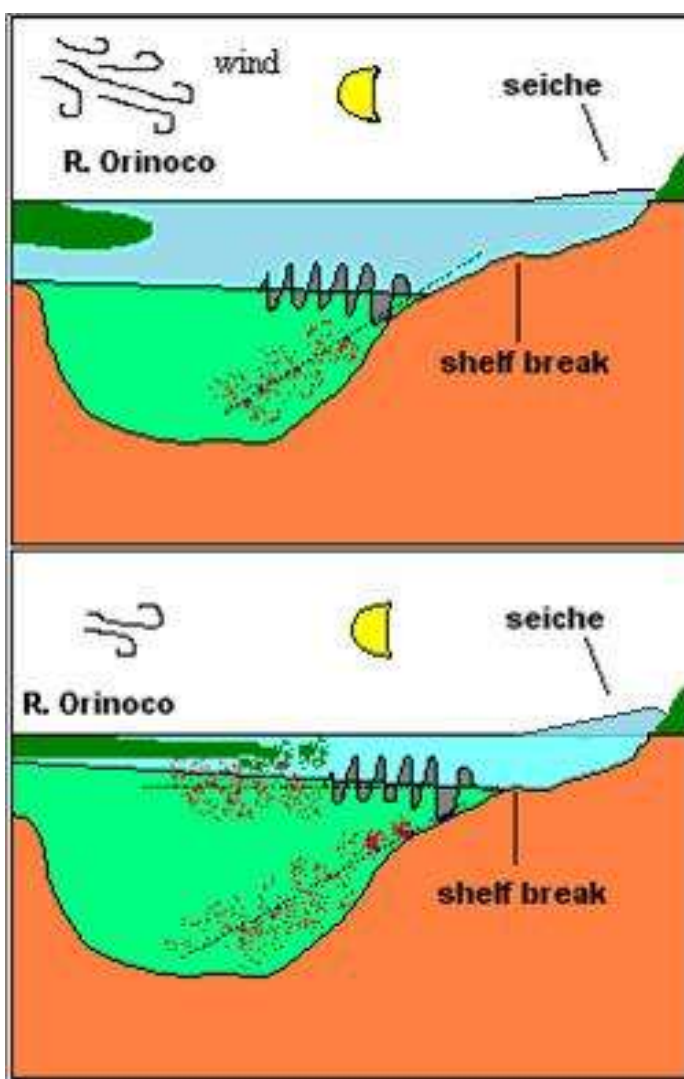


Figura 28 El recuadro superior muestra condiciones típicas entre enero y marzo. Durante esta parte del año la influencia de la descarga del Río Orinoco (área verde oscuro) en el noreste del Caribe es mínima o inexistente. El picnoclino estacional (línea negra continua) es cuando más profunda se encuentra en todo el año, los valores de la frecuencia BV son bajos y las pendientes características son las más pronunciadas ($> 15^\circ$). Todos estos factores limitan la generación de la marea interna a las pendientes más escarpadas y profundas. La difusividad vertical (zonas rojas difusas) es más alta a lo largo del haz mareal (línea punteada negra) pero la energía no se transfiere efectivamente a la plataforma y los seiches son pequeños. El recuadro inferior muestra condiciones típicas presentes entre agosto y noviembre. Hay una fuerte influencia de las aguas del Río Orinoco en la estratificación del agua de mar, hay valores altos de la frecuencia BV y la pendiente de los rayos es menor de un 1° . Bajo estas condiciones favorables la marea interna se puede generar en el beril y aumentar dramáticamente la mezcla vertical turbulenta en los primeros 60 metros de profundidad. La energía de la marea interna puede ser transferida fácilmente a la plataforma y aumentar dramáticamente la actividad de seiches. En ambos recuadros la condiciones astronómicas (cuarto creciente) son favorables para incrementar la actividad de ondas internas pero el Río Orinoco hace la diferencia. Cortesía: Disertación Doctoral de Edwin Alfonso-Sosa (2001), Ciencias Marinas, UPRM.

Cronología del Oleaje

En algún momento de nuestra vida nos ha tocado visitar una playa con oleaje. Vemos que las olas se aproximan a la orilla, cambian de forma, se levantan y se precipitan formando espuma blanca. Es un proceso dinámico transitorio, donde la hidrosfera deposita energía sobre la litosfera. Algunas veces resulta espectacular, especialmente cuando las olas alcanzan tamaño gigantesco. Nuestro cuerpo siente la vibración y el estruendo de la rompiente. Nos damos cuenta que es una zona de alta energía. Lo anterior es sólo el dramático final en la “vida” de una ola. Pero toda ola tiene una historia. Debemos preguntarnos: ¿De dónde vienen las olas que llegan hasta la playa? ¿Cuánto tiempo les tomó llegar allí? ¿Qué ocurrió durante esa travesía? Aquí pretendemos revelar esa otra parte que no vemos. Haremos una cronología de eventos partiendo de su generación, describiendo su travesía, hasta el levantamiento y rompimiento de las mismas.

Características Físicas de las Olas

Primero veamos las características físicas de las olas. Las olas se reconocen por su patrón ondulante. Las crestas y valles están separados por una distancia regular. Esta distancia se conoce como el largo de onda y para representarla usamos la letra griega lambda λ . Si observamos una ola que pasa a lo largo de un obstáculo fijo (Ej. el pilote de un muelle) notamos que ocurre a intervalos de tiempo regulares. Ese tiempo se conoce como el periodo de la ola, usamos la letra **T** para representarlo. La altura de la ola, **H**, es la distancia vertical entre la cresta y valle de la ola. La amplitud, **A**, es la mitad de la altura. La fuerza restauradora de las olas es la gravedad, excepto para las pequeñísimas olas capilares para las cuales es la tensión superficial. La rapidez de una ola se conoce como celeridad, **C**, y se consigue con la razón matemática entre el largo de onda y el periodo.

$$C = \frac{\lambda}{T}$$

Por ejemplo, las olas de periodo largo típicas de una marejada, tienen un largo de onda de 350 m y un periodo de 15 s. Entonces, su celeridad es 23 m s^{-1} , equivalente a 84 km h^{-1} o 52.5 MPH. Olas de marejada generadas por una tormenta a una distancia de 2000 millas de PR, pueden llegar a nuestras costas en un poco más de un día y medio. En el caso de un tsunami, el largo de onda y el periodo son respectivamente, $\lambda = 200 \text{ km}$ y $T = 17 \text{ min}$. Obtenemos una celeridad de 196 m s^{-1} equivalente a 706 km h^{-1} o 441 MPH. Comparable a la velocidad de un avión jet de pasajeros. Si comparamos las celeridades, el tsunami es ocho veces más rápido que una ola de marejada. Todas las olas comparten estas propiedades y las podemos usar para clasificarlas. Por ejemplo, si usamos el periodo, podemos discriminar entre los diversos tipos de olas que ocurren en la superficie del océano (ver Tabla).

Tabla 11 Tipos de olas de superficie discriminadas sólo por su periodo.

Periodo	Nombre de la ola	Fuente que la genera
.001s -0.1s	Capilares	Viento
0.2s - 30s	Olas de viento	Viento
1 min. – 60 min.	Batidos, Seiches	Viento, Marea, Sismos
10 min. – 30 min.	Tsunamis	Terremotos
30 min. – 1 ½ días	Marea	Fuerza gravitacional entre Sol, Luna y Tierra

Ya que conocemos algunas de las propiedades físicas de las olas, podemos enfocar nuestra atención en las olas de viento. Éstas olas son las más que imparten energía a la superficie del océano. Estas olas se generan, propagan y decaen en la interfase entre el océano y la atmósfera, ambos son fluidos geofísicos, pero de muy diferente densidad.

Generación de las Olas de Viento

Para generar olas de viento, necesitamos que el viento se mantenga soplando consistentemente sobre una extensión de agua. El *fetch* es aquella distancia lineal del océano donde el viento se mantiene soplando con velocidad más o menos constante; o sea que la magnitud y dirección del viento se mantienen por varias horas. El *fetch* puede tener una extensión de cientos de kilómetros. Dentro de esa región se generan y crecen las olas. Éstas van aumentando su tamaño a medida que la atraviesan. El principio de interferencia constructiva de las ondas, un principio fundamental de Física, explica como dos olas cualesquiera pueden solaparse, sumar sus respectivas amplitudes y terminar como una nueva ola de mayor amplitud. Así mismo, la interferencia destructiva tiene el efecto contrario. Este principio explica bien el crecimiento de olas de cierto tamaño en adelante, pero en las escalas pequeñas no aplica ya que es un proceso complejo, como es el caso de la transformación de olas capilares en olas gravitacionales de poca amplitud.

Para entender como las ondas capilares crecen, veámoslo con detenimiento. Probablemente has visto este fenómeno cuando el mar está como un espejo y sopla una brisa leve. Los vientos ejercen una fuerza de fricción sobre la superficie del océano. La fuerza es de contacto lateral (*wind stress*) sobre la superficie del agua. Se forma una pequeña rugosidad sobre el agua, que se conocen como ondas capilares. Estas olas tienen largos menores de 1.7 centímetros y la fuerza restauradora es la misma tensión superficial del agua. Las ondas capilares generan una diminuta topografía, la superficie del agua deja de ser horizontal y se forman pequeños levantamientos y hundimientos. El viento al rozar sobre esta superficie genera una pequeña circulación entre las dos crestas de la onda capilar. Esta circulación con forma de vórtice achatado está desligada del flujo de viento principal, ya que las dos crestas le hacen sombra. En el frente de la cresta se forma una zona de baja presión y en la parte de atrás se desarrolla una alta presión. Presión es una fuerza por unidad de área perpendicular (normal) a la superficie. Las dos

El Mundo Físico

zonas de presión alrededor de la cresta facilitan el levantamiento y el crecimiento. La baja presión del aire sobre el agua permite que el frente de la cresta se levante y la alta presión tiene el efecto contrario, hunde la parte posterior de la cresta. El efecto combinado provoca un levantamiento acelerado de la cresta. Como consecuencia tenemos que la ola aumenta su altura y deja de ser capilar. Ahora la fuerza restauradora es la gravedad. Es importante destacar que las fuerzas normales son las responsables de acelerar el crecimiento de olas capilares, hasta poder obtener olas con el suficiente tamaño para poder superponerse entre sí. El proceso explicado anteriormente ocurre dentro del *fetch*. La altura de las olas más grandes depende del tamaño del *fetch* y de la **duración** de los vientos. Mientras más grande el *fetch* y la duración, mayor será la altura significativa de las olas (H_s). La altura significativa es la altura promedio de la tercera parte de las olas más altas, en el registro hecho por el instrumento. Pero la altura máxima que se pueda generar está limitada por el rompimiento de las olas en la misma área de generación. Cuando existe un equilibrio entre la energía que pasa de la atmósfera a la hidrosfera y viceversa, llegamos a un punto que se conoce como **mar completamente desarrollado**. Al salir de esa zona las olas tienen un gran tamaño y quedan libres de la influencia del viento. Comienza la segunda parte en la cronología de la ola, la dispersión.

Dispersión

Cuando las olas salen del *fetch* se denomina *swell* (marejada). Paulatinamente las olas reducen su altura y aumentan su largo de onda durante su larga travesía en agua profunda. La celeridad, C , de las olas en agua **profunda** ($\tanh kd \sim 1$) es directamente proporcional al largo de onda λ ,

$$C = \sqrt{\frac{g}{k}} = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}}$$

donde g es la aceleración de la gravedad, 9.8 m s^{-2} y k es el número de onda, $\frac{2\pi}{\lambda}$. Por

ejemplo, una ola con un largo de onda de 350 m, si sustituimos los correspondientes valores en la ecuación obtenemos una celeridad de 23.3 m s^{-1} , en cambio con una ola de 100 m obtenemos una celeridad de 12.5 m s^{-1} , un poco más de la mitad que la celeridad de la ola anterior. Esta es la razón por la cual las olas más largas avanzan más que las cortas. La **dispersión** de las olas consiste en una segregación de las olas fundamentada en la diferencia en celeridad. Las olas más rápidas van adelante y las olas más lentas se quedan atrás. La ecuación anterior la podemos expresar en términos de periodo sustituyendo λ por CT , producto de la celeridad y el periodo,

$$C = \sqrt{\frac{gCT}{2\pi}} = \sqrt{\frac{gC}{\sigma}}, \text{ donde } \sigma \text{ es la frecuencia angular}$$

$$C^2 = \frac{gC}{\sigma}$$

$$C = \frac{g}{\sigma}, \text{ o sea } C = \frac{gT}{2\pi}, \text{ aproximadamente } C \approx 1.56T$$

esta ecuación nos indica que las olas con mayor periodo (menor frecuencia) tienen mayor celeridad. Si el periodo T es igual a 15 segundos obtenemos 23.4 m s^{-1} , en cambio con T igual a 7 segundos obtenemos una celeridad de 10.92 m s^{-1} . En resumen, olas largas y de periodo largo se mueven con mayor rapidez y son las primeras en alejarse del área de generación (*fetch*) y llegar primero a la costa. Fuertes presiones bajas asociadas a frentes fríos generan oleaje a las afueras de la Costa Este de E.U. y las marejadas de 15 segundos recorren 3000 km hasta las playas de Puerto Rico en tan sólo 36 hrs., en cambio a las olas de 7 segundos le toma 76 hrs. Esta separación de las olas por virtud de sus diferentes celeridades se le conoce como dispersión.

Tabla 12. Tiempo de Llegada (TOA) en horas para olas con periodo de 7 s, 15 s y 20 s.

Distancia Recorrida (km)	Distancia Recorrida (millas)	TOA ola de 7 s (hrs)	TOA ola de 15 s (hrs)	TOA ola de 20 s (hrs)
500	313	12.7	5.9	4.5
1000	625	25.4	11.9	8.9
1500	938	38.2	17.8	13.4
2000	1250	50.9	23.7	17.8
2500	1563	63.6	29.7	22.3
3000	1875	76.3	35.6	26.7
3500	2188	89.0	41.6	31.2
4000	2500	101.8	47.5	35.6
4500	2813	114.5	53.4	40.1
5000	3125	127.2	59.4	44.5
5500	3438	139.9	65.3	49.0
6000	3750	152.6	71.2	53.4
6500	4063	165.3	77.2	57.9
7000	4375	178.1	83.1	62.3

La celeridad de las olas en agua profunda esta dada por las ecuaciones anteriores, y representa la velocidad de fase de una sola ola. En la realidad, las olas viajan en grupos. Si observas desde una embarcación con detenimiento verás que la última ola del grupo pasa paulatinamente al frente del grupo. La ola que pasó al frente no dura mucho y

El Mundo Físico

desaparece, pero aparece una nueva ola al final del grupo que repite el mismo movimiento. Éste patrón de aparecer y desaparecer olas, continúa indefinidamente en el agua profunda. Así que las olas individuales se mueven más rápido que el mismo grupo. La velocidad del grupo es la mitad que la velocidad de fase de la ola. La **velocidad de grupo** representa la velocidad con la que se mueve la energía de las olas. En el agua poco profunda ($h \leq \frac{\lambda}{20}$) la velocidad de fase y la de grupo son las mismas, tal que h es la profundidad y λ representa el largo de onda.

La dirección de las olas que salen del área de generación (*fetch*) no es exactamente igual a la dirección del viento que las generó, sino que se dispersan a lo largo de un sector de 90 grados, o sea 45 grados a la izquierda o derecha del viento. Esto provoca que la energía se disperse y no este concentrada en una sola dirección. Si no hubiera dispersión angular tendríamos olas gigantescas golpeando nuestras playas. Asimismo esa dispersión angular aumenta la posibilidad de que lleguen olas generadas por una tormenta a nuestras costas.

La marejada que sale del *fetch* y ya está libre de la influencia de vientos fuertes, tiene un carácter irrotacional ($\nabla \times \vec{V} = 0$), factor que no permite que la ola pierda energía por turbulencia a lo largo de su travesía. Ésta es la causa que explica porque las olas pueden cruzar miles de kilómetros y alcanzar costas lejanas. Olas generadas en la Antártica (Pacífico Sur) han sido detectadas tan lejos como en Alaska (Pacífico Norte), cruzando una extensión de océano de 14,000 km! Claro que éstas han sido atenuadas considerablemente mediante el mecanismo de dispersión angular que mencionamos en el párrafo anterior. Algunas de las marejadas de gran tamaño (> 5 m; > 15 ft) que azotan la costa noroeste de Puerto Rico se generan en el Atlántico Norte por tormentas extratropicales a las afueras de la costa este de los Estados Unidos y llegan hasta nosotros en par de días.

Aumento de la Altura del Oleaje en Agua Llana

En la sección anterior mencionamos que la celeridad de las olas generadas por el viento en agua profunda depende exclusivamente del largo de onda. Cuando estas olas empiezan a acercarse a la costa y alcanzan una profundidad h menor que una veintava

parte de su largo de onda, $h \leq \frac{\lambda}{20}$, su celeridad pasa a ser dependiente sólo de la

profundidad. La magnitud de la velocidad de fase de las **olas de agua llana** está dada por la siguiente expresión, donde g es la aceleración de la gravedad, 9.81 m s^{-2} :

$$C = \sqrt{gh}$$

No solo cambia la velocidad de fase, sino que la velocidad de grupo deja de ser la mitad de la de fase. Ahora la velocidad de fase y la velocidad de grupo tienen la misma magnitud. O sea, que la velocidad a la que se mueve la ola es igual a la velocidad de

El Mundo Físico



Figura 29. Arriba. Marejada de periodo largo acercándose a la costa. Abajo. La velocidad de las olas se reduce abruptamente en la poca profundidad del arrecife provocando un aumento en la altura de la ola y un rompimiento precipitado. Costa con acantilados en la Playa Piedra Redonda, Quebradillas. Fotos: Edwin Alfonso-Sosa.

El Mundo Físico

propagación de la energía. Si una ola con largo de onda de 100 m se encuentra a una profundidad de 5 m ($h = \frac{100\text{ m}}{20} = 5\text{ m}$) su celeridad es

$C = \sqrt{(9.81\text{ ms}^{-2}) 5\text{ m}} = \sqrt{49\text{ m}^2\text{s}^{-2}} = 7\text{ m s}^{-1}$, este valor contrasta con el que calculamos para la misma ola en agua profunda en la sección anterior. Donde obtuvimos una velocidad de fase de 12.5 m s^{-1} . La velocidad de la ola en agua llana se redujo a un poco más que la mitad de su valor en agua profunda. Tenemos que preguntarnos: ¿Dónde se fue la energía cinética perdida? La energía no desapareció, sino que se transforma en energía potencial. Veamos como ocurre. Cuando la ola alcanza los cinco metros de profundidad, ya ha empezado a reducir su largo de onda y comienza a experimentar fricción con el fondo y poca pérdida de energía. Las crestas empiezan a pegarse entre sí y a aumentar su altura rápidamente. A mayor altura mayor será la energía potencial que poseen. La energía es de dos formas: cinética y potencial. La energía total es la suma de ambas. La energía total por unidad de área puede representarse por $0.125 \rho g H^2$ donde ρ es la densidad del agua (1024 kg m^{-3}), g es la aceleración gravitacional (9.81 m s^{-2}) y H la altura de la ola en metros. Una ola con altura de 1 m tiene una energía total de 1256 J m^{-2} . Podemos asumir que en agua profunda la energía total se repartió en partes iguales. O sea, que la energía potencial es igual a 628 J m^{-2} . Cuando la ola atraviesa una profundidad menor de 5 m, su altura incrementa rápidamente, ganando energía potencial. Si la ola alcanza una nueva altura de 1.25 m la energía potencial es $.0625 \rho g H^2$ o sea 981 J m^{-2} . El aumento de 353 J m^{-2} en energía potencial se debe a la pérdida de energía cinética, aproximadamente por esa misma cantidad, pero no igual debido a la pérdida por fricción. Parte de la energía de la ola se gasta en mover sedimentos o arena en el fondo. Por la discusión anterior, concluimos lo siguiente: que la conservación de energía obliga a toda ola que reduce su velocidad en agua llana a que tenga que aumentar su altura. La altura de ola que se mide en una boya oceanográfica en agua profunda no es la misma que se observa al romper esa ola en la costa. En cambio el periodo permanece constante.

Refracción

En la sección anterior demostramos el cambio en altura que sufre una ola cuando se acerca a la costa. En esta sección demostramos que la ola sufre un cambio en dirección en respuesta al cambio en profundidad. Refracción es la deflexión de la energía de una ola, debido a la interacción con el fondo marino de la playa. O sea, es una respuesta de la ola provocada por la fricción con el fondo.

Un buen observador puede apreciar, que las crestas de las olas no inciden paralelos a la costa, cuando se aproximan desde el agua profunda. Esto se puede observar desde un sitio alto, como el tope de un acantilado. Pero a medida que atraviesan el agua más llana, su dirección va cambiando hasta que la ola incide paralela a la orilla de la playa. Esa

El Mundo Físico

transición es producto de la refracción. Veamos este proceso con mayor detalle. Cuando la ola se aproxima con cierto ángulo a la costa, la sección de la ola que pasa sobre un área de menor profundidad (cerca de la orilla) va a experimentar mayor fricción con el fondo y va a desacelerar más que la sección de la misma ola que pasa sobre un área de mayor profundidad (lejos de la orilla). La diferencia en celeridad hace que la ola haga un giro hacia el área menos profunda. Esto provoca un cambio en la dirección de la ola. El ángulo con la costa se reduce y eventualmente la ola se ajusta perfectamente a la orilla.

La raíz del fenómeno de refracción es debido a que la celeridad de olas en agua llana es función de la profundidad

$$C = \sqrt{gh}$$

La ola reduce su celeridad al reducirse la profundidad. Veamos una ola que se encuentra a una profundidad h_1 y un par de segundos más tarde a una profundidad h_2 .

Tal que $h_2 < h_1$. La razón entre las dos celeridades es:

$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{\sqrt{gh_1}}{\sqrt{gh_2}} = \sqrt{\frac{h_1}{h_2}}$$

Ese cambio en celeridad provoca un cambio en dirección del ángulo Θ que hace la ola con la orilla.

$$\frac{\theta_1}{\theta_2} = \sqrt{\frac{h_1}{h_2}}$$

La magnitud de la refracción depende de la raíz cuadrada de la razón de las dos profundidades.

Análogo al proceso de refracción de la luz, donde las diferencias en velocidad en un vidrio cambian la dirección de las ondas de luz y permite enfocar la energía, podemos enfocar la energía del oleaje. El oleaje tiene mayor energía por unidad de largo en las puntas de playa, en los cabos, en las formaciones rocosas que se proyectan hacia el mar, en cambio, la energía se disipa en costas cóncavas como una bahía o ensenada.

Rompimiento de las olas

El proceso de refracción lleva inevitablemente a la ola a enfrentarse con la costa y romper. Pero el rompimiento de la ola dependerá de la pendiente del fondo y de lo empinado que se encuentre el frente de la ola. Primero entendamos el concepto “profundidad de ola” definido como la mitad del largo de onda en agua profunda λ_D ,

$$\text{profundidad de ola} = \frac{\lambda_D}{2},$$

a esta profundidad la base de la ola comienza a “sentir” el fondo. Cuando la profundidad es $\frac{\lambda_D}{20}$, la interacción con el fondo aumenta y la base de la ola reduce su avance, ya que,

El Mundo Físico

es desacelerada por la fricción con el fondo. En cambio, la parte superior de la ola avanza con una velocidad superior a la del fondo. A medida que la profundidad decrece la diferencia en velocidad entre la cresta y el fondo de la ola se incrementa. Entonces llegamos a un punto culminante cuando la cresta de la ola se derrumba sobre su base.

La relación entre “profundidad de ola” y pendiente del fondo determinaran el tipo de rompimiento. Hay tres tipos fundamentales de rompimiento:

1. Derrame (*spilling*) ocurre cuando hay poca pendiente. La cresta se derrama suavemente sobre el frente de la ola. Este tipo de oleaje se observa en playas de Cabo Rojo.
2. Precipitado (*plunging*) ocurre cuando hay una marcada pendiente. Hay una transición abrupta de profundo a llano. La base de la ola frena bruscamente y la cresta se precipita rápidamente, puede adelantarse al frente de la ola formando una cavidad tubular. Esta es la ola típica que utilizan los surfistas en el noroeste de Puerto Rico. El rompimiento precipitado es el responsable en mover la mayor cantidad de arena y sedimentos en una playa. Este movimiento de arena permite que la playa cambie rápidamente la forma de la cara de la playa y la distribución de los bancos de arena.
3. Surge (*surge*) es el tipo de rompimiento menos frecuente. Ocurre cuando hay una barranca o caída súbita del fondo marino. No se observa la ola romper afuera de la orilla como en los tipos de rompimientos anteriores, sino que la ola llega justo a la orilla y provoca que el agua surja, inunde y arrope toda la orilla. Debido a que la ola pierde poca energía, el agua surge rápidamente y con fuerza, pudiendo tumbar y arrastrar fácilmente a una persona o mascota. En Puerto Rico este tipo de rompimiento ha provocado accidentes serios y muertes en las playas de Isabela. Específicamente en las peñas de la playa Jobos y Montones. Debido a que estas olas se levantan muy poco, las personas piensan que no hay oleaje peligroso. Se acercan a la base inferior de la peña donde hay una plataforma cortada por el embate de las olas. Las personas allí paradas no se percatan de la ola y el agua inunda toda la plataforma, arrastrando a las personas.

Conclusión

Hemos completado una sinopsis de la vida de las olas de viento; que comprende la generación, travesía, levantamiento y rompimiento. Cada uno de estos procesos es analizado por los expertos con detalle matemático. Se generan modelos computacionales para simular eventos de oleaje, que permiten predecir su posible impacto en nuestras costas y a la navegación marina. El estudio de las estadísticas de oleaje puede revelar incluso el impacto del calentamiento climático sobre la fuerza y frecuencia de las tormentas en el océano. Los oceanógrafos e ingenieros trabajan juntos para entender el oleaje y su impacto sobre nuestras costas. Esta información puede ser usada por planificadores y desarrolladores para un futuro seguro en nuestras costas.

La Litosfera

El interior de la Tierra nunca ha sido visto por el hombre. Lo que conocemos lo debemos a percepción remota lograda por detectores capaces de registrar variadas medidas físicas; tales como: la propagación de ondas sísmicas provocadas por los terremotos, variaciones o anomalías en la fuerza de gravedad y magnética, flujo de calor del interior del Planeta, perturbaciones en las órbitas de los satélites artificiales y la Luna, cambios en la duración del día terrestre. Estas medidas junto con el conocimiento de principios de la Física, nos han permitido construir un modelo teórico del interior del Planeta. El cual consiste de una serie de capas o cascarones concéntricos, ordenados de acuerdo a su densidad; de menor a mayor densidad, a medida que te mueves hacia el centro de la Tierra. La Tabla resume las propiedades físicas de las capas.

Tabla 13. El interior de la Tierra

Capa	Rango (km)	Densidad (g cm^{-3})	Masa (%)
Corteza	0-10 (océanos) 0-50 (continentes)	2.8	0.4
Manto	33-2900	4.5	68.1
Núcleo exterior	2900-5150	11.8	31.5
Núcleo interior	5160-6371	17.0	

La corteza es la capa más fina y menos densa y tiene una composición donde abunda el aluminio, el silicio y el oxígeno. El manto contiene la mayoría de la masa de la Tierra (Vea Tabla). El núcleo exterior a pesar que tiene una densidad mayor que el manto es fluido. El núcleo interior es sólido y esta compuesto de hierro, níquel, y elementos radioactivos. El decaimiento de los elementos radioactivos emite el calor que mantiene activo el interior de nuestro planeta. Corrientes en el núcleo exterior generan el campo magnético terrestre.

Los geofísicos suelen describir el interior de la Tierra basado en propiedades físicas tales como dureza, plasticidad o fluidez. La corteza junto con la porción rígida del manto se conoce como **litosfera**. Esta capa alcanza hasta los 200 km de profundidad. En el interior del manto, entre los 200 km y 350 km tenemos una capa con propiedades plásticas, la astenósfera. La astenósfera se deforma por corrientes de convección en el manto inferior, generadas por el calor proveniente de las reacciones de decaimiento radioactivo del núcleo interior. A medida que la astenósfera se deforma arrastra consigo a la litosfera. La litosfera esta compuesta de placas independientes y cada una se desplaza de acuerdo al arrastre que hace la astenósfera debajo de éstas.

Las Placas Tectónicas

Las corrientes de convección del manto fraccionan la litosfera en placas tectónicas. Las placas principales se enumeran abajo:

1. Placa de Antártica
2. Placa del Pacífico
3. Placa de Eurasia
4. Placa de América del Norte
5. Placa de América del Sur
6. Placa de Indo-Australiana
7. Placa de Nazca
8. Placa de Filipinas
9. Placa de Arabia
10. Placa de Juan de Fuca
11. Placa de Escocia
12. Placa de Cocos
13. Placa del Caribe



Figura 30. La litosfera está fragmentada en enormes placas o plataformas tectónicas que incluyen corteza oceánica y continental. Crédito: NASA.

Estas placas contienen corteza continental y oceánica. Las placas se mueven independientemente una de otra. Pueden interactuar de tres maneras posibles formando zonas de: convergencia, divergencia y de contacto lateral. Cuando dos placas convergen o chocan, una de las placas se sumerge bajo la otra, creando una zona de subducción. El margen más denso de la placa se mete debajo del margen menos denso de la otra placa. A medida que el margen penetra en el interior de la Tierra, sus rocas se derriten y se convierten en magma. El magma asciende y perfora la capa que queda encima y forma

El Mundo Físico

nuevos volcanes. Cuando un margen oceánico converge con otro margen oceánico, se forma un arco de volcanes submarinos que luego se convertirán en islas volcánicas. El choque de la Placa de Norteamérica con la Placa del Caribe es responsable en crear las Islas del Caribe. De manera similar los arcos de islas del Pacífico se deben a la convergencia de márgenes oceánicos. Cuando un margen continental converge contra otro margen continental no ocurre subducción, por lo tanto se deforman y generan cadenas de montañas muy altas. El choque de la Placa Indo-Australiana, que se mueve hacia el norte, con la Placa de Eurasia está formando el Himalaya. Cuando hay contacto lateral entre los márgenes de dos placas y el movimiento se atasca se puede acumular energía que luego se libera de súbito en forma de terremotos. Este tipo de interacción ocurre entre la Placa de Juan de Fuca y la Placa de Norteamérica, generando los grandes terremotos que ha sufrido la ciudad de San Francisco. Debido a que la costa Este de los Estados Unidos no se encuentra en el margen de una placa, la actividad sísmica es nula. Por eso nunca hemos escuchado de terremotos en Nueva York.

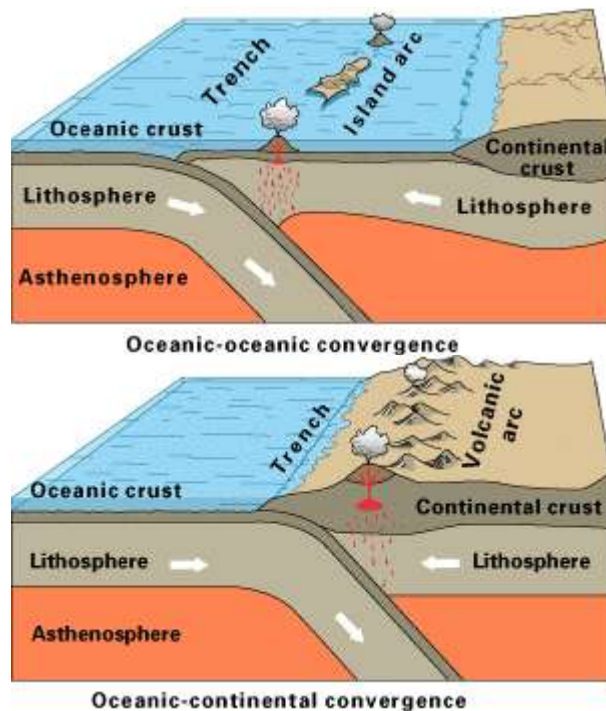


Figura 31. La formación de arcos de islas ocurre cuando hay subducción de un margen oceánico bajo otro margen oceánico y la corteza oceánica al convertirse en magma sirve de fuente de generación de volcanes submarinos que emergen formando islas. Ese es el caso de Puerto Rico y el Arco de las Antillas. Crédito: USGS. Abajo. Cuando un margen oceánico se hunde bajo un margen continental se forman arcos volcánicos en el continente. Crédito: USGS.

Cuando hay divergencia entre dos márgenes de placas se forman grandes fallas normales en donde se genera volcanismo. Al separarse las placas, emerge magma del manto que al enfriarse deja una nueva corteza terrestre. Bajo el océano estos márgenes oceánicos divergentes son responsables de generar el nuevo fondo marino y las cordilleras

El Mundo Físico

submarinas transoceánicas. Cuando los márgenes continentales divergen se forman grandes valles, ejemplo es el *Rift Valley* en África, donde una parte de África (incluye a Tanzania y Uganda) se separa del Congo a medida que se desplaza hacia el este.

En resumen, la teoría de placas tectónicas unifica y explica casi todos los procesos geológicos del planeta Tierra tales como: la orogénesis, la generación y formación de volcanes, islas, renovación de la corteza oceánica, trincheras, cordilleras oceánicas, generación de las masas continentales y de los sismos como veremos en la siguiente sección.

Sismos, Terremotos y Volcanismo

La interacción entre las placas tectónicas puede generar sismos, terremotos y volcanismo. El mapa de los sismos en todo el mundo coincide con el margen de las placas tectónicas. En la sección anterior explicamos que el volcanismo asociado a la convergencia de la Placa de Norteamérica con la Placa del Caribe es responsable de crear el Arco de las Antillas. En estos momentos ya no hay subducción en el Caribe Nororiental pero si hay contacto lateral. Por eso el volcanismo ha disminuido, (excepto en Monserrat), pero la actividad sísmica se mantiene alta. En el 2006 se detectaron 2253 sismos por la Red Sísmica de Puerto Rico. La concentración de mayor sismicidad ocurrió en la Placa de las Islas Vírgenes y la Zona sísmica del Sombrero. La zona de la Falla de los 19° N también muestra bastante actividad.

World Seismicity: 1990 - 2000

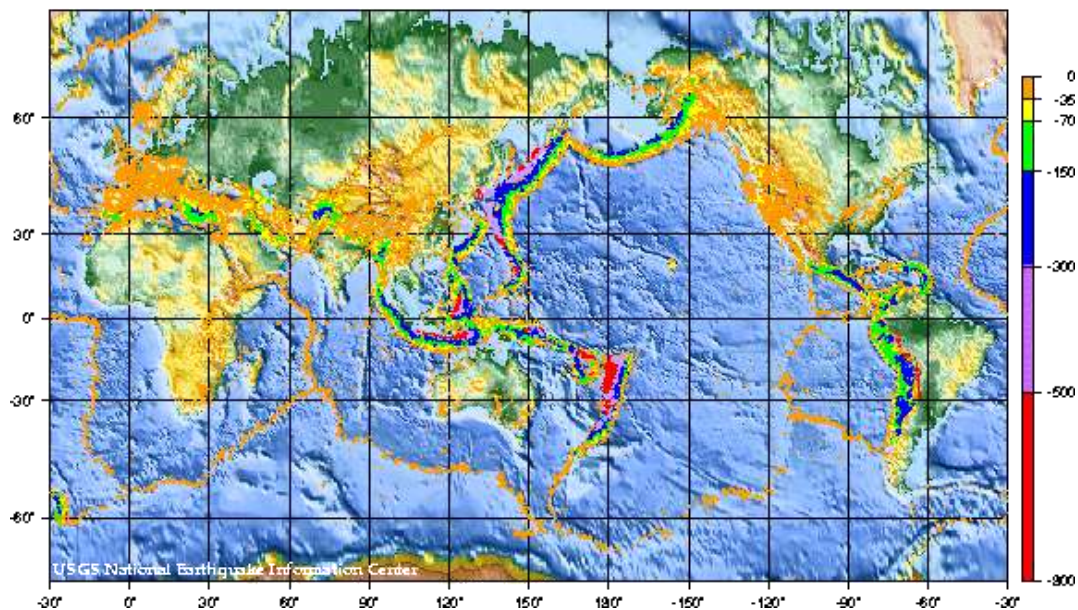


Figura 32. Epicentros de terremotos que ocurrieron en la década del 1990-2000. Ocurren en los márgenes de las placas tectónicas. Cortesía de: USGS National Earthquake Information Center.

Origen de la Litosfera Puertorriqueña

La litosfera más antigua de Puerto Rico tiene origen en el fondo oceánico del Océano Pacífico que se movió hacia el *Este* y pasó entre la masa continental de la dos Américas, cuando aún no existía el Istmo de Panamá, esto hace más de 190 millones de años. Rocas correspondientes a este periodo se encuentran en la Sierra Bermeja entre Lajas y Cabo Rojo. De ese fondo marino, hace 70 millones de años comenzó a formarse dos volcanes submarinos, que emergieron para formar lo que conocemos como la Cordillera del Centro de Puerto Rico y la Cordillera de Cayey. Los volcanes son el resultado de la subducción y subsecuente derretimiento del fondo oceánico de la placa de Norteamérica. La Trinchera de Puerto Rico, a unas 65 millas de distancia de la costa, es resultado del proceso de hundimiento de la placa de Norteamérica por debajo de la placa del Caribe. La Trinchera es la mayor profundidad del Atlántico. Las áreas costeras son producto de la actividad biológica de los arrecifes de coral que bordeaban a la isla volcánica. Las fuerzas tectónicas a través de millones de años empujaron el fondo marino costero y emergieron estos arrecifes, que se convirtieron en nuestros valles costeros. La Zona Cárstica es producto de la actividad biológica marina hace millones de años. La acción del oleaje, las lluvias, los ríos, las escorrentías, la disolución de la roca caliza, el viento y los procesos biológicos han transformado nuestra litosfera en lo que es en la actualidad.

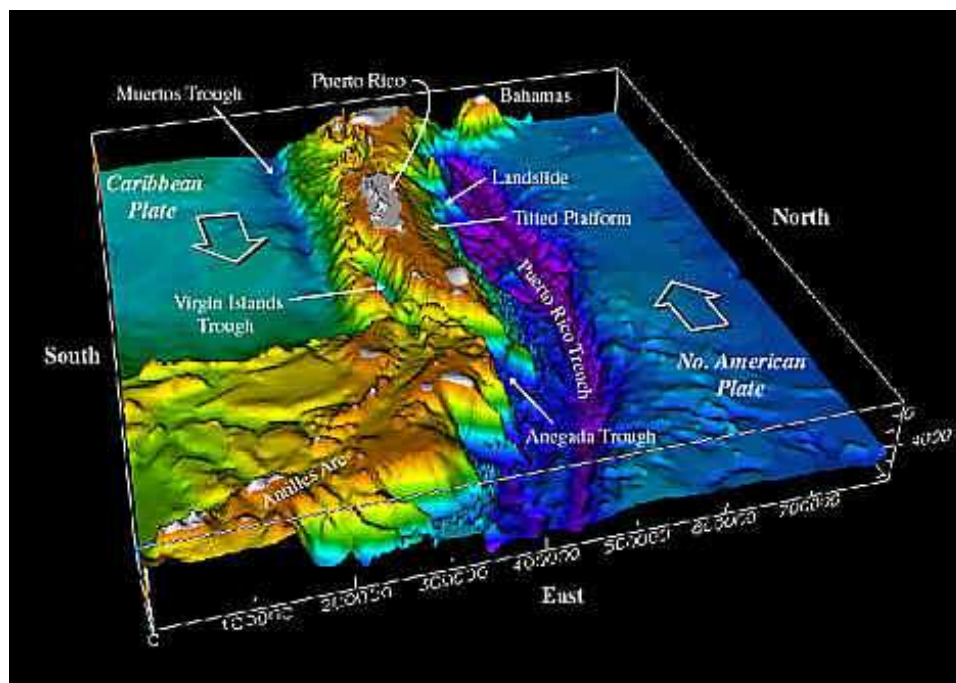


Figura 33. Batimetría del Noreste del Caribe. Las áreas marrones representan las plataformas insulares que están bajo agua y conectan las islas entre sí. La Placa del Caribe incluye a las islas y la cuenca caribeña. Al norte de la Trinchera de Puerto Rico se encuentra la placa de Norteamérica. Las flechas indican el desplazamiento relativo entre la Placa de Norteamérica y la Placa del Caribe. La Trinchera de Puerto Rico se formó por el hundimiento de la Placa de Norteamérica bajo la placa del Caribe. Cortesía de: USGS/NGDC.

Ciclo de las Rocas

En las secciones anteriores hemos visto que la litosfera es cambiada por diversos procesos geofísicos desencadenados por el desplazamiento de las placas tectónicas. Procesos tales como el hundimiento de una placa bajo la otra, exponiendo a las rocas a presiones y calor altísimos que derriten la roca y la convierten en magma. La extrusión del magma en forma de lava que al enfriarse forma rocas ígneas, ricas en minerales tales como el hierro y níquel. La exposición de las rocas ígneas al clima y procesos físicos que la erosionan y la convierten a lo largo de miles de años en sedimentos que son transportados y acumulados. La presión sobre las capas sedimentarias acumuladas puede generar rocas sedimentarias. Las grandes presiones que experimentan las rocas sedimentarias durante el movimiento de placas tectónicas pueden presionar estas rocas hasta transformar su estructura y convertirlas en rocas metamórficas. La subducción de las rocas metamórficas las lleva a convertirse en magma nuevamente, y así completar el ciclo. Este no es el único camino posible en el ciclo de las rocas. Es posible que la roca metamórfica se erosione y sus sedimentos se transformen en roca sedimentaria. La figura muestra el ciclo de las rocas y las posibles vías. Este proceso a través de cientos de millones de años recicla toda la litosfera terrestre. Ya la primera litosfera terrestre desapareció. Por eso si queremos examinar rocas antiguas que nos revelen algo de la historia temprana de la formación del Sistema Solar, tenemos que ir y buscarlas en los asteroides o cometas.

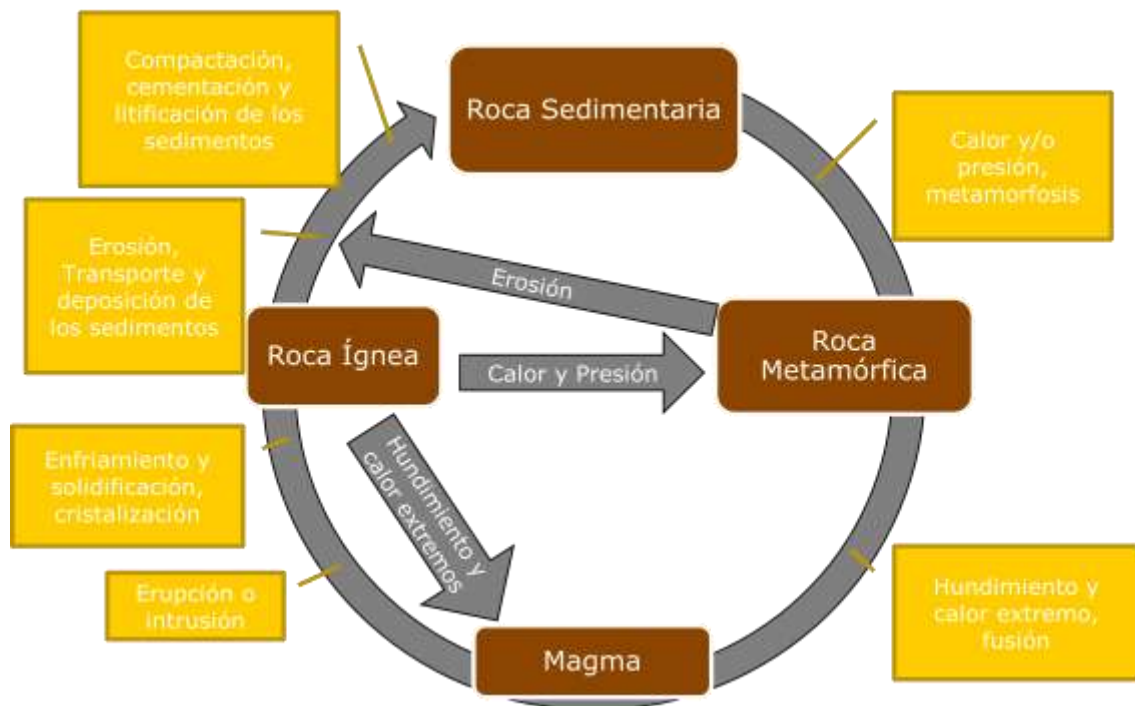


Figura 34. Ciclo de las rocas. Toda la litosfera es renovada a medida que las rocas completan el ciclo. Adaptado de *Earth Science*, 8va. Edición (Tarbuck y Lutgens) y de *Oceanography* (Pinet).

Cambio Global

¿Por qué es Global?

Anteriormente, habíamos definido clima como las condiciones atmosféricas propias de una parte de la Tierra y que se mantienen similares por muchos años. El cambio climático implica una alteración prolongada en esas condiciones atmosféricas. El cambio climático puede ser producido por factores naturales y/o por la actividad humana. A partir del 1750 con la revolución industrial y la actividad humana, ambos han sido los factores principales en cambiar directamente o indirectamente la composición química de la atmósfera global y ser el motor del cambio climático. El **cambio climático** influye en las otras tres esferas del sistema terrestre: hidrosfera, biosfera, y litosfera. Debido a que afecta a las cuatro esferas en todo nuestro planeta Tierra es apropiado referirse a este fenómeno como **cambio global**. (Fig.). Por primera vez la humanidad se enfrenta a un problema de gran magnitud porque la actividad humana ha provocado cambios en todas las esferas del sistema terrestre. Estos cambios provocados están afectando la actividad humana. Es inevitable, somos partes del sistema terrestre y no podemos escapar.

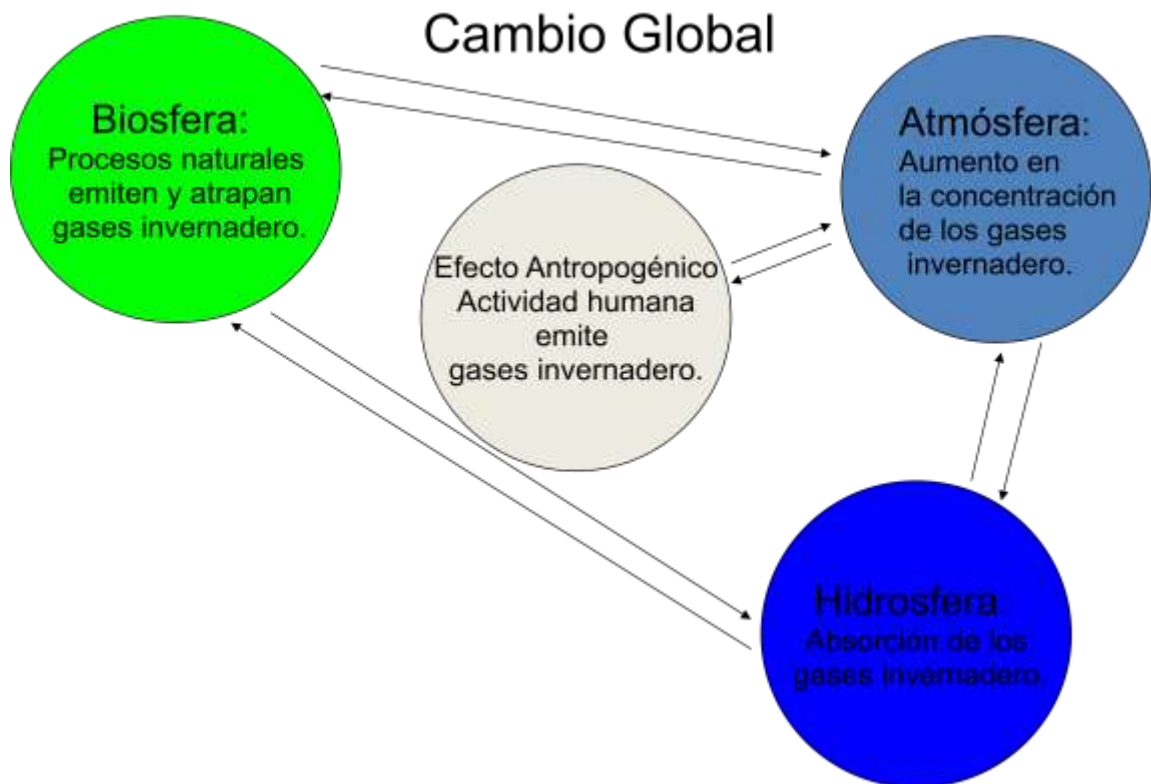


Figura 35 . Las esferas que componen el sistema terrestre están conectadas entre si, por lo tanto el cambio climático atmosférico influye en las otras esferas. Este proceso se conoce como cambio global. Observe que las flechas en ambas direcciones indican retroalimentación.

Gases de Efecto Invernadero

La composición química de la atmósfera ha sido alterada principalmente por el aumento en la concentración de tres gases: dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), y óxido nitroso (N_2O). Estos gases retienen radiación infrarroja. El largo de onda de este tipo de radiación electromagnética es mayor que el de la luz blanca visible, por lo tanto es invisible para nuestros ojos, pero nuestra piel puede detectarla, ya que, se siente como calor. La capacidad que tienen estos gases de retener este tipo de radiación, permite que la temperatura atmosférica aumente, similar a un invernadero. De ahí viene su nombre de gases de efecto invernadero. La tasa de incremento en la concentración de CO_2 es de 1.9 PPM año^{-1} . Para el 2005 la concentración era de 379 PPM, valor no antes visto en los últimos 650,000 años en el aire atrapado en el hielo polar. En los últimos diez años hemos tenido la tasa de incremento mayor de ese gas.

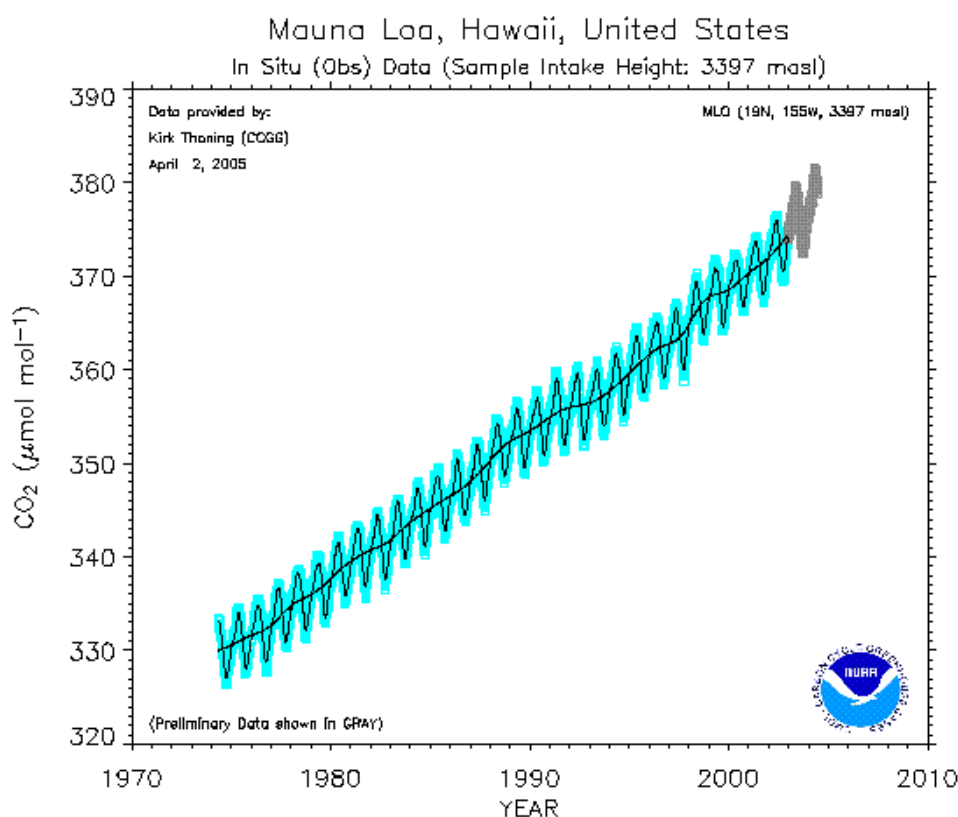


Figura 36. Registro de dióxido de carbono atmosférico desde la estación de Mauna Loa en Hawái. Imagen cortesía de NOAA.

Forzamiento Radiativo y el Calentamiento Global

La tasa de energía radiante infrarroja por unidad de tiempo por unidad de área que absorben los gases de efecto invernadero se puede medir en unidades de potencia por metro cuadrado (W m^{-2}). Éstas son las unidades de **Forzamiento Radiativo**, un concepto que describe de una manera cuantitativa el efecto invernadero. Si el valor es positivo, implica que se absorbe energía infrarroja y hay calentamiento. Si el valor es negativo, hay enfriamiento. La combinación de los tres gases de efecto invernadero mas los halocarbonos son responsables de un valor promedio de 2.64 W m^{-2} . Para comprender la magnitud de esta cantidad, podemos hacer la siguiente analogía: si cubrimos con una bombilla grande de Navidad cada metro cuadrado de la superficie del Planeta sin dejar ningún lugar, incluyendo los océanos, los Polos, etc., y las encendemos todas al mismo tiempo podemos aproximar el efecto de calentamiento de estos gases. Los valores individuales promedios para CO_2 , CH_4 , N_2O son 1.66, 0.48 y 0.16 W m^{-2} , respectivamente, le sigue el ozono troposférico con menos de 0.35 W m^{-2} . En cambio el ozono estratosférico produce enfriamiento con valores negativos de -0.05 W m^{-2} . En contraste, el efecto total de los aerosoles es enfriar con un valor promedio de -1.2 W m^{-2} . Incluye el efecto directo y el de albedo de la nube de aerosol. Los aerosoles producidos en erupciones de volcanes como el Chichón y el Pinatubo pueden descender la temperatura global promedio hasta cerca de 1°C , pero son eventos de corta duración. Algunos aerosoles, generados en zonas industriales, pueden provocar enfriamiento al reflejar la energía que nos llega del Sol. Todos los valores anteriores son del 2005 y provienen del primer reporte de la IPCC. Atribuir todo el calentamiento global al pequeño aumento de irradiancia solar extraterrestre de los últimos años no es posible ya que el valor promedio correspondiente del forzamiento radiativo es de tan solo 0.12 W m^{-2} .

La Fuente de los Gases de Efecto Invernadero

La fuente principal en el Planeta, del gas invernadero dióxido de carbono, es la quema de combustibles fósiles tales como el: petróleo, carbón y gas natural. En particular para la generación de energía eléctrica y la transportación. Luego le sigue, el uso de las tierras en la deforestación, necesaria para urbanizar, para la agricultura o cualquier otra actividad humana. En Puerto Rico, casi el 100% del CO_2 se genera en las plantas de generación de energía eléctrica. A nivel mundial la principal fuente de metano es la agricultura, pero en PR son los vertederos de desperdicios sólidos. El óxido nitroso se genera en el uso de fertilizantes. La Tabla resume esta discusión.

La biosfera y la hidrosfera atrapan los gases de invernadero presentes en la atmósfera. Es obvio que no es una situación de equilibrio, ya que el valor de dióxido de carbono en la atmósfera sigue aumentando aceleradamente. El aumento de la presión parcial del CO_2 en la atmósfera facilita que se absorba en el agua. Por lo tanto, los océanos se convierten

El Mundo Físico

en reservas de ese gas. Las plantas terrestres son una reserva de CO₂, pero la deforestación lo libera a la atmósfera. Las bacterias fotosintéticas y el fitoplancton en los océanos atrapan el gas presente en el agua y lo incorporan a sus células. Mediante la cadena trófica pasa a los tejidos de otros organismos, que cuando mueren, se van depositando lentamente en el fondo oceánico, donde son atrapados en los sedimentos, este proceso se conoce como “bomba biológica”. Algunos grupos han postulado que el CO₂ debe ser secuestrado en el océano, acelerando esa bomba biológica en algunas partes del océano.

Tabla 14. Descripción de las concentraciones de gases de invernadero y las fuentes antropogénicas de estos gases. Las concentraciones se expresan en unidades de partes por millón (PPM) o partes por billón (PPB). O sea, la razón entre el número de moléculas del gas invernadero contra el número total de moléculas presentes en un volumen de aire seco. Fuentes: IPCC, *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*; EPA, *Inventory of Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990, 1994*.

Gas Invernadero	Concentración Atmosférica (2005)	Tasa de Crecimiento Anual	Fuente Principal en el Planeta	Fuente en PR y USA
Dióxido de Carbono, CO₂	379 PPM	1.9 PPM/año	Quema de Combustible Fósil	Plantas de generación de energía eléctrica casi 100%
Metano, CH₄	1774 PPB		Agricultura	Vertederos 50%
Óxido Nitroso, N₂O	319 PPB		Agricultura	Fertilizantes 60%

Resumen Actual del Cambio Global

De acuerdo a reportes de NOAA y NASA del 2007 se han registrado los siguientes cambios en temperatura:

- Desde mediados de la década del 70, la temperatura promedio de la superficie ha incrementado cerca de 1°F.
- En estos momentos la tasa de calentamiento es de 0.32 °F por década o 3.2 °F por centuria.
- Los ocho años más calientes en los registros de temperatura a partir del 1850 han ocurrido todos después del 1998, siendo el más caliente el 2005.

El Mundo Físico

El reporte de la IPCC del 2007 indica los cambios observados en temperatura promedio global y el nivel del mar promedio global:

- La tendencia de calentamiento se observa en los registros de temperatura máxima y mínima diaria.
- En los últimos 50 años hay un incremento de temperatura global de 0.13 °C por década.
- A partir del 1950 en Estados Unidos y en regiones del hemisferio norte y sur han experimentado una reducción del número de días con temperaturas bajas de congelamiento.
- Temperaturas promedios en el Ártico han aumentado el doble de la tasa mundial de los últimos 100 años.
- Que el aumento en el nivel del mar es principalmente a la expansión termal del agua oceánica.
- Que el incremento global en el nivel del mar es entre 1.8 a 3.1 mm por año.
- Que para el 2100 el nivel del mar global promedio pudiera alcanzar hasta los 0.59-0.79 m.

Finalmente el reporte concluye que el calentamiento del sistema climático es **inequívoco**.

El segundo grupo de trabajo de la IPCC concluye que el impacto del Cambio Global para las islas pequeñas como Puerto Rico será:

- El deterioro de las costas, ya sea por la erosión o por el blanqueamiento de corales, esto afectará los recursos locales tales como la pesca y reducirá el valor turístico de la región.
- El incremento del nivel del mar exacerbará las inundaciones, marea ciclónica, la erosión de playas y otros peligros costeros que atentaran con la infraestructura, comunidades y facilidades que apoyan la vida en las islas.
- El Cambio Climático para mediados de este siglo reducirá los abastos de agua disponibles en las islas del Caribe y en el Pacífico, no se podrá atender la demanda durante las épocas de sequía.
- Aumento en los ciclones tropicales intensos incrementan la vulnerabilidad de la infraestructura de las islas.

Hay que destacar que estos reportes son el fruto del trabajo de cientos de científicos y de grandes proyectos de estudio climático. Hay que elogiar la capacidad del los grupos de trabajo de la IPCC, que pudieron plasmar en el reporte una visión completa de lo que está pasando en nuestro planeta.

Ventajas Geográficas de PR que Facilitan Generar Energía Renovable

¡Puerto Rico es una isla tropical! Esto quiere decir que esta localizada en la banda limitada al norte y al sur por el Trópico de Cáncer y Capricornio, respectivamente. ¿Que implica esto? Esta banda es la que recibe la energía más directa del Sol. En nuestra latitud de 18° N para el 27 de abril pudiera incidir una irradianza máxima E_{MAX} de 470 W m². O sea que durante un segundo atraviesan un metro cuadrado 470 Joules (J) de energía. Claro que esto ocurriría bajo un cielo completamente despejado y libre de aerosoles. Con una cubierta de nubes de un 40%, típica en ese día, podemos obtener una irradianza de 380 W m². Un valor más representativo de la irradianza solar sobre Puerto Rico durante la mayor parte del año es 320 W m². Esto quiere decir que sobre un metro cuadrado hay un flujo de energía Φ_E (unidades J s⁻¹) o potencia **P** de 320 vatios (W). Si colocaras un panel fotovoltaico ideal con esa misma área y con una eficiencia de 80% tendrías una potencia efectiva $P_{eff} = P \cdot \text{eff}$, igual a 256 W. ¡Energía suficiente para encender simultáneamente 23 bombillas fluorescentes de 11 W!

Otra ventaja de ser una isla tropical son los consistentes vientos alisios y el patrón de brisa marina. En la zona costera y en las montañas tenemos vientos regularmente entre 16 a 24 km h⁻¹ (10-15 MPH). A esto se añaden los eventos atmosféricos que ocurren entre 5-7 días tales como ondas tropicales o frentes fríos que pueden acelerar el viento hasta 40 km h⁻¹ (25 MPH). Esta energía puede ser aprovechada por generadores eólicos. *Eolo* es la deidad griega asociada al viento. Los generadores más pequeños disponibles en el mercado (US \$700) pueden generar una potencia de 90 W con tan solo 24 km h⁻¹ (15 MPH) y hasta 400 W con 44.8 km h⁻¹ (28 MPH). Esto quiere decir que si hay viento moderado (> 25 MPH) podemos encender simultáneamente 35 bombillas de 11 W. Bueno basta de bombillas; el molino de viento es capaz de generar más energía que una sola placa solar de 100 W (US \$700), claro está, siempre que haya viento. Cosa que en Puerto Rico no escasea.

Finalmente, Puerto Rico está rodeado por un océano profundo. Olas generadas en el Océano Atlántico llegan consistentemente a la costa norte sin disipar mucha energía. Solo basta con ir a la playa y recibir el golpe de las olas para apreciar la energía que poseen. La energía es de dos formas: cinética y potencial. La energía total por unidad de área puede representarse por $0.125 \rho g H^2$ donde ρ es la densidad del agua (1024 kg m⁻³), g es la aceleración gravitacional (9.81 m s⁻²) y H la altura de la ola en metros. Para una ola de un metro representa 1256 J m⁻². Si multiplicamos por la celeridad de la ola de unos 4.4 m/s, basado en una ola de 7 segundos a una profundidad de 2 m, podemos estimar la potencia **P** por unidad de longitud en 5.6 kW m⁻¹. Si la ola tuviera una altura de dos metros y un periodo de 10 segundos obtenemos 5023 J m⁻² y 22.2 kW m⁻¹. Es obvio, que mientras más largo sea el frente de la ola, hay más energía disponible.

El Mundo Físico

Los tres casos expuestos demuestran que en Puerto Rico abunda la energía renovable. ¡Esta energía se renueva todos los días y es gratis! Entonces, ¿Por qué no la aprovechamos? La tecnología para capturar la energía solar y eólica ya existen al nivel del consumidor. La captura de energía del oleaje ha sido demostrada en proyectos pilotos en países desarrollados tales como Reino Unido. Entonces debemos preguntarnos porque en Puerto Rico dependemos de combustibles fósiles como fuente de energía. Parte de la contestación es que la centralización de la energía renovable no es rentable y no puede proveer la demanda que exige nuestra sociedad hambrienta de energía. No hay predio de terreno suficientemente grande para concentrar todo los paneles fotovoltaicos o molinos de viento necesarios para suplir la demanda energética de todo Puerto Rico. Pero en esto radica la ventaja de la energía renovable, ya que no debe ser centralizada. Al contrario debe ser una red de hogares a lo largo de toda la isla. Bajo ciertas consideraciones puede ser rentable. Cada persona debe hacer un análisis de su consumo, presupuesto y localización, antes de tomar una decisión de utilizar energía renovable. En este manual pretendo darte una introducción de cómo hacer ese análisis y en que consiste un sistema eólico para generar tu propia energía. ¿Por qué eólico y no fotovoltaico? Eso te lo explico en la próxima sección.

Análisis del Potencial Energético en Mi Hogar

El primer paso es estimar cuanta potencia necesitas en tu sistema de energía renovable. No te sugiero que lo hagas usando tu factura de energía eléctrica, ya que la autoridad te vende energía y no potencia. Por eso el consumo que aparece en la factura se expresa en kilovatios-hora (kWh), que es una unidad de energía. Energía es igual a la potencia P multiplicada por el tiempo t , o sea $\text{Energía} = P \cdot t$. Un kilovatio-hora (kWh) equivale a 1000 vatios (1 kW) de potencia suplidos por 3600 s (1 hora) o sea una energía igual a 3.6×10^6 J. Para conseguir la potencia de tu sistema tienes que listar la potencia de todos los enseres eléctricos en tu hogar. En la tabla hago un listado de mis enseres.

La información generalmente se obtiene de la etiqueta del producto. Si aparece sólo la corriente expresada en amperes (A), multiplica ese valor por el voltaje 120 V y obtienes la potencia en vatios (W). Si el abanico de techo *Westinghouse* usa 1 A entonces al multiplicar por 120 V obtenemos una potencia de 120 W. De la tabla 1 obtenemos una potencia total de 8803 W o 8.8 kW. Si encendemos todos los enseres y bombillas al mismo tiempo necesitaríamos: ¡88 paneles de 100 W! Pero esa situación es excesiva e improbable. Examinando la Tabla y conociendo la frecuencia y tiempo que usamos nuestros enseres, estimamos que no sobrepasamos los 2500 W en un momento dado. Pero tengo que hacer la salvedad de que no conectaríamos al sistema ninguno de los primeros cinco enseres que encabezan la Tabla porque lo sobrecargarían. Tú puedes repetir el ejercicio expuesto arriba para calcular la potencia eléctrica que usas en tu hogar. En algunos portales de Internet hay disponible calculadoras para determinar el número de paneles fotovoltaicos que necesitas basado en tu lista de enseres. Abajo te describo el método que yo usé.

El Mundo Físico

Tabla 15. Potencial eléctrico de los enseres del hogar. Los renglones en rojo se pasan de la capacidad del sistema y lo drenarían de energía de inmediato.

Enseres Eléctricos	Cantidad de unidades	Vatios por unidad (W)	Corriente (A)	Voltaje	Subtotal de vatios (W)
Aire Acondicionado	1	2640	12	220	2640
Secadora de Pelo	1	1725	15	115	1725
Horno Parrilla Sharp	1	1300	10.8	120	1300
Horno Microonda Sharp	1	980	8.5	115	980
Nevera	1	747	6.5	115	747
Licuada Hamilton Beach	1	400	3.3	120	400
Batidora Kitchen Aid	1	325	2.7	120	325
Abanico de Techo Westinghouse	1	120	1	120	120
Batidora ToastMaster	1	100	0.8	120	100
Bombillas de 15 W	5	15	0.23	120	75
Procesador de Alimentos Toatmaster	1	70	0.6	120	70
Bombillas de 11 W	6	11	0.15	110	66
Bomba de agua del estanque	1	58	0.50	115	58
Bombillas de 26 W	2	26	0.24	110	52
Abanico de Techo San Marino	1	47	0.4	118	47
Bombilla del Abanico Westinghouse	1	40	0.3	120	40
Bombillas del Abanico San Marino	3	11	0.45	110	33
Lámpara de Mesa de Noche	1	25	0.2	120	25
Subtotal solamente bombillas	18				291
Total					8803

Una vez estimamos la potencia podemos determinar el número de paneles solares o molinos de viento a instalar. En el mercado hay paneles fotovoltaicos de 165 W a un costo entre US \$800 y US \$900. Para suplir 2500 W necesitamos 15 paneles, aproximadamente US \$12,750. Este es costo de los paneles, pero si añadimos los costos del inversor, baterías, controladores de carga, cables, mano de obra podemos estimar un costo final de hasta US \$ 20,000 dólares. Esta cifra esta fuera de nuestro presupuesto y puede desalentar a cualquier asalariado. Decidimos cambiar de idea. En lugar vamos a usar la energía alternativa como *backup* o apoyo al sistema de luces en caso de un apagón. Vamos a limitarnos a una potencia de 400 W, suficiente para mantener encendida las bombillas de la casa por un par de horas (vea Tabla). En lo que viene el próximo apagón podemos conectar el sistema de energía alternativa a la bomba de agua

El Mundo Físico

de 58 W. Algo que tiene mucho sentido ya que la bomba esta encendida 24 horas todo el mes (2592000 s). Resulta en un gasto de energía igual a:

Energía = $P \cdot t = 58 \text{ J s}^{-1} \cdot 2592000 \text{ s} = 150336000 \text{ J} = 41.76 \text{ kWh}$. En la factura mensual de la AEE 42 kWh representa una quinta parte (20%) de nuestro consumo.

El análisis que acabamos de completar es para mi hogar y mi presupuesto. Es obvio que tú vas a obtener un estimado del potencial energético y presupuesto diferente al mío. Tú tienes que repetir este ejercicio tomando en cuenta los enseres que posees, cuanto tiempo los utilizas y con especial atención a cuales de esos van a estar encendidos simultáneamente.

Porque vivo justo frente al Océano Atlántico donde la brisa marina es abundante y sólo necesito 400 W, opté por un generador eólico pequeño, similar al que usan los veleros (ver Figura). Cuatro paneles de 100 W me costaban US \$2800 y el molino de 400 W tan solo una cuarta parte, US \$700. Es posible que de tu análisis obtengas que necesitas una potencia de 3500 W. Para valores iguales o mayores de ese, necesitas un generador eólico de mayor tamaño. Estos molinos necesitan un gran espacio para instalarse, ya que son necesarias torres grandes con cables tensores largos y tienen que ser montados con ayuda de una grúa. En ese caso los paneles solares podrían ser una mejor opción. La mayor desventaja del sistema eólico es conectarse al mismo durante los días en que el viento está en calma, ya que descargaría las baterías con mayor rapidez. En la próxima sección te explico como instalé el sistema eólico.

El Sistema Eólico

Advertencia: Solamente un profesional experimentado en sistema eólico debe hacer la instalación siguiendo las normas establecidas por las agencias estatales o locales. Un perito electricista debe hacer la instalación eléctrica y aprobarla. No recomiendo que lo hagas tu mismo, la persona debe tener un conocimiento sólido en Física básica o en electrónica. La instalación requiere como mínimo dos personas. No tomes el riesgo de hacerlo solo. Sigue estrictamente las instrucciones del manual incluido con tu molino de viento y torre. Las aspas del molino son muy peligrosas. En las puntas pueden alcanzar velocidades sobre las 100 MPH y nadie debe acercarse cuando estén operando. La instalación de la torre y molino debe hacerse temprano en la mañana cuando hay poco viento y sol. El usuario de esta información asume toda la responsabilidad y riesgo.

Un sistema eólico básico consiste de un generador (el molino), una torre, un controlador de carga, un interruptor, un fusible de corriente directa, un banco de baterías de ciclo profundo y una varilla a tierra (vea Figura).

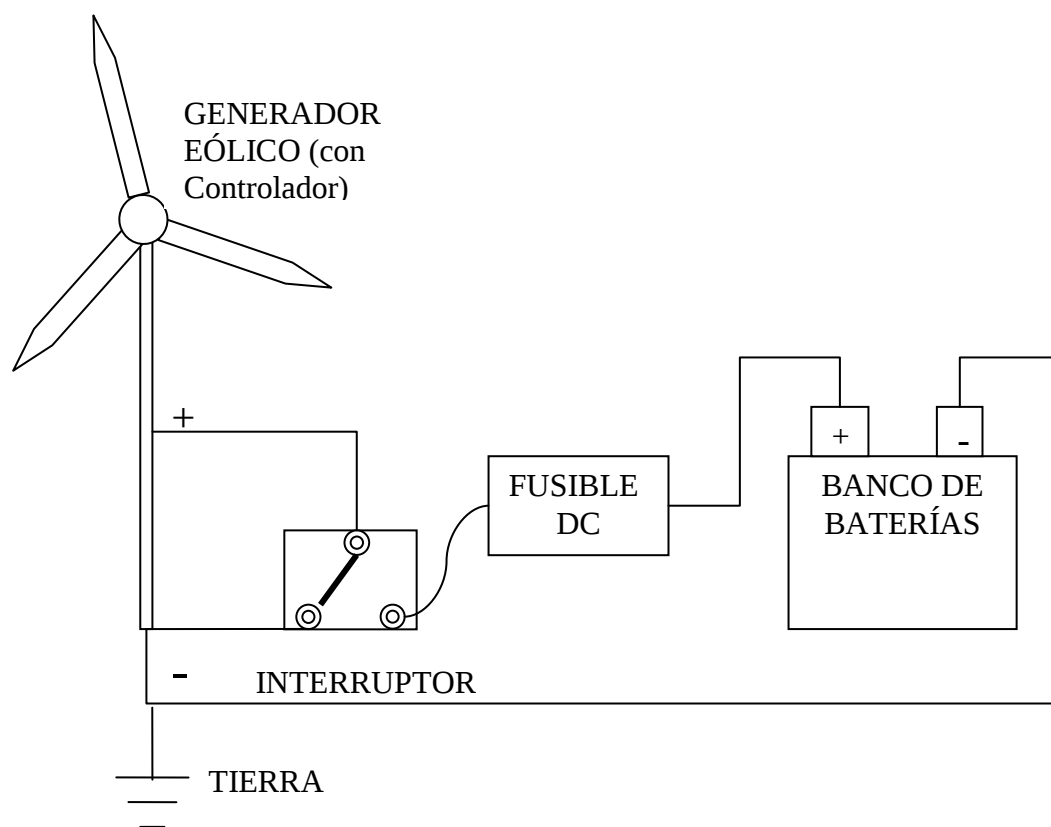


Figura 37. Componentes de un sistema eólico básico y diagrama de conexión. Interruptor en posición de apagado.

En un sistema eólico el componente más importante es el viento. Es importante que cotejes el mapa de vientos de tu localidad. Puedes conseguirlo en el Laboratorio Nacional de Energía Renovable con siglas en inglés NREL. La dirección es <http://www.nrel.doe.gov>. Para localizar el mapa tienes que buscar bajo internacional y no por estado. En Puerto Rico las áreas con mayor potencial eólico son las costas y en las montañas. También tienes que examinar si tienes edificios o árboles cerca de tu casa que puedan alterar y reducir el viento (Por favor no tales árboles). Mientras más abierta sea la zona donde vas a localizar el generador, mejor será su desempeño. A mayor altura de la torre, menor la fricción con el terreno, 10 metros (aprox. 33 pies) por encima de la obstrucción más alta, te asegura una operación adecuada del generador. La potencia de un molino sigue una relación directa con el cubo de la velocidad del viento. Esto quiere decir que al relocalizar el molino en un lugar de menor fricción donde la velocidad se duplica, entonces aumentaría su potencia ¡8 veces! Otro punto a considerar es que si aumentas el largo de los cables tienes que aumentar su grosor. Si la distancia es de 60 pies, un cable 10 AWG sería suficiente, pero si aumentas a 110 pies entonces el grueso debería aumentar a 4 AWG. Nunca coloques el molino cerca de líneas eléctricas.



Figura 38 Izquierda. Generador eólico con torre. Derecha. Banco de baterías. Cinco baterías conectadas en serie forman una fila con un voltaje de 27 V y capacidad de 312.5 A-Hr. Las dos filas juntas equivalen a 625 A-Hr. En la parte superior el inversor senoidal. Fotos: Edwin Alfonso Sosa.

Baterías

Debido a que en Puerto Rico no es posible conectar el molino al sistema de la Autoridad de Energía Eléctrica (AEE) tenemos que preparar un banco de baterías. Esta es la parte más pesada y peligrosa del sistema. Las baterías tienen que ser de ciclo profundo, baterías de auto **no** se pueden usar. La batería de auto esta diseñada para descargar rápidamente, contraria a la de ciclo profundo. Éstas últimas tienen placas de plomo gruesas, y las hace muy pesadas. Si las compras de GEL evitas los problemas de un posible derrame de ácido sulfúrico. Si no es posible entonces compra un saco de soda para hornear capaz de neutralizar el ácido, en caso de derrame. El ácido puede ser contenido en una pileta situada debajo del banco. El banco mínimo debe ser de 400 amperes-horas (A-Hr). Puedes crearlo usando 8 baterías de 50 A-Hr colocadas en dos filas en paralelo, de 4 baterías cada fila. Hay un sinnúmero de baterías para todo presupuesto disponibles en el mercado para sistemas fotovoltaicos. Yo utilice baterías de carrito de golf de 62.5 amp-hr ya que son más fáciles de conseguir (Ver figura). El banco de baterías debe estar cubierto de la intemperie, pero con suficiente ventilación. La acumulación del hidrógeno junto con una chispa eléctrica puede provocar una explosión.

Interruptor y Fusible DC

Hay ocasiones en que deseas detener el molino. Ya sea porque el banco esta cargado, necesitas acercarte a la torre o porque el viento es muy fuerte y el molino hace mucho ruido. El interruptor ha instalar tiene que seguir la especificación del manual. Si compras el que recomienda el manual y lo instalas correctamente evitarás que haya un corto

El Mundo Físico

circuito en el banco de baterías. Sobrecargas por el molino deben ser atendidas por el controlador de carga (componente a veces incluido con el generador), no obstante el fusible es la mejor garantía de que no sobrecargas súbitamente el banco.

Conexión a tierra

Las sobrecargas por rayos es algo muy probable en Puerto Rico. Para reducir el impacto sobre el sistema debemos conectar a tierra el generador, la torre y el banco de baterías (Figura). Para esto puedes utilizar una varilla sólida de cobre (6-8 pies) y enterrarla a no más de 45 grados respecto a la vertical. Mientras más profundo mejor. El cable a tierra (cable verde que se conecta a la varilla) debe estar conectado al polo negativo de la batería.

Conversión de corriente directa a corriente alterna

Los enseres eléctricos en tu hogar utilizan corriente alterna (AC) pero el sistema eólico genera corriente directa DC, por lo tanto tienes que convertir de una a otra. Para eso necesitas un inversor senoidal, capaz de convertir de 12 VDC o 24 VDC a 115 VAC. Es uno de los componentes más caros del sistema. Su precio oscila entre US \$1000 a \$ 2000. Tienes que conectar el inversor a tierra para que protejas tu equipo de cualquier sobrecarga.

Mitos y realidades de un sistema eólico

La instalación de un molino de viento puede convertirse en un tópico controversial si nos dejamos llevar por algunos mitos. Abajo enumero algunos de éstos junto con la realidad basada en mi experiencia.

Mito	Realidad
El molino va a producir energía para todo el hogar.	Un molino de menos de 2 kW no es suficiente para proveer toda la energía para un hogar moderno. Necesitas alternarlo con otras fuentes, tal como paneles solares.
El molino va a aniquilar toda ave y murciélago que pase cerca de éste.	Mi molino tiene aspas de 24 pulgadas y nunca he visto un ave o murciélago muerto o herido en las cercanías al mismo.
El ruido no me va a dejar dormir.	Para molinos pequeños durante ventarrones el ruido es parecido al de un “trimmer”, con muy poca duración. Las aspas se deforman durante el autofrenado y emiten ruido. Si el ruido te molesta puedes apagarlo usando el interruptor y las aspas

El Mundo Físico

	girarán lentamente.
El molino cuesta mucho dinero.	Dólar por dólar, el rendimiento de los molinos es superior al de un módulo fotovoltaico. Ejemplo, un molino de 400 W puede costar US \$ 700, en cambio necesitarías 4 paneles de 100 W para obtener el equivalente de energía, a un costo de US \$ 500 dólares por panel o sea un total de US \$ 2000 dólares.
No necesito paneles solares.	Falso. La realidad es que hay días con vientos en calma y son muchos durante el año. Como mínimo necesitas paneles solares de menos de 10 W para mantener las baterías con un voltaje adecuado. Las baterías pueden descargarse lentamente a través del propio molino o a través del cable tierra.
Puedo instalarlo sin ayuda de nadie.	Falso. Se necesita un mínimo de dos personas para instalar molinos pequeños y una grúa para los más grandes. No tomes el riesgo.
Los vecinos se van a molestar con el ruido	Es posible. Tienes que usar el sentido común, un apartamento o una casa en una urbanización no son el lugar adecuado para un molino. Si aun así insistes en uno, entonces tienes la opción de compartir la energía con tu vecino, mediante una extensión eléctrica.

Conclusión

En Puerto Rico abunda la energía renovable y existe la tecnología al alcance de muchos hogares puertorriqueños. Un análisis del potencial eléctrico de tu hogar es fundamental para determinar que sistema a instalar (solar o eólico) y si lo vas a usar parcialmente como apoyo “backup” en caso de apagón o a tiempo completo. Siempre usa el sentido común y determina si vives en un lugar adecuado, donde tengas el espacio necesario para una fácil instalación de este sistema.

Otra motivación para utilizar energía renovable es que no emiten gases de invernadero, responsables del calentamiento global. En cambio, las plantas generatrices de energía son los mayores emisores de estos gases. La escasez de los combustibles fósiles produce crisis económicas y hasta guerras. Por favor, contribuye a la paz y salud del planeta, rompe con la dependencia energética.

Preguntas para Ayudar a Repasar las Lecturas

Las siguientes preguntas se distribuyen en el mismo estricto orden de las lecturas.

Somos parte del Universo

1. ¿Por que podemos entender los procesos físicos que suceden en otras partes del Universo?
2. Desde tu perspectiva define el mundo físico.

Espacio y Tiempo

3. Defina escala
4. ¿Cómo se definió el metro en el SI?
5. ¿Cuál es el tamaño del Sistema Solar y de la Vía Láctea?
6. ¿Cuál es la distancia entre la Tierra y el Sol?
7. ¿Cuál es la distancia a *Proxima Centauri*?
8. ¿A que distancia nos encontramos del centro de la Vía Láctea? ¿Qué hay en el centro del núcleo?
9. ¿Cuántas estrellas tiene la Vía Láctea?
10. ¿A que velocidad se mueve el Sistema Solar?
11. ¿Cuánto tiempo toma una vuelta alrededor del centro galáctico?
12. ¿Qué es el *Big Bang*? ¿Hace cuanto tiempo ocurrió?
13. ¿Cuántas galaxias se estiman que hay en el Universo?
14. ¿Cuánto tiempo lleva el *Homo Sapiens* en la Tierra?

El Sol, La Actividad Solar y El Espectro Solar

15. ¿Cuál es la temperatura en el núcleo del Sol?
16. ¿Cuál es la temperatura de la fotosfera y de la corona solar?
17. Menciona las partes que componen el Sol.
18. ¿Cuál es el periodo del ciclo de actividad solar?
19. ¿Cuál es la temperatura y campo magnético de una mancha solar?
20. ¿Qué son los fulgores solares? ¿Dónde ocurren?
21. ¿Qué efecto puede tener sobre la Tierra un fulgor solar?
22. ¿Cómo impacta a la Tierra las eyecciones de masa coronal?
23. Menciona los componentes del Espectro Solar en orden de menor longitud de onda a mayor longitud de onda.
24. ¿Cuál componente tiene mínima energía?
25. ¿Cuál componente tiene máxima energía?
26. ¿Por qué los rayos gamma y rayos x no llegan a la Tierra?
27. ¿Qué gas detiene los rayos UV y porque se acaba ese gas?
28. En que consiste el espectro solar visible.
29. ¿De que color son las ondas de mayor largo de onda del espectro visible?

El Mundo Físico

30. ¿De que color son las de menor largo de onda?

Los Planetas Terrestres, los Planetas Gaseosos y los Cuerpos Pequeños del Sistema Solar

- 31. ¿Qué tres condiciones necesita un planeta para llamarse así?
- 32. ¿Qué condiciones necesita un planeta enano para llamarse así?
- 33. Menciona los 8 planetas siguiendo el orden de distancia respecto al Sol.
- 34. Menciona los planetas terrestres.
- 35. ¿Cuál planeta tiene una atmósfera densa de dióxido de carbono?
- 36. ¿Cuál es el planeta que tiene tamaño y densidad muy parecida a la Tierra?
- 37. ¿Cuál es el planeta menos denso?
- 38. ¿Cuál es el planeta más grande?
- 39. ¿Cuál es el planeta más caliente?
- 40. ¿Cuál planeta que tiene óxido de hierro en su superficie y se ve rojo?
- 41. Menciona el planeta que emite mayor energía y ondas de radio.
- 42. ¿De que están hechos los cometas?
- 43. ¿Dónde esta localizada la concentración de asteroides?

Sistema Tierra-Luna

- 44. ¿Qué escala tiene el sistema Tierra-Luna
- 45. ¿Cuál es el tamaño de la Luna?
- 46. ¿Por qué el Sistema Tierra-Luna es anormal?
- 47. ¿Qué efectos tiene sobre la Tierra esa condición?
- 48. ¿Cómo se formó el Sistema Tierra-Luna?
- 49. ¿Donde se encuentra el centro de rotación del Sistema Tierra-Luna?
- 50. ¿Qué se necesita que ocurra un eclipse solar?
- 51. ¿Por qué siempre vemos la misma cara de la Luna?
- 52. ¿Cuál es la diferencia entre las dos caras?
- 53. ¿Dónde se puede encontrar hielo en la Luna?
- 54. Menciona cuatro fases de la Luna.
- 55. Menciona los planetas que muestran fases vistos desde la Tierra.

Medición del Tiempo

- 56. ¿Qué es el tiempo solar aparente? ¿Cómo se mide?
- 57. ¿Qué es el tiempo solar medio? ¿Cómo se mide?
- 58. ¿A que tiempo solar medio equivalen 30 grados de diferencia entre dos meridianos?
- 59. ¿Cuántas zonas de tiempo hay en la Tierra?
- 60. Si en Arecibo son las 8:00 PM; ¿cuál es el GMT o UTC?
- 61. ¿Cómo se define el segundo en el Sistema Internacional?
- 62. ¿Cómo se llama los relojes que miden el Tiempo Universal?
- 63. ¿Cómo coordinamos el Tiempo Universal alrededor del Mundo?

Las Estaciones del Año

64. ¿Cómo se llama el eje de rotación de la Tierra? ¿Por qué se llama así?
65. ¿Por qué hay estaciones (verano, invierno, otoño, primavera) en la Tierra y en Marte?
66. ¿Cuál es la estación en el hemisferio sur cuando en el hemisferio norte es invierno?

La Atmósfera

67. ¿Qué es la atmósfera?
68. ¿De qué dos cosas está compuesta la atmósfera?
69. ¿Cómo se llama la fuerza que mantiene pegada a la atmósfera a la superficie de la Tierra?
70. ¿Cómo se le llama a las variaciones rápidas en el estado de la atmósfera? ¿Tiempo o clima?
71. Menciona los tres gases principales que componen la atmósfera en orden de mayor a menor concentración.
72. Menciona cuatro estratos o capas termales de la atmósfera.
73. ¿Cuál es la capa más importante para el Ser Humano?
74. ¿Cuál es la altura promedio de la troposfera?
75. ¿Dónde es más gruesa la troposfera? ¿En los polos o en el ecuador?
76. ¿Cómo se llama la radiación que absorbe la troposfera?
77. La estratosfera nos protege de un tipo de radiación electromagnética. ¿Cuál es el gas que se forma ahí y de qué radiación nos protege?
78. ¿Cuáles son los tres tipos de radiación electromagnética que penetran hasta la superficie de la Tierra?
79. ¿Por qué los rayos gamma y rayos x no llegan a la Tierra?
80. ¿Qué gas detiene los rayos UV y porque se acaba ese gas?
81. ¿Cómo se llama la capa que nos protege de los meteoros?
82. ¿En qué capa ocurren las auroras boreales?
83. ¿Qué es la ionosfera?
84. Menciona un beneficio de la ionosfera.
85. Menciona el porcentaje de albedo de la Tierra.
86. Menciona el porcentaje de absorción de la atmósfera.
87. Menciona el porcentaje de absorción de la superficie terrestre.
88. ¿Por qué la Tierra es más caliente en el ecuador y más fría en los polos?
89. ¿Qué efecto tiene esa diferencia en calor sobre nuestra atmósfera?
90. ¿Por qué cuando hay mayor vapor de agua en la atmósfera la presión es menor?
91. ¿Qué dos condiciones se necesitan para que la presión atmosférica aumente?
92. ¿En qué dirección giran los vientos alrededor de una presión baja y de una alta?
93. ¿Qué es la Fuerza o Efecto de Coriolis?

La Hidrosfera

94. ¿Qué porcentaje de la hidrosfera es agua salada y que porcentaje es agua dulce?
95. ¿Cuál es el porcentaje de agua en ríos, lagos, que pudiera procesarse para consumo humano?
96. ¿Por qué se denomina a toda la masa de agua que cubre la superficie terrestre como el Océano Global?
97. ¿Cuántos kilómetros cuadrados abarca el Océano Global?
98. ¿A qué porcentaje o fracción de la superficie terrestre equivale?
99. ¿Por qué deberíamos llamar a nuestro planeta, Océano?
100. Menciona los cuatro océanos de mayor a menor extensión.
101. ¿Cuál es la profundidad promedio del Océano Pacífico?
102. ¿Cómo se llama la Trincheras más profunda del Océano Pacífico?
103. ¿Cuál es la profundidad de la Trincheras de Puerto Rico?
104. ¿Cuánto más ancho que profundo es el Océano Pacífico?
105. ¿Será cierto que el Océano Pacífico tiene el doble de la extensión y el volumen del Atlántico?
106. ¿Cuándo el Ser Humano entendió que existe el Océano Global?
107. ¿Cuál es la fuente de origen de toda el agua del Planeta?
108. ¿De donde viene la energía para generar los vientos globales?
109. ¿Cuál es el astro que provee la energía?
110. ¿Qué radiación calienta la atmósfera?
111. ¿Cuál es el mecanismo que utiliza la atmósfera para transferir su energía al océano?
112. Explica en tus propias palabras como el viento genera las olas y la corriente (*wave drift*).
113. Si el viento sopla a veinte nudos (10 m/s); ¿Cuál sería la magnitud de la corriente generada por ese viento?
114. ¿Cómo se llama el mecanismo que permite el intercambio de *momentum* o energía de las capas superficiales a las inferiores?
115. Menciona las cinco fuerzas que interactúan para generar las corrientes oceánicas.
116. ¿Por que se generan las mareas astronómicas?
117. ¿Qué produce la marea atmosférica?
118. ¿Cuándo ocurren las mareas vivas (*spring tides*)?
119. ¿Cuál es la altura máxima de las mareas en Puerto Rico?
120. ¿Cuándo ocurren las mareas muertas (*neap tides*)?
121. ¿Por qué el Sol genera una marea menor que la generada por la Luna?
122. ¿Qué periodo tiene la marea al norte de PR?
123. ¿Qué periodo tiene la marea al sur de PR?
124. Explica porque el anuncio de la hora de marea alta en el Puerto de San Juan no es útil para los puertorriqueños de la costa sur.
125. ¿Cómo se llaman las corrientes horizontales generadas por la marea?

La Litosfera

- 126. Menciona las capas que forman el planeta Tierra
- 127. ¿Cuál de las capas genera el campo magnético de la Tierra?
- 128. Explica que son las placas tectónicas.
- 129. Menciona tres placas tectónicas.
- 130. ¿Donde se forman los terremotos y los volcanes? ¿Por qué?
- 131. ¿Qué ocurre cuando colisionan dos márgenes oceánicos?
- 132. Menciona una trinchera.
- 133. ¿Cómo se formo Puerto Rico?
- 134. ¿Dónde están las rocas más antiguas de Puerto Rico?

Cambio Global

- 135. ¿Qué es el forzamiento climático?
- 136. Mencione los principales tres gases de invernadero.
- 137. Menciona la fuente principal de cada uno de los gases de invernadero.
- 138. ¿Cuál es la concentración actual de dióxido de carbono en PPM?
- 139. ¿Cuánto ha aumentado la temperatura promedio del planeta Tierra?
- 140. ¿Cuánto se espera que aumente en el 2100?
- 141. ¿Cuánto aumentaría el nivel del mar en el 2100 debido al calentamiento del océano?
- 142. Menciona tres fenómenos naturales que ocurren actualmente y que algunos científicos atribuyen al calentamiento global.
- 143. Menciona tres acciones que tú tomarías para reducir los gases de invernadero.

Ventajas Geográficas de PR Facilitan Generar Energía Renovable

- 144. Menciona las ventajas que tiene PR para generar energía renovable.
- 145. ¿Cuáles son los factores a considerar antes de instalar un sistema de energía renovable?
- 146. ¿Cómo se calcula la potencia que utiliza un equipo que usa 2A con un voltaje de 120 V?
- 147. ¿Quién esta autorizado a instalar un sistema de energía renovable?

Bibliografía

- Alfonso-Sosa, Edwin (2001). *Variabilidad Temporal de la Producción Primaria Fitoplanctónica en la Estación CATS (Caribbean Time Series Station): Con Énfasis en el Impacto de la Marea Interna sobre la Producción*. University of Puerto Rico at Mayaguez. UMI Dissertation Services. UMI Number: 3042382.
- Bowditch, N. (1984). *American Practical Navigator Vol. I*. Defense Mapping Agency Hydrographic/Topographic Center.
- Brown, J., Colling, A., Park, D., Phillips, J., & Rothery, D. W. (1993). *Ocean Circulation*. New York: Pergamon Press.
- Brown, J., Colling, A., Park, D., Phillips, J., & Rothery, D. W. (1989). *Waves, Tides and Shallow-Water Processes*. New York: Pergamon Press.
- Diccionario *El Larousse de Bolsillo: 2007 Edición Actualizada*. Edición Larousse México.
- Harrington, P. S. (1997). *Eclipse!* New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Jones, E., & Richard, C. (2001). *Física Contemporánea*. Mexico, D. F.: McGraw-Hill Interamericana Editores, S.A. De C.V.
- Kantha, L. H., & Clayson, C. A. (2000). *Numerical Models of Oceans and Oceanic Processes*. San Diego: Academic Press.
- Kirk, J. T. (1994). *Light and Photosynthesis in aquatic ecosystems*. New York: Cambridge University Press.
- Pasachoff, J. M. & Menzel, D. H. (1995). *Guía de Campo de las Estrellas y Planetas de los Hemisferios Norte y Sur*. Barcelona: Ediciones Omega, S.A.
- Pinet, P. R. (1999). *Oceanography*. St. Paul: West Publishing Company.
- Pond, S., & Pickard, G. L. (1983). *Introductory Dynamical Oceanography*. New York: Pergamon Press.
- Zeilik, M., & Gregory, S. A. (1998). *Astronomy & Astrophysics*. Fort Worth: Saunders College Publishing.
- IPCC, 2007: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC, 2007: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Índice

- actividad solar
 - eyección de masa coronal, 15
 - fulgor solar, 14
 - mancha solar, 14
 - plage, 15
 - región activa magnética, 14
- afelio, 42
- Andrómeda, 12
- año-luz, 11
- ascensión recta, 39
- asteroides, 31
- Atmosfera
 - difusión de Rayleigh, 54
 - transmisión, 54
- Atmósfera
 - aerosoles, 45
 - ciclones, 50
 - clima, 44
 - composición química, 44
 - estructura termal, 47
 - ionosfera, 49
 - opacidad, 49
 - presión atmosférica, 50
 - tiempo, 44
 - troposfera, 47
- auroras, 15
- Big Bang*, 12
- bomba biológica, 92
- calendarios lunares, 36
- cambio climático**, 89
- cambio global**, 89
- celeridad de la luz en el vacío, 11
- ciclo hidrológico**, 56
- Círculo Ártico, 43
- climatología, 57
- combustibles fósiles, 91
- cometas, 31
 - composición, 31
 - Hale-Bopp, 33
 - lluvia de meteoros, 32
- Coriolis, 52
- Cuerpos pequeños del Sistema Solar.
 - See* cometas, *See* asteroides
- declinación, 39
- día sideral**, 40
- día solar aparente**, 40
- eclipses, 36
 - eclipse solar total, 37
 - lunar total, 37
 - umbra, 37
- ecliptica**, 39
- ecuador celeste**, 39
- energía renovable, 95
- equinoccio, 42
- equinoccio vernal**, 39
- escala, 10
- estaciones de la Tierra, 42
- Forzamiento Radiativo**, 91
- gases de efecto invernadero, 90
 - fuentes atropogénicas, 92
- Hidrosfera, 58
 - composición, 58
 - corriente mareal, 66
 - corrientes oceánicas, 60
 - marea interna, 69
 - mareas, 63
 - Océano Global, 59
 - océanos, 59
 - oleaje, 74
 - topografía, 62
- hoyo negro masivo, 12
- Huracanes, 50
- irradiancia, 54
- La Vía Láctea, 11
- Litosfera
 - capas, 83
 - ciclo de las rocas, 88
 - de Puerto Rico, 87
 - placas tectónicas, 84
 - sismos, 86
 - terremotos, 85
 - Trinchera de Puerto Rico, 87

El Mundo Físico

Luna. *See* Sistema Tierra-Luna
mareas, 63
mareas astronómicas, 63
mareas atmosféricas, 63
mareas internas, 69
 fertilización del fitoplancton, 71
 generación, 69
 intensificación, 72
 rompimiento y turbulencia, 70
mareas muertas, 64
mareas vivas, 64
mareógrafos, 64
metro, 10
mundo físico, 9
olas, 74
 características físicas, 74
 tipos de olas, 74
olas de viento
 dispersión, 76
 fetch, 75
 generación, 75
 levantamiento, 80
 olas en agua llana, 77
 ondas capilares, 75
 refracción, 80
 rompimiento, 81
 tiempo de llegada, 77
perihelio, 42
planeta
 definición, 19
 Leyes de Kepler, 20
 planetas gaseosos, 27
 planetas terrestres, 21
 propiedades físicas, 26
planeta enano
 Ceres, 19
 definición, 19
 Plutón, 19
planetas gaseosos
 Júpiter, 27
 Neptuno, 30
 Saturno, 29

Urano, 30
planetas terrestres
 Marte, 23
 Mercurio, 21
 Tierra, 23
 Venus, 21
Proxima Centauri, 11
ser humano, 12
sistema eólico, 97
Sistema Terrestre, 44
Sistema Tierra-Luna
 baricentro, 34
 declinación lunar, 37
 fases lunares, 36
 fuerza mareal, 67
 mareas, 63
 mares y océanos, 35
 perigeo, 38
 periodo sideral, 35
 periodo sinódico, 36
 sincronización, 35
 tamaño, 34
Sol, 13
 actividad solar, 14
 Constante Solar, 54
 Corona Solar, 13
 Cromosfera, 13
 espectro solar, 18
 Fotosfera, 13
 fusión termonuclear, 17
 Núcleo, 13
 Zona de Convección, 13
 Zona de Radiación, 13
solsticio, 43
Tiempo
 medición, 39
 Tiempo Estándar, 40
 Tiempo Medio de Greenwich (GMT), 40
 Tiempo Universal, 40
Unidad Astronómica, 11