Notas de Morfología de Superficies

Tabaré Gallardo

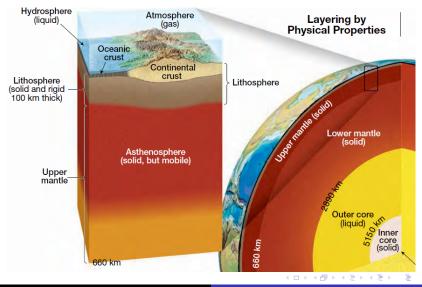
www.fisica.edu.uy/~gallardo

Facultad de Ciencias Universidad de la República

Planetología y Física Solar 2015



Litosfera y corteza



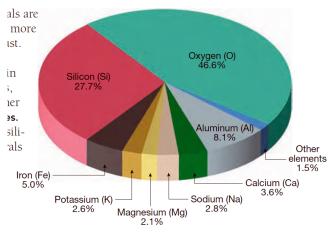


FIGURE 2.20 Relative abundance of the eight most abundant elements in the continental crust.

MINERALES

Compuestos químicos separables mecánicamente de las rocas.

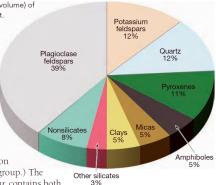
- Elementos nativos: Ni-Fe, grafito, diamante, plata, oro, ...
- Sulfuros (-S): pirita (FeS₂)
- Haluros (-Cl, -F, -Br, -I): fluorita (CaF₂)
- Óxidos e Hidróxidos (-O, -OH): espinela (MgAl₂O₄), cuarzo (SiO₂, silice), hematita (-Fe₂O₃), corundum (Al₂O₃), rubi, zafiro. Segundos más abundantes en la corteza terrestre.
- Carbonatos, nitratos (-CO₃): calcita (CaCO₃)
- Sulfatos (-SO₄): anhidrita (CaSO₄)
- Fosfatos (-PO₄)
- Silicatos (-SiO₄): olivina ((Mg₂, Fe₂)-SiO₄), piroxenos (-(Si,Al)₂O₆)), feldespatos, micas, enstatita, talco, topacio. Son los más abundantes en la corteza de los planetas terrestres.
- Hielos: H₂O, CO₂, NH₃, CH₄
- Compuestos carbonosos: en meteoritos, asteroides y cometas



FIGURE 2.25 Estimated percentages (by volume) of the most common minerals in Earth's crust.

glassy to pearly. As one component in a rock, feldspar crystals can be identified by their rectangular shape and rather smooth shiny faces (see Figure 2.24).

Two different feldspar structures exist. One group of feldspar minerals contains potassium ions in its structure and is therefore referred to as potassium feldspar. (Orthoclase and microcline are common members of the potassium feldspar group.) The other group, called plagioclase feldspar, contains both



- Cuarzo y feldespato son menos densos y los más abundantes en la corteza terrestre. El 60 % de las rocas en la superficie terrestre son feldespatos.
- Olivina y piroxeno son mas densos y se supone constituyen una parte importante del manto.

ROCAS

Compuestas por combinaciones de minerales.

- Primitivas: no fueron transformadas por calor o presión (en meteoritos, asteroides, cometas).
- Igneas: por enfriamiento de magma (basaltos, granitos, obsidiana, anortosita, mica, diorita).
- Sedimentarias: a partir de depositos generados por erosión (arcilla (clay), esquisto (shale), arenisca (sandstone), caliza (limestone), estalactitas, antracita). De origen organico: ambar, tiza (chalk), corales, calizas.
- Metamórficas: transformaciones mecánicas, químicas, calor (marmol (carbonatos), cuarcita (cuarzo), anfibolita, gneiss, pizzara (slate)).
- Breccias: fragmentos de diversas rocas cementadas en zonas de impacto o gran presión tectónica.

ROCAS IGNEAS

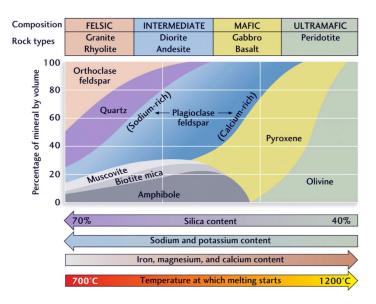
Por lugar de formación:

- Formada en superficie: enfriamiento rápido, volcánicas, cristales de grano fino (basaltos, obsidiana). Los basaltos son las rocas mas abundantes en el SS.
- Formada bajo superficie: enfriamiento lento, plutónicas, cristales grandes (granitos).

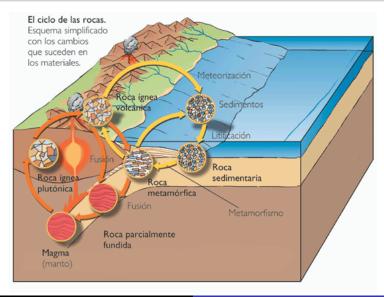
Por contenido de sílice:

- Bajo contenido de sílice (SiO₂, silica): basaltos, oscuros, 40 % silice + olivino y piroxeno
- Alto contenido de sílice: granitos, coloridos, 70 % silice + feldespatos y cuarzo.





El ciclo de las rocas



PROCESOS GEOLÓGICOS

- Gravitación y Rotación
- Tectónica
- Vulcanismo
- Efectos Atmosféricos
- Impactos

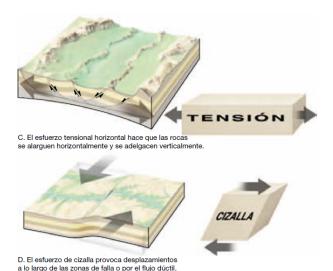
GRAVITACIÓN Y ROTACIÓN

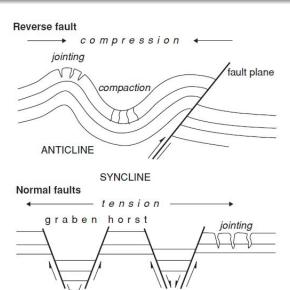
- definen forma
- equilibrio isostático: tiende a suavizar variaciones en g
- mareas generan calentamiento y sincronía (o resonancia) spin-órbita (Mercurio y todos los grandes satélites)
- derrumbes
- eje de rotación se reorienta hacia la dirección del máximo momento de inercia (Marte, Vesta, Encelado)
- inestabilidad rotacional (en asteroides)

TECTÓNICA

- son deformaciones por movimientos de superficie
- compresión o expansión por cambios de temperatura
- plegamientos (folding), fallas (faults), fosa tectónica (graben),
 pilar tectónico (horst), montañas, fisuras (rilles), crestas
 rugosas (wrinkle ridges)
- tectónica de placas: son únicas en la Tierra, generan montañas y terremotos y reciclan corteza oceánica
- litósfera terrestre: basicamente son 12 placas que flotan sobre la astenósfera desplazándose algunos cms por año
- las rocas basálticas y densas del fondo oceánico se generan en grietas que expanden el fondo
- ciclo de Wilson: formación y destrucción de supercontinente, reciclaje oceánico con ciclo de 100 Myrs
- en Mercurio, Marte y Luna la litósfera es muy gruesa, sólo hay movimientos verticales que generan fosas y pilares tectónicos







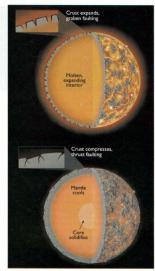
plegamiento o escarpa en Mercurio



See 12. Discovery Rupes, one of the longest lobate scarps on learn, extends 500 km and is up to 2 km high in some places. Honests two craters, and the foreshortening seen in their loon agust that Discovery is a thrust fault caused by moustonal trees in the crust.

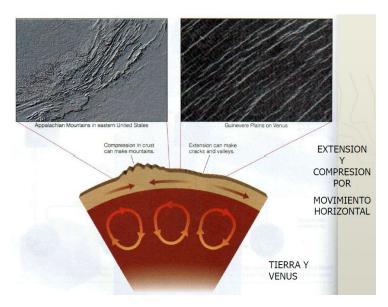
le-titlen bain, on the Moon's far side, is 2,600 km across.) the analysmic Calois' impact occurred about 3.85 billion tangowhen an object roughly 150 km across struck Merayan the earney equivalent of a trillion 1-megaton hydromiums. It was an event with global consequences from the tanglated, and its manifestations are not limited to the use plant, and its manifestations are not limited to the

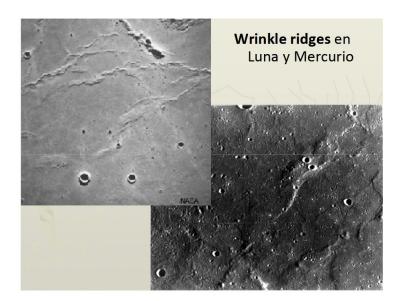
Bocumple, at the basin's antipode (the spot on Mercury 30 from the impact site) is an unusual tract of terrain unlike morker in the solar system. Roughly the size of France and Germay combined, it consists of numerous hills and depression that crosscut the preexisting landforms (Figure 10). The



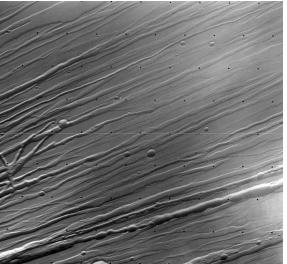
EXTENSION
Y
COMPRESION
POR
MOVIMIENTO
RADIAL

LUNA, MERCURIO, MARTE

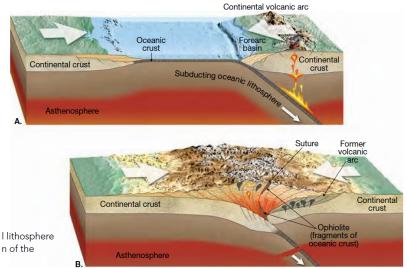


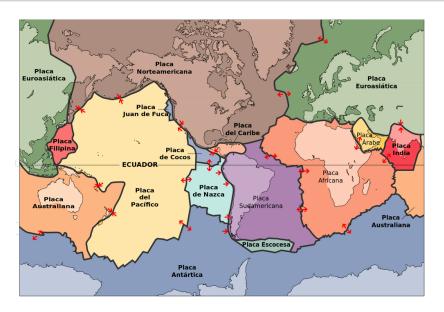


pilares y fosas tectónicas en Marte



tectonica de placas en la Tierra

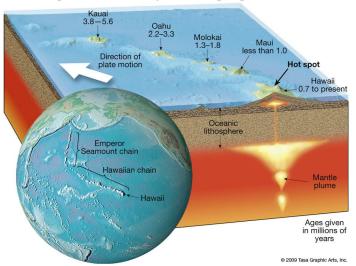




VULCANISMO (o volcanismo)

- generan cambios superficiales y atmosféricos (Venus, Io, etc)
- se requiere magma interior, es decir calor (por acreción, mareas, fricción, decaimiento radioactivo)
- en lugares de colisión de placas (caso Tierra) o en ruptura de corteza debido a penachos (plumes) que generan puntos calientes (hot spots) como Hawaii
- generación de canales internos de lava que luego colapsan (Luna, Venus, Marte)
- transporte de calor, volátiles y materiales radioactivos desde el interior a la superficie

puntos calientes generados por penachos





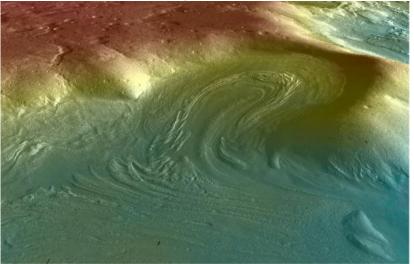
EFECTOS ATMOSFÉRICOS

- si la presión es alta existen líquidos que generan modificaciones mecánicas y físicas (Tierra, Marte, Titan)
- protección contra proyectiles, rayos cósmicos y fotones ionizantes
- hielos subsuperficiales: CO₂ en Marte, H₂O en Tierra, CH₄ en Titan, N₂ en Plutón y Tritón
- glaciares: arrastre de rocas, generación de valles
- vientos generan dunas
- desgaste químico

glaciar



huellas de glaciares en Marte



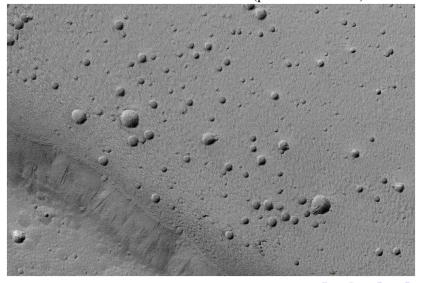
dunas en Marte



tornados de polvo en Marte

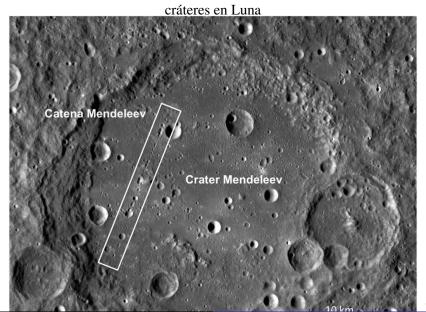


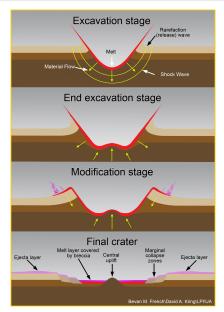
Dolinas: falsos crateres en Marte (por hundimientos)



CRÁTERES DE IMPACTO

- casi todos circulares, abundantes en cuerpos sin atmósfera
- colisiones hipersónicas: decenas de km/seg, presión Mbars
- diámetro de cráter varias veces el diámetro del proyectil (Arizona: 30 y 1200 m)
- tipos: **microcrater** (hasta 1 cm, en cuerpos sin atmósfera generados por colisiones de polvo), **simples** (hasta 1 km, forma de bowl, depresión $\sim D/5$), **complejos o grandes** (hasta 100 km, suelo llano y pico central), **basamentos multianillos** que forman montañas
- etapas de formación: contacto y compresión por onda de choque, excavación y eyección de material, colapso.
- desgaste: la atmósfera terrestre borra un cráter de 1 km en 1 Myr.
 En sup. heladas desaparecen por flujos plásticos. Vulcanismo.
- Regolito: resultado del efecto sistemático de microimpactos que pulverizan la superficie generando una capa de varios metros

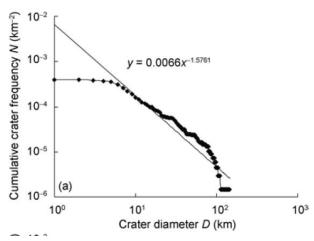




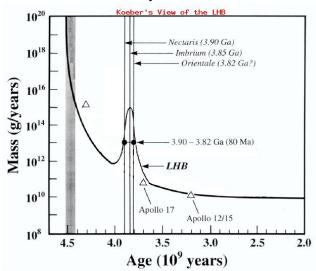
CRÁTERES: DENSIDAD Y TASA

- número de cráteres con diámetro $\geq D$ dado por $N_c(D) = aD^{\alpha}$
- dados a, α puede existir un D_{sat} a partir del cual para $D < D_{sat}$ la superficie está saturada y la curva se quiebra
- tasa muy alta en el pasado: Late Heavy Bombardment (LHB)
- tasa actual en la Luna para $D > 4 \text{ km} \sim 2.7 \times 10^{-14} \text{ cráteres por km}^2 \text{ por año}$
- coherente con los 20 cráteres nuevos (entre 2 y 120 m) observados por Mars Orbiter en 5 años
- la edad de las superficies puede determinarse por la distribución de cráteres usando la lunar como referencia
- variaciones en la tasa: la destrucción de un asteroide en el cinturón genera un incremento del flujo
- distribución compleja: saturación, destrucción de cráteres por erosión, variaciones en flujo

distribución cumulativa de cráteres

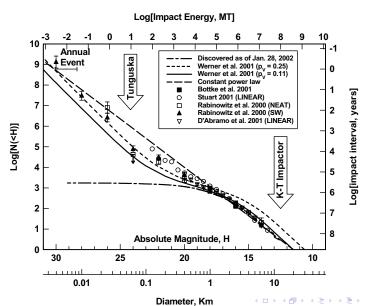


Late Heavy Bombardment



PROYECTILES

- para los terrestres: asteroides y cometas
- para los jovianos y sus satélites: centauros y TNOs
- 10000 toneladas por año caen a la Tierra
- 7200 meteoritos con *R* > 2 cm llegan a la superficie por año (¿cuántos caen en Uruguay?)
- hace 65 Myr: extinción Kretácico-Terciario, capa de iridio y cráter Chicxulub (asteroide de 10 km)
- hace 252 Myr: extinción Pérmico-Triásico de 80 % de especies (¿vulcanismo masivo o impacto?)



INTERACCIÓN CON LA ATMÓSFERA

- presión aerodinámica de la atmósfera sobre el proyectil $\frac{1}{2} \rho_{\it atm} V^2$
- si la masa de atmósfera barrida es comparable a la del proyectil habrá frenado sustancial
- ejemplo: proyectil metálico requiere $R \ge 1$ m para impactar a hipervelocidad en suelo
- proyectil sufre ablación, se genera gran gradiente de T y debido a baja conducción puede explotar (airburst) antes del impacto (Tunguska, 30 m en 1908 y Chelyabinsk, 17 m en 2013).
- poder destructivo del airburst depende de altura y energía cinética del proyectil
- Venus: huellas oscuras de airbursts



Geología de algunas superficies

¿CÓMO CONOCEMOS LAS SUPERFICIES?

- análisis de muestras: Tierra, Luna, Marte, Vesta,
- estudios in situ: Luna, Marte, Venus, Mercurio, Titan, Júpiter, Eros, Itokawa, Tempel 1, Chury, Ceres ...
- sensoramiento remoto: espectro visible e infrarrojo, espectroscopia de neutrones y de rayos gamma

CORTEZAS: etapas evolutivas



CORTEZAS: etapas evolutivas

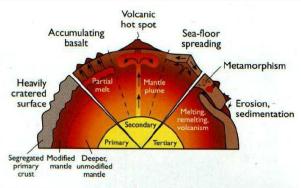


Figure 5. Various mechanisms lead to the formation of a planet's primary, secondary, and tertiary crusts. Primary crust, created early in planetary history, is still preserved in places like the lunar highlands. Partial melting of the mantle and volcanic activity lead to the formation of secondary crusts, largely of basaltic composition. Tertiary crust results from the recycling of primary and secondary crust, as is typified by Earth's continents and (perhaps) the tessera terrain of Venus.

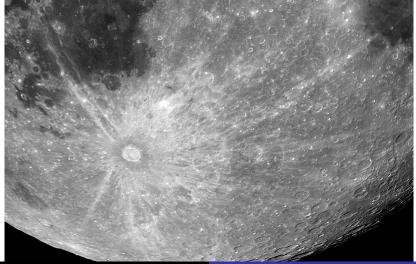
LUNA

- 80 % superficies altas con albedos 0.11 a 0.18, saturadas de cráteres, edad 4.4 Gyr regolito de 15 m
- 16 % superficies bajas con albedos 0.07 a 0.10, dirigidos hacia la Tierra, edad 3.1 a 3.9 Gyr regolito de 2 a 8 m. Son los mares, compuestos de basalto, magma que afloró por impactos anteriores
- polo sur: cráter multianillo cuenca **Aitken** de D=2500 km, el mayor del SS
- muy poca agua en sus minerales
- breccias por impactos, anortositas, KREEP
- poco vulcanismo
- wrinkle ridges



Luna

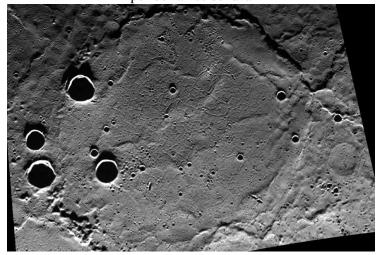
Crater reciente Tycho y mar de basalto.



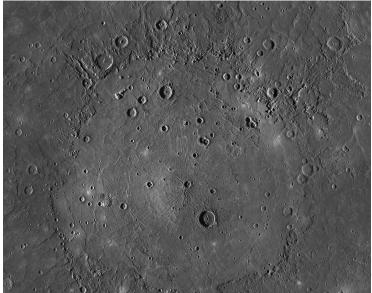
MERCURIO

- planicies intercráteres de 3.8 Gyrs con mayor albedo que los mares lunares
- impacto: basamento **Caloris** de D = 1550 km con anillos de 2 km de altura y terreno caótico en antípodas.
- wrinkle ridges por contracción de corteza
- capa de 50 m de hielo en los polos, posible fuente: cometas

detalle de planicie intercráter en Mercurio con antiguo cráter cubierto por derrames de lava



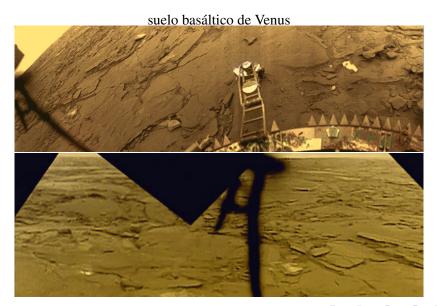
antiguo cráter Caloris cubierto por derrames de lava



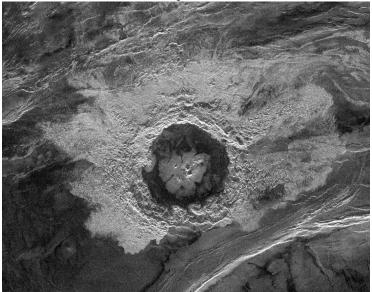
VENUS

- imágenes en infrarrojo y radio de Magallanes, visible de Veneras.
- basaltos, roca sólida y seca
- superficies altas: Isthar Terra, Afrodita Terra
- histograma unimodal de elevaciones
- poca erosión: vientos de 1 m/seg, algunas dunas
- miles de volcanes
- panqueques o domos circulares de 1 km de alto y hasta 50 km diametro: lava muy viscosa
- coronas: anillos concéntricos, en puntos calientes
- aracnoides: formaciones circulars con grietas radiales, probable terreno hundido
- tectónica importante: superficie joven $\sim 10^8$ años, pocos cráteres

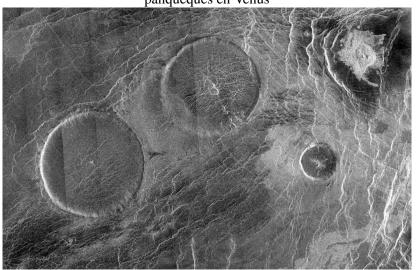


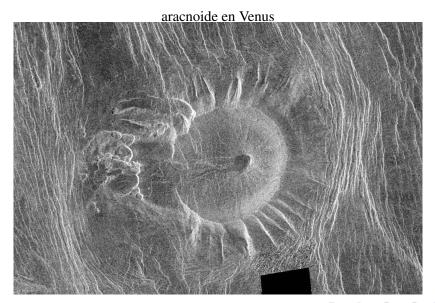


cráter de impacto en Venus

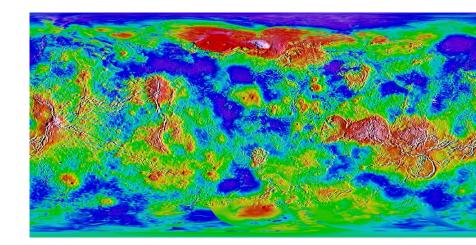


panqueques en Venus





planisferio Venus



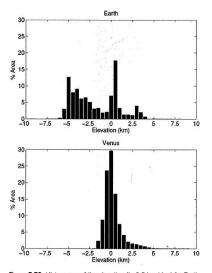


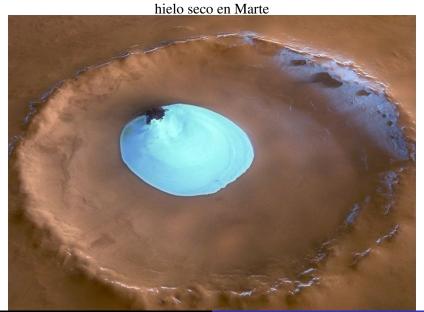
Figure 5.53 Histograms of the elevation (in 0.5 km bins) for Earth and Venus, normalized by area. Note the multiple peaks for Earth and the single peak for Venus. (Smrekar and Stofan 2007)

MARTE

- color rojo debido a óxidos
- hemisferio sur tipo Luna, elevado entre 1 y 4 km, con muchos cráteres, edad 4.45 Gyr
- hemisferio norte llano, nivel bajo, edad de 3 a 3.5 Gyr
- dicotomía crustal: ¿gran impacto o convección del manto?
- Tharsis: 4 volcanes gigantes + sistema de cañones (Valle Marinieris)
- volcanes gigantes en el ecuador, si se formaron en otras latitudes los polos debieron migrar por conservación de momento
- Valle Marinieris de 4000 x 600 x 7 km formado por tectónica que da lugar a flujo subterráneo y luego sedimentación
- hielo permanente en los polos, efectos de glaciares de hace algunos millones de años
- ALH84001: roca marciana formada hace 4.5 Gyr, eyectada hace 16 Myr, impactó en Antártida hace 13000 años.



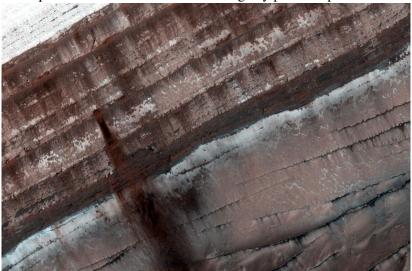
dunas del Norte cubiertas de hielo seco en Marte



depósitos sedimentarios en cráter Gale en Marte



depósitos estratificados de hielo de agua y polvo en polo norte

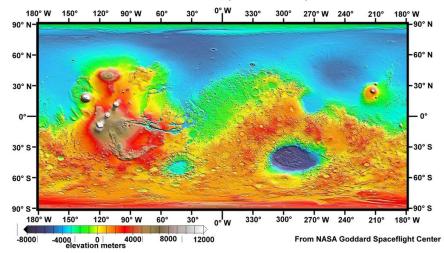


erosion por deshielo subsuperficial en Marte



dicotomía crustal de Marte

Color-coded Elevations on Mars, MOLA Altimeter, MGS Mission



SATÉLITES GALILEANOS

- Io rocoso, elipsoide triaxial, sin cráteres, 400 volcanes, flujo 25 veces superior al terrestre, el interior no puede disipar por conducción, se funde y genera actividad volcánica. Origen del calor: mareas de Júpiter y resonancia laplaciana.
- Ganímedes diferenciado, 50% rocas, 50% hielos, crateres sobre el hielo.
- Callisto homogéneo, 50 % rocas, 50 % hielos
- Europa: 20 km de hielo superficial y luego 100 km de océano, intensa tectónica en el hielo

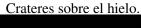




Tabaré Gallardo

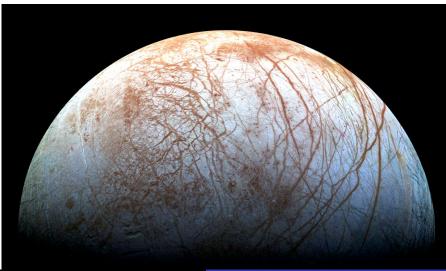
Morfología de superficies

Ganimedes





Europa



Tabaré Gallardo

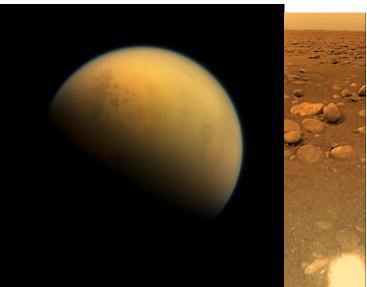
Europa



TITÁN

- superficie generada por criovulcanismo
- presenta erosión por fluídos
- edad inferior a 1 Gyr
- dunas
- bloques (cantos rodados) de metano sólido en la superficie

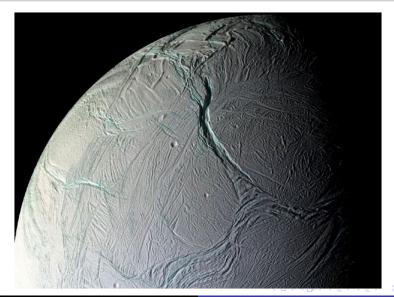
Titán



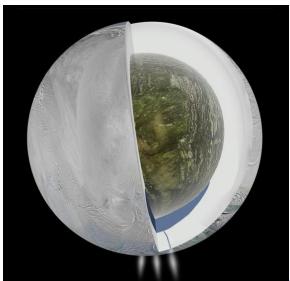
OTROS SATÉLITES DE SATURNO

- Encelado: un hemisferio muy joven 1 Myr y otro muy viejo 1
 Gyr, albedo ~ 1 (hielo puro), géiseres de agua en el polo sur que alimentan el anillo E
- Iapetus: hemisferio de avance oscuro con depósitos orgánicos
- Mimas: el objeto más craterizado del SS, extraña distribución de temperaturas
- Hyperion: muy poroso, rotación caótica

Encelado



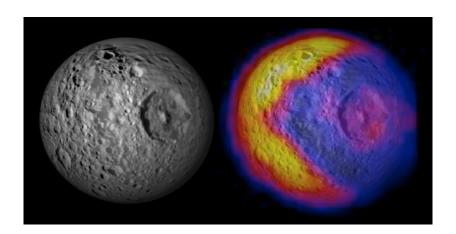
Encelado



Iapetus



Mimas



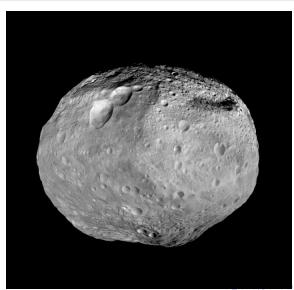
Hyperion



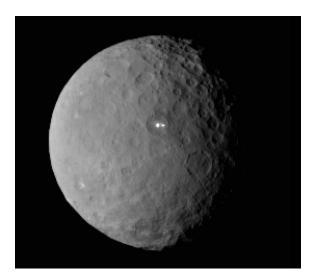
OTROS

- Vesta: olivina ausente en el cráter de su hemisferio sur pero presente en cráteres menores
- Ceres: hielo subsuperficial?
- Itokawa: pila de escombros
- Hartley 2: cuello de regolito
- Churyumov-Gerashimenko: hielos, material no diferenciado
- Miranda (Urano): superficie reprocesada
- Tritón (Neptuno): T=38 K, albedo 0.9 por condensación cíclica de hielos, $e\sim 0, i=159$, ¿origen por captura?, rotación sincrónica

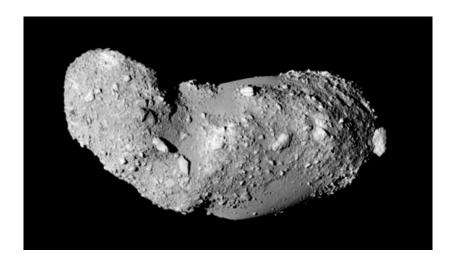
Vesta



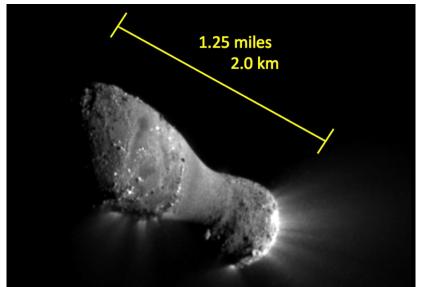
Ceres



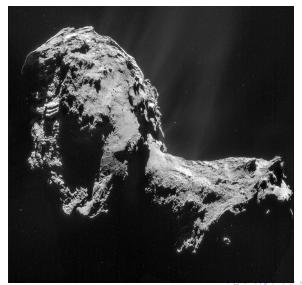
Itokawa



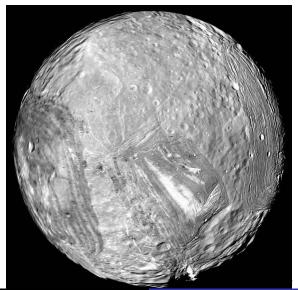
Hartley 2



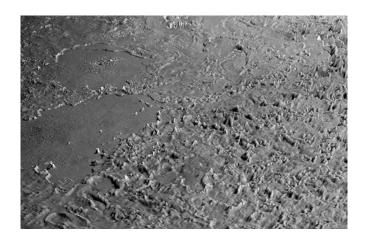
Churyumov-Gerasimenko



Miranda



Tritón



Bibliografía

- Ciencias de la Tierra, Tarbuck y Lutgens
- Essentials of Geology, Lutgens, Tarbuck y Tasa
- Fundamental Planetary Science, Lissauer y de Pater
- The Cosmic Perspective, Bennet y otros
- The New Solar System, Beatty y otros
- photojournal.jpl.nasa.gov