CAMPO GRAVITATORIO

Luis Pardillo Vela https://fisicayquimicaluis.wixsite.com/esoybach

El espectáculo de las estrellas desde un lugar sin contaminación lumínica es algo mágico. Si observáramos el firmamento durante un cierto tiempo, no tardaríamos en descubrir una serie de movimientos que ya se percataron las mentes brillantes de la antigüedad.

- Los cuerpos celestes salen por el este y se ponen por el oeste.

-Todas las estrellas constelaciones parecen girar alrededor de una estrella, que llamamos estrella Polar, una estrella que no muy llamativa y que se encuentra situada en constelación de la Osa Menor.

- El movimiento de los planetas es más complejo. Su movimiento, en relación con el fondo de estrellas, tiene una trayectoria bastante extraña que presenta una especie de bucle, un movimiento que parece errante y de ahí su nombre, ***planeta,*** que en griego significa "*errante*".

Este movimiento *"errante"* de los planetas en el cielo es una combinación del movimiento propio de la Tierra y el del otro planeta alrededor del Sol. Dado que la Tierra se mueve más rápido en su órbita que los planetas exteriores, en ciertos momentos de su traslación, la Tierra "adelanta" a estos planetas. Por lo que, si marcamos la posición día día de un planeta, aparecerá un bucle en la trayectoria conocido **como movimiento retrógrado aparente.**

https://starwalk.space/es/infographics/retrograde-motion-demystified

Todos esos fenómenos requerían explicación y en su intento surgieron Ptolomeo con su teoría geocéntrica (s. II), Copérnico con su teoría heliocéntrica (s. XVI), Keppler con sus leyes del movimiento planetario (inicios s. XVII) y Newton con su La Ley de Gravitación Universal (finales s. XVII).

LEYES DE KEPLER.

Johannes Kepler (1571-1630) formuló estas leyes basándose en las observaciones de Tycho Brahe sobre el movimiento de los planetas, especialmente Marte. Sus leyes revolucionaron la astronomía al demostrar que las órbitas planetarias no eran círculos perfectos como se creía desde la antigüedad.

Primera Ley: Ley de las Órbitas

"Los planetas describen órbitas elípticas alrededor del Sol, que ocupa uno de los focos de la elipse"

Para la mayoría de planetas, las órbitas son casi circulares (elipses de muy baja excentricidad).
Afelio: punto más alejado del Sol. **Perihelio**: punto más cercano al Sol

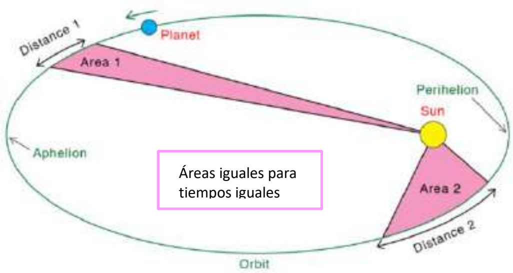
Segunda Ley: Ley de las Áreas

"El radio vector que une el planeta con el Sol barre áreas iguales en tiempos iguales"

Consecuencias:
- El planeta se mueve **más rápido** cuando está cerca del Sol (perihelio)
- Se mueve **más lento** cuando está lejos del Sol (afelio)
- Son consecuencia de la **conservación del momento angular**

$$\vec{L}=\vec{r}\wedge\vec{p}=\vec{r}\wedge m\cdot\vec{v}$$

Λ indica producto vectorial, también se expresa como **X**



Expresión matemática: dA/dt = constante (variación del área respecto del tiempo es constante)

Tercera Ley: Ley de los Períodos

"El cuadrado del período orbital es proporcional al cubo del semieje mayor de la órbita"

Fórmula: $T^2 = k \cdot a^3$

T = período orbital (tiempo que tarda en dar una vuelta completa)
a = semieje mayor de la elipse orbital, que coincide con el **radio R** en orbitas circulares o casi circulares.
k = constante que depende de la masa del cuerpo central

LEY DE LA GRAVITACIÓN UNIVERSAL.

Isaac Newton (1642 – 1727) dio el siguiente gran paso para completar la explicación del movimiento planetario al enunciar su **Ley de Gravitación Universal** (formulada en 1666 y publicada en 1687)

"Los cuerpos se atraen con una fuerza directamente proporcional al producto de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa."

En forma escalar $\boxed{F = G\dfrac{Mm}{r^2}}$ En forma vectorial $\boxed{\vec{F} = -G\dfrac{Mm}{r^2}\vec{u_r}}$ **(1)**

En la expresión vectorial de la fuerza gravitatoria aparece el signo negativo para indicar que la fuerza gravitatoria es **atractiva**, ya que su sentido es contrario al del vector unitario $\vec{u}_r$ ya que éste está definido **saliendo de la masa que origina la fuerza**.

- G es una constante de proporcionalidad denominada ***constante de gravitación universal*** que no depende del medio y tiene como valor constante: **$G = 6,67 \cdot 10^{11}$ Nm^2kg^{-2}**. Su cálculo fue realizado más de un siglo después por Cavendish mediante el empleo de una balanza de torsión.

- La fuerza que ejerce M sobre m es la misma que la que ejerce m sobre M pero con sentido contrario.
- La fuerza de atracción gravitacional es una **fuerza central** y, por tanto, **conservativa**.

JUSTIFICACIÓN DE LAS LEYES DE KEPLER.

Las Leyes de Kepler fueron formuladas a partir de observaciones astronómicas, sin una base científica que explicara por qué ocurrían. Isaac Newton, con su **Ley de Gravitación Universal** y sus leyes de la dinámica, proporcionó la justificación física que demostró que las leyes de Kepler no eran una simple coincidencia, sino una consecuencia directa de la fuerza de la gravedad.

1ª Ley (Órbitas Elípticas)

Newton demostró matemáticamente que, bajo la influencia de una fuerza de atracción que varía con el inverso del cuadrado de la distancia (como la gravedad), la trayectoria de un cuerpo que orbita a otro debe ser necesariamente una geometría **cónica** (elipse, círculo, parábola o hipérbola). La forma específica de la trayectoria depende de la energía total del sistema. En el caso de los planetas, con energía negativa, sus órbitas son elípticas y cerradas, con el Sol en uno de los focos.

2ª Ley (Áreas Iguales)

La 2ª Ley de Kepler es una consecuencia directa del principio de **conservación del momento angular**.

El momento angular, $\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p}$, de un sistema se conserva si el momento de fuerza neto sobre él es cero.

La fuerza gravitatoria es una **fuerza central**, lo que significa que siempre actúa a lo largo de la línea que une el planeta y el Sol.

El vector de posición $\vec{r}$ y la fuerza de gravedad $\vec{F}$ son paralelos ⇨ el momento de fuerza $\vec{\tau}=\vec{r}\times\vec{F}$ = 0, por lo tanto, el momento angular del planeta se mantiene constante en toda su órbita.

La constancia del momento angular implica que el planeta barre áreas iguales en tiempos iguales, moviéndose más rápido cuando está cerca del Sol y más lento cuando está lejos.

3ª Ley (Periodos)

Newton pudo deducir la Tercera Ley de Kepler a partir de sus propias leyes. Para una órbita circular (una aproximación válida para muchos planetas), la fuerza gravitatoria actúa como la fuerza centrípeta que mantiene al planeta en su órbita alrededor del Sol.

$$F_{gravitatoria} = F_{centrípeta} \rightarrow G \cdot \frac{M \cdot m}{r^2} = m\frac{v^2}{r}$$

Y como el periodo de revolución es $T = 2\pi r/v$ → v = 2πr/T y sustituyendo en la ecuación anterior:

$$G \cdot \frac{M \cdot m}{r^2} = m\frac{\left(\frac{2\pi r}{T}\right)^2}{r} \rightarrow G \cdot \frac{M \cdot m}{r^2} = m\frac{4\pi^2\, r}{T^2}$$ eliminando m y despejando T obtenemos :

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{GM_{sol}} \cdot r^3 \rightarrow \boxed{T^2 = Kr^3}$$ siendo $K = \frac{4\pi^2}{GM_{sol}}$

La constante K toma valores diferentes según sea el astro central.

A partir de aquí saldrán muchas fórmulas, pero solo hay que conocer la fórmula de la ley de Newton y los conceptos teóricos de campo y potencial gravitatorio y la ley de conservación de la energía mecánica. A partir de estas ideas fundamentales se pueden deducir fácilmente las demás fórmulas cuando haga falta y es mucho más valioso saber razonar y relacionar los conceptos que intentar aprender de memoria todas las fórmulas.

CAMPO GRAVITATORIO.

Se denomina **campo de fuerzas** a la perturbación que se produce en el espacio que rodea a un objeto provocado por alguna propiedad intrínseca de la partícula (magnética, eléctrica o gravitatoria. Así, un cuerpo debido a su masa, crea a su alrededor un campo gravitatorio. Cada punto del campo de fuerzas viene caracterizado por dos magnitudes, una vectorial, **intensidad del campo gravitatorio,** y otra escalar, el **potencial gravitatorio**.

El campo es una entidad física medible, y se define la intensidad del campo gravitatorio en un punto como la fuerza ejercida sobre la unidad de masa colocada en ese punto:

$\vec{g} = \vec{F}/m$ y si sustituimos $\vec{F}$ por la ecuación **(1)** tendremos:

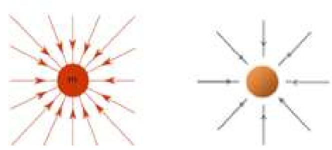
$$\vec{g} = -G \cdot \frac{M}{r^2} \cdot \vec{u}_r$$ cuyo valor escalar es $g = G \cdot \frac{M}{r^2}$

- El campo gravitatorio es g se expresa en el S.I. en $N \cdot kg^{-1}$ (equivalente a m/s^2)

- La fuerza gravitatoria sobre una masa m, situada en un punto donde la intensidad del campo gravitatorio es $\vec{g}$, es $\vec{F} = m \cdot \vec{g}$

- Se representa gráficamente mediante **líneas de fuerza**. Por convenio, las líneas de fuerza se dibujan de tal forma que su densidad es proporcional a la intensidad del campo. Además, el campo gravitatorio, alrededor de una masa M, tiene las líneas de fuerza radiales y dirigidas hacia la masa M y las superficies de nivel o superficies equipotenciales del campo gravitatorio, debido a una masa M, tienen simetría esférica.

Imagen izquierda Campo intenso
Imagen derecha Campo débil



A mayor intensidad del campo gravitatorio mayor densidad de líneas de fuerza

- El campo gravitatorio es **conservativo** al provenir de un campo de fuerzas central, y por tanto:

Cumple el principio de superposición.

Si tenemos varias masas, produciendo cada una su propio campo gravitatorio, el campo gravitatorio en un punto se obtiene sumando vectorialmente los campos producidos por cada masa. Esto se llama Principio de Superposición.

$$\vec{g} = \vec{g}_1 + \vec{g}_2 + ... = \sum_i^N \vec{g}_i = -G \sum_i^N \frac{m_i}{r_i^2} \vec{u}_r$$

CAMPO GRAVITATORIO TERRESTRE: ACELERACIÓN DE LA GRAVEDAD.

El **peso** de un cuerpo es la fuerza con la que la Tierra atrae a la masa de ese cuerpo. Esta fuerza, según la Ley de Gravitación Universal, es:

$$F = G \frac{M_T \cdot m}{r^2}$$

La aceleración de la gravedad (g) se define a partir de la segunda ley de Newton (F=ma) y la Ley de Gravitación Universal (F=P). Al comparar las dos ecuaciones, obtenemos la siguiente expresión para g:

$$\boldsymbol{g = G \frac{M}{r^2}}$$

El valor de g en la superficie de la Tierra es aproximadamente 9.8 m/s^2 (o 9.8 N/kg). El valor de r en esta ecuación corresponde a la distancia desde el centro del planeta hasta el punto considerado, $\mathbf{r = R_T + h}$ Por ello, a medida que nos alejamos de la superficie, la distancia r aumenta y, por lo tanto, el valor de g disminuye.

El campo gravitatorio es la propiedad del espacio alrededor de una masa que causa una fuerza sobre otra masa. Se define como la fuerza gravitatoria por unidad de masa. Por lo tanto, el campo gravitatorio es precisamente la aceleración de la gravedad.

ENERGÍA POTENCIAL GRAVITATORIA. POTENCIAL GRAVITATORIO

El campo gravitatorio es debido a una fuerza central, y en consecuencia es conservativo, esto implica que el trabajo realizado por la fuerza gravitatoria al desplazar una partícula de masa m entre dos puntos es independiente de la trayectoria, solo depende de las posiciones inicial y final.

Igualmente, una fuerza es conservativa cuando el trabajo total que realiza una partícula moviéndose en una trayectoria cerrada es 0.

$$W = \oint \vec{F} . \vec{dr} = 0$$

NOTA: es probable que al dar este tema aún no hayan visto en matemáticas las integrales ($\int$) , en ese caso ir directamente al resultado

Sea una masa M que actúa sobre una masa m. Calculemos el **trabajo** que realiza el campo gravitatorio de M para traer la masa m desde el infinito hasta una distancia r:

$$\mathbf{W_{gravitatorio} = - \Delta Ep_{gravitatoria} = - (Ep_{gravitatoria\ final} - Ep_{gravitatoria\ inicial})}$$

$\mathbf{W_{\infty \to r} = - \Delta Ep_{gravitatoria} = - (Ep_{g\,r} - Ep_{g\infty})} = \int_\infty^r \vec{F} \cdot \overrightarrow{dr} = \int_\infty^r G \frac{Mm}{r^2} dr = \left[-\frac{GMm}{r} \right]_\infty^r = - GMm\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{\infty}\right) = - \frac{GMm}{r}$

Como $Ep_{g\infty} = 0$ tenemos que la energía potencial gravitatoria Ep_g en el punto r es: $\boxed{\boldsymbol{E_p = -G \frac{Mm}{r}}}$

Siendo **r la distancia entre centros los de masa del planeta y satélite**, es decir: r = R + h, donde R = radio planeta y h altura a la que se encuentra el satélite

El signo negativo indica que la fuerza es atractiva y que, para alejar el cuerpo de la masa central, hay que aportar energía.

¿De dónde viene Ep = mgh?

De cursos anteriores estamos acostumbrados a usar la energía potencial como Ep = mgh. Veamos cómo se obtiene este valor en el campo gravitatorio.

La energía potencial de un cuerpo de masa m sobre la superficie de la Tierra, de masa M y radio rT viene dada por:

$$E_p = -G\frac{Mm}{r} \quad \text{donde r = R + h} \rightarrow E_p = -G\frac{Mm}{R+h}$$

El ΔE_p de un cuerpo m entre la superficie de la Tierra (radio R) y una posición en altura h (R + h), será:

$$\Delta E_p = -G\frac{Mm}{R+h} - \left(-G\frac{Mm}{r}\right) = GMm\left(\frac{h}{R^2+R\cdot h}\right)$$

y como hablamos de alturas h pequeñas comparadas con R → $R^2 >> R\cdot h$ → $R^2 + R\cdot h \approx R^2$:

$\Delta E_p = GMm\left(\frac{h}{R^2}\right)$ pero $\frac{GM}{R^2} = g$ → ΔE_p = mgh que usamos como **Ep = mgh** situando el valor de referencia 0 a nivel del suelo y el incremento de energía es por la altura h, o pr el cambio de altura ($h_f - h_i$), pero solo válido para pequeñas alturas respecto al nivel del suelo, no para grandes alturas, en particular la de las órbitas de los satélites.

- Potencial gravitatorio y trabajo

El potencial gravitatorio (V) , a diferencia de la energía potencial, no depende de la masa del objeto, sino que es una propiedad del campo gravitatorio en sí mismo. Se define como la energía potencial gravitatoria por unidad de masa en un punto determinado del espacio (es como una "huella" o mapa energético del campo).

$$V = \frac{E_p}{m} \rightarrow \boxed{V = -G\frac{M}{r}}$$

Es una **magnitud escalar** que se mide en julios por kilogramo (J/kg), equivalente a m^2/s^2.

Cuando varias masas crean campo gravitatorio, el potencial total es la suma algebraica de los potenciales individuales: $V = V_1 + V_2 + V_3 + ... = \Sigma_i(-GM_i/r_i)$

Nota: *El potencial es escalar, es una suma algebraica por lo que NO se suman vectorialmente como las fuerzas gravitatorias.*

Por definición $V = \frac{E_p}{m}$ ⇨ $\mathbf{E_p = mV}$

Podemos calcular el trabajo para trasladar una masa de un punto inicial a un punto final aplicando:

$$\mathbf{W_{gravitatorio} = -\Delta Ep_{gravitatoria} = -(Ep_{gravitatoria\ final} - Ep_{gravitatoria\ inicial})} \rightarrow$$

$$\mathbf{W_{gravitatorio} = -\Delta Ep_{gravitatoria} = -m\Delta V}$$

Si el resultado del trabajo es positivo, W>0: el campo hace el trabajo (movimiento espontáneo).

Si W<0: el campo se opone → el trabajo necesario debe hacerlo una fuerza externa.

MOVIMIENTO DE SATÉLITES, PLANETAS Y COHETES.

- Velocidad orbital de un satélite. Es la velocidad que debe tener para que esté en **órbita** circular **estacionaria** respecto a un planeta. Para ello la fuerza gravitatoria y centrípeta han de ser iguales en módulo para que el satélite pueda mantener la órbita, es decir:

$$F_{centrípeta} = F_{gravitatoria}$$

$$m\frac{v^2}{r} = G\,\frac{M\cdot m}{r^2}$$ despejando tenemos: $$\boxed{\boldsymbol{v = \sqrt{\frac{G\cdot M}{r}}}}$$

NOTAS MUY IMPORTANTES: La velocidad orbital es independiente de la masa del satélite y el radio de la órbita es **r** es **r = R + h**, donde R es el radio del planeta y h la altura respecto a la superficie del planeta. No es lo mismo el radio de la órbita que la altura a la que se encuentra orbitando.

Como se observa en la ecuación obtenida la velocidad es independiente de la masa del satélite.

En el caso de una órbita elíptica (menos frecuentes en los satélites artificiales), la velocidad viene dada por:

$$v = \sqrt{2G\cdot M\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{2a}\right)}$$

- Periodo de la órbita circular.

Para hallar el periodo de una órbita circular, observamos que el satélite recorre la circunferencia de la órbita 2πr en un periodo *T*. Utilizando la definición de velocidad circular, tenemos que $v_{órbita} = 2\pi r/T$. Igualando con la velocidad orbital obtenida:

$$\text{v} = \frac{2\pi r}{T} = \sqrt{\frac{G\cdot M}{r}} \rightarrow \boxed{\boldsymbol{T = 2\pi\sqrt{\frac{r^3}{G\cdot M}}}}$$

- Energía mecánica de un satélite.

La energía mecánica de un satélite es la suma de la energía cinética y la energía potencial. Esta energía es conocida como **energía de enlace del satélite** para mantener una órbita circular estacionaria, es decir, cuando el satélite permanece siempre en la misma posición sobre el planeta (en la Tierra se denomina geoestacionaria).

$E_m = E_c + E_p = \frac{1}{2}mv^2 - G\frac{M\cdot m}{r}$ sustituyendo v por $\boldsymbol{v} = \sqrt{\frac{G\cdot M}{r}}$ → $E_m = \frac{1}{2}m\frac{G\cdot M}{r} - G\frac{M\cdot m}{r}$ →

$$\boxed{\boldsymbol{E_m = -\frac{1}{2}G\frac{M\cdot m}{r}}}$$

El valor negativo de la energía mecánica indica que el satélite está **ligado gravitacionalmente** al planeta.

Para el caso de una órbita elíptica se obtiene una fórmula igual salvo que en lugar del radio orbital ”r” es “a” que es el semieje mayor de la órbita elíptica (el semieje mayor “a” de una elipse de muy baja excentricidad es prácticamente el radio del círculo al que se asemeja).

- Energía de satelización.

La **energía (trabajo) de satelización** es la **energía total** que debemos suministrar a un satélite para llevarlo desde la superficie de un planeta hasta una órbita estable. Esta energía es el cambio en la energía mecánica del satélite.

$$\mathbf{E_{satelización} = E_{final\ (en\ órbita)} - E_{inicial\ (en\ superficie)}}$$

Energía inicial ($E_{inicial}$): En la superficie, la energía cinética del satélite es cero, por lo que su energía es solo potencial. El radio inicial es el radio del planeta, R.

$$E_{inicial} = E_p = -G\frac{Mm}{R}$$

Energía final (E_{final}): En la órbita, el satélite tiene tanto energía cinética como potencial, y la suma de ambas es la energía mecánica final (calculada en el apartado anterior).

$$E_{final} = E_m = -\frac{1}{2}G\frac{M\cdot m}{r}$$

Energía de satelización o trabajo necesario para poner en órbita un satélite desde la superficie de la Tierra (o de cualquier planeta) es el resultado de la diferencia entre la energía final menos la inicial:

$$E_{satelización} = -\frac{1}{2}G\frac{M\cdot m}{r_f} - \left(-G\frac{M\cdot m}{R}\right) \rightarrow \boxed{\boldsymbol{E_{satelización} = GMm\left(\frac{1}{R} - \frac{1}{2r_f}\right)}}$$

- Cambio de órbita de un satélite

El trabajo necesario para que un satélite cambie de una órbita situada a una distancia inicial r_i a otra órbita de distancia final r_f, podemos conocer el trabajo que se debe realizar ya que se corresponde con la diferencia entre las energías mecánicas de enlaces correspondientes: $W_{i\rightarrow f} = Em_f - Em_i$

$$W_{i\rightarrow f} = -\frac{1}{2}G\frac{M\cdot m}{r_f} - \left(-\frac{1}{2}G\frac{M\cdot m}{r_i}\right) = \boxed{\boldsymbol{W_{i\rightarrow f} = G\frac{M\cdot m}{2}\left(\frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_f}\right)}}$$

Recordemos que el radio r de la órbita es $r = R_{planeta} + h$ (altura sobre la superficie)

- Velocidad de escape.

Es la velocidad mínima con que debe ser lanzado un cuerpo para escapar de la atracción gravitatoria ejercida por el planeta en cuyas proximidades se encuentra.

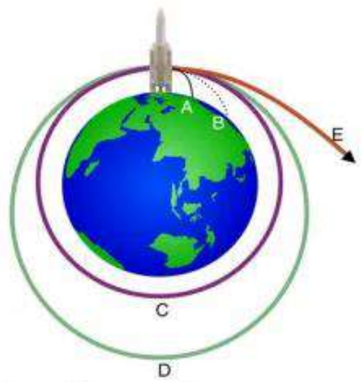
Se considera que un cuerpo escapa del campo gravitatorio del planeta cuando llega a una distancia infinita del planeta (Ep=0) con velocidad nula (Ec=0). Entonces, su energía mecánica debe ser nula y por el principio de conservación de la energía mecánica obtendremos la velocidad de escape:

$$E_{c\ en\ planeta} + E_{p\ en\ planeta} = E_{c\ en\ \infty} + E_{p\ en\ \infty} = 0$$

$\frac{1}{2}mv_e^2 + \left(-G\frac{Mm}{r}\right) = 0 \rightarrow \boxed{\boldsymbol{v_e = \sqrt{\frac{2GM}{r}}}}$ que **para la Tierra**, al ser g= $G\frac{M}{r}$ resulta $\boxed{v_e = \sqrt{2gr}}$

Esta fórmula es igual para cualquier planeta siendo g y r la gravedad y radio de dicho planeta.

En el tercer volumen de los *Principia* de Newton se presenta el concepto de velocidad de escape mediante un ejemplo con un cañón que dispara proyectiles desde la cima de una montaña (ver figura). Cuando el proyectil se lanza a una velocidad inferior a la velocidad orbital, este colisiona contra la Tierra siguiendo la **trayectoria del tiro parabólico o tiro horizontal** desde una altura (casos A y B). Cuando el proyectil se lanza a una velocidad igual a su velocidad orbital, este entra en órbita alrededor de la Tierra siguiendo una **trayectoria con forma de circunferencia** (caso C). Cuando el proyectil se lanza a una velocidad superior a la velocidad circular, pero inferior a la de escape, este entra en órbita alrededor de la Tierra siguiendo una **trayectoria elíptica,** en la cual la Tierra ocupa e l primer foco (caso D). Cuando el proyectil se lanza a una velocidad igual a la de escape, el segundo foco de esta elipse se encuentra en el infinito y, en consecuencia, se trata de una **parábola** (caso E). Cuando el proyectil se lanza a una velocidad superior a la de escape, este sigue una órbita abierta llamada **hipérbola.**



https://www.redshift-live.com/en/magazine/articles/Exploring_Space/8671-Rocket_speed-1.html

- Tipos de órbitas de los satélites.

Según el uso que se le va a dar al satélite este se situará en distintos tipos de orbitas:

Órbita LEO (Low Earth Orbit, órbita baja).
Comprende alturas entre los 160 y 2.000 km. Los satélites en estas órbitas cercanas necesitan moverse a gran velocidad respecto de la superficie terrestre, completando una vuelta en alrededor de 90 minutos a varias horas. Aquí se sitúan la Estación Espacial Internacional, la mayoría de los satélites meteorológicos, de observación de la Tierra, de datos geológicos y muchos de comunicaciones en los que es importante la baja latencia.

Órbita MEO (Medium Earth Orbit, órbita media).
Se halla entre los 2.000 y 35.786 km de altura. Su periodo orbital es inferior a 24 h, con un promedio de 12 horas. Aquí se sitúan los satélites de posicionamiento global (GPS, Galileo, GLONASS, BeiDou), además de algunos satélites de defensa y observación.

Órbita GEO (Geostationary Equatorial Orbit, órbita geoestacionaria).
Situada a 35.786 km de altura sobre el ecuador. Su periodo orbital es de 24 horas y permanece fija respecto a un punto de la Tierra. Aquí se ubican los satélites de televisión, internet, telefonía y meteorología geoestacionaria.

Órbitas HEO (High Earth Orbit).
Son órbitas situadas por encima de los 35.786 km, con un periodo orbital superior a 24 horas. Pueden ser circulares o elípticas.
Existen dos tipos principales:

- High Earth Orbit circular: órbitas altas por encima de GEO, con aplicaciones limitadas.
- Highly Elliptical Orbit (órbita altamente elíptica): muy excéntricas, usadas para cobertura en altas latitudes (ej. órbitas Molniya y Tundra), donde GEO no es efectiva.