

PLANETOLOGÍA COMPARADA

Gómez Samus, Mauro - Rodrigues Capitulo, Leandro

1. INTRODUCCIÓN:

Este trabajo monográfico fue realizado para la cátedra de Geología Argentina de la carrera de Licenciatura en Geología de la Facultad de Ciencias Naturales y Museo, de la Universidad Nacional de La Plata (UNLP) en el mes de abril del año 2008.

El informe realizado pretende comparar los estadios de evolución tectónica de los planetas Marte, Venus y el satélite natural terrestre Luna en relación con los conocimientos obtenidos sobre el planeta Tierra.

El marco de comparación se basa en los siguientes criterios:

- Tamaño de los cuerpos celestes en cuestión y la relación de su tamaño con la pérdida de calor interno.
- Densidad promedio de los cuerpos.
- Distribución de las capas internas de los planetas y satélites en estudio.
- Estructuras superficiales observadas por distintas sondas espaciales.
- Tipo de rocas halladas u observadas en superficie de los cuerpos celestes.
- Presencia o no de agua en estado sólido, líquido o gaseoso en la atmósfera o superficie de los cuerpos.
- Existencia o no existencia de campos magnéticos activos, magnetismo o paleomagnetismo en las rocas de los planetas y satélites estudiados.
- Presencia de actividad volcánica actual o extinta.

Los datos utilizados corresponden a la información publicada por diversas agencias espaciales, entre las que se encuentran la Agencia Estadounidense del Espacio y Aeronáutica (NASA), el Programa Espacial Soviético, la Agencia Espacial Rusa, la Agencia Espacial Europea (ESA), etc.

Como contraparte existe aún una falta de información adecuada en muchos aspectos, o incertidumbres interpretativas de los datos obtenidos. Esto lleva a discusiones y a diferentes propuestas, que en general no poseen un grado de aceptación unánime. Estos problemas se ven acrecentados sobre todo en Venus, donde los datos son escasos, las imágenes de radar son recientes y muchos de los datos presentados por las agencias espaciales corresponden a distintas inferencias realizadas por sus científicos.

2. LUNA:

La Luna es el satélite natural terrestre, conforma con la Tierra el sistema de traslación TIERRA-LUNA con un centro de masa entre ambos, desplazándose alrededor del Sol. La Luna está a 384.403 kilómetros de la Tierra. Su diámetro es 3.476 kilómetros, este tamaño es inusualmente grande teniendo en cuenta que se trata de un satélite natural. Su densidad promedio ($3,34 \text{ g/cm}^3$) es menor a la densidad media terrestre ($5,5 \text{ g/cm}^3$).

2.1 ORIGEN DE LA LUNA

En lo que respecta a la formación de la Luna hay 5 hipótesis:

- HIPÓTESIS DE FISIÓN
- HIPÓTESIS DE CAPTURA
- HIPÓTESIS DE ACRECIÓN BINARIA
- HIPÓTESIS DE PRECIPITACION
- HIPÓTESIS DE IMPACTO

La *hipótesis de fisión* propone que originariamente la Tierra y la Luna eran un sólo cuerpo y que parte de la masa fue expulsada debido a la fuerte aceleración rotatoria que en aquel momento experimentaba la Tierra. La *hipótesis de captura* supone que la Luna era un cuerpo independiente, formado en un momento distinto que la Tierra y en un lugar alejado y fue atrapado por la gravedad terrestre. La *hipótesis de acreción binaria* propone que la Tierra y la Luna se formaron al mismo tiempo a partir del mismo material y en la misma zona del Sistema solar. La *hipótesis de precipitación* supone que la energía liberada durante la formación de nuestro planeta calentó parte del material, formando una atmósfera caliente y densa, luego al enfriarse precipitaron los granos de polvo dando origen a La Luna.

Todas las hipótesis sobre la formación de la Luna presentan uno o mas puntos de incertidumbre por lo cual no pueden llegar al rango de teoría.

Nosotros tomaremos como válida la Hipótesis de impacto siendo esta la mas aceptada en la actualidad, aunque también presenta una serie de problemas. La *hipótesis de impacto* propone que hace 4560 millones de años un cuerpo celeste de gran tamaño (se supone del tamaño de Marte) impactó contra la superficie terrestre. Este fenómeno se produjo 30 millones de años después de la formación de la Tierra. En ese periodo (Hádico) la superficie terrestre se encontraba aún en estado semi-fundido por lo que esta colisión logró poner en orbita fragmentos terrestres incandescente, estos fragmentos en orbita se fueron acretando con el tiempo hasta formar la Luna.

2.2 ESTRUCTURA INTERNA DE LA LUNA

Durante el proyecto Apollo se colocaron 4 estaciones sísmicas lunares alimentadas por energía nuclear y controladas desde base en tierra. El origen de las ondas sísmicas provienen de impactos meteoríticos sobre la superficie lunar, originando estos los llamados *lunamotos* (equivalente lunar de los terremotos).

Como se indicaba en la pagina anterior la luna posee un diámetro 3476 Km. y una densidad promedio de $3,34 \text{ g/cm}^3$. Con estos datos, mas los proporcionados por la sísmica lunar y la hipótesis de formación (que eliminaría la existencia de un gran núcleo férreo) se evidenció una distinción de dos capas principales:

- CORTEZA
- MANTO

Algunos científicos proponen la existencia de un pequeño núcleo de hierro y níquel.

La *corteza* lunar a diferencia de la terrestre posee un espesor promedio mayor (80 Km.). Debido a la atracción generada por la gravedad terrestre siempre observamos el mismo lado de la Luna. En este lado visible la atracción gravitatoria terrestre genero que el manto este desplazado en la dirección de la Tierra quedando descentrado con respecto al centro geométrico, esto genera que la corteza del lado visible sea mas estrecha que la del lado oscuro. Los espesores rondan alrededor de 60 Km. para el lado visible y los 150 Km. para el lado oscuro. El espesor mas bajo del lado visible permitió en tiempos tempranos el ascenso de magma rellenando las cuencas de impacto y formando los llamados mares lunares. En cambio en el lado oscuro no hubo desarrollo de coladas basálticas por lo que se pueden encontrar mayor cantidad de cráteres de impacto. En cuanto al *manto* se sabe que su diámetro ronda los 3400 Km y es de composición máfica.



Fig2a. Se observan corteza, manto y el posible núcleo de bajo tamaño.

2.3 ACTIVIDAD TECTONICA EN LA LUNA

La Luna no posee actividad tectónica debido a que su litósfera es muy gruesa como para fragmentarse. Además su pequeño tamaño posibilitó una rápida pérdida de calor, quedando actualmente “geológicamente muerta”.

Aunque existen dos tipos de tectónica particulares:

- TECTÓNICA DE DILATACIÓN.
- TECTÓNICA DE IMPACTO.

La tectónica de dilatación se refiere a las estructuras de expansión formadas por un ascenso de calor inicial dado por la acreción de fragmentos durante su formación y a las estructuras de contracción dadas por el posterior enfriamiento. La tectónica de impacto se refiere a las estructuras formadas por la constante colisión de meteoritos sobre la superficie lunar.

Lo que si se puede apreciar es un antiguo magmatismo activo en la cara visible de la Luna (donde la corteza es más delgada). Estos derrames basálticos formaron los mares lunares hace

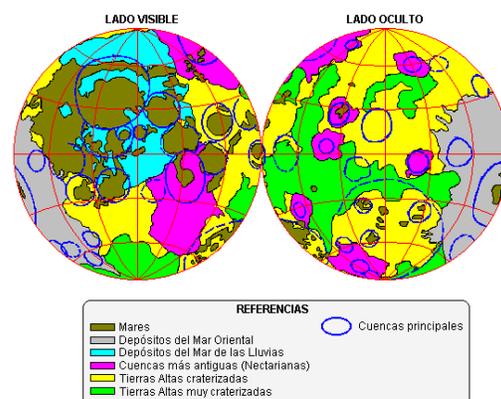


Fig. 2b. Distribución de derrames basálticos

3100-3800 millones de años. En la *fig. 2b* se puede observar la distribución de los derrames basálticos en la cara visible (izquierda) y la ausencia de estos en el lado oscuro (derecha).

2.4 MINERALOGÍA Y PETROLOGÍA LUNAR

Durante el proyecto APOLLO se recolectaron 382 Kg. de rocas lunares. Donde se encontraron basaltos, andesitas cálcicas, anortositas, rocas alóctonas con minerales propios de meteoritos y brechas de impacto. Estas rocas se encuentran en estado inalterado ya que la luna no presenta atmosfera, sólo se pudo distinguir algo de meteorización química debido a la intensa radiación solar y meteorización mecánica en los sectores afectados por impactos meteoríticos.

En el cuadro siguiente se pueden observar las composiciones mineralógicas de las rocas traídas de los mares lunares y de las zonas no inundadas por basaltos (tierras altas).

	Plagioclasa	Piroxeno	Olivino	Ilmenita
Rocas de las tierras altas				
Anortosita	90%	5%	5%	0%
Norita	60%	35%	5%	0%
Troctolita	60%	5%	35%	0%
Basaltos de los mares				
Alto contenido en titanio	30%	54%	3%	18%
Bajo contenido de titanio	30%	60%	5%	5%
Muy bajo titanio	35%	55%	8%	2%

3. MARTE

Marte es el cuarto planeta desde el Sol y suele recibir el nombre de Planeta Rojo. Las rocas, el suelo y el cielo tienen una tonalidad rojiza. Este característico color rojo fue observado por los astrónomos a lo largo de la historia. Los romanos le dieron nombre en honor de su dios de la guerra. Otras civilizaciones tienen nombres similares. Los antiguos Egipcios lo llamaron *Her Descher* que significa *el rojo*. Su diámetro es de 6794 km. y una densidad promedio de 3.9 gr/cm^3 . A diferencia de la Tierra posee dos satélites naturales llamados Fobos y Deimos.

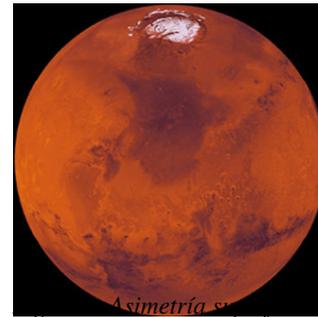
3.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES

La superficie de Marte es árida, llena de cráteres de impacto de todos los tamaños y edades; enormes volcanes, como el Olympus Mons (el volcán más grande del Sistema Solar, con una altura de 24 km y una base casi tan grande como la Península Ibérica), y gigantescos cañones, como el Valle de Marineris, de 4.000 km. de longitud (unas 10 veces el tamaño del Cañón del Colorado). Muchos de los procesos geológicos que ocurren en la Tierra también actúan o han actuado en Marte, sin embargo, los resultados son completamente diferentes.

Hay tres diferencias fundamentales entre la Tierra y Marte que determinan las características geológicas de ambos planetas:

1. **Tamaño:** el menor tamaño de Marte hizo que su núcleo se enfriara muy rápidamente, de manera que el flujo de calor y, por tanto, la actividad volcánica, es de menor magnitud comparados con los de la Tierra.
2. **Placa tectónica:** Marte es un planeta con una única placa tectónica, pues durante la formación del planeta, su menor tamaño y su mayor distancia al Sol hizo que se enfriara antes que la Tierra quedando su interior con una sola placa. No hay deriva continental, lo que explica la ausencia de grandes cadenas montañosas y la existencia de enormes volcanes en Marte: como la corteza no se mueve con respecto al manto, los volcanes siempre se alimentan de una misma fuente de magma, creciendo hasta que dicha fuente se agota. En la Tierra, por el contrario, el movimiento de las placas tectónicas arrastra los volcanes y los desconecta de su fuente de magma al cabo de un tiempo más o menos corto. Esto los inactiva y detiene su crecimiento.
3. **Temperatura:** la superficie marciana es muy fría. Aunque en verano puede alcanzar los 20 grados centígrados, la temperatura media diaria es de unos 50 grados bajo cero. En estas condiciones no existe agua líquida en la superficie de Marte. De hecho, se cree que el subsuelo marciano (al menos cerca de los polos) está congelado hasta profundidades de 1 km o más. La ausencia de agua líquida en el Marte actual hace que apenas haya erosión. Esto explica el extraordinario estado de conservación de casi todas las estructuras geológicas visibles en su superficie.

Marte muestra una clara asimetría superficial (Fig. 3.1a). El hemisferio Sur está formado por llanuras muy craterizadas (por tanto muy antiguas) que se elevan entre 1 y 4 km sobre la superficie media del planeta. Las llanuras del hemisferio Norte, por el contrario, tienen pocos cráteres y se encuentran por debajo del nivel medio de la superficie. Aunque hay algunas excepciones: en el hemisferio Sur las balsas de impacto Arguire y Hellas con un diámetro de 900 y 1.800 km respectivamente se encuentran por debajo del nivel medio y en el hemisferio Norte Tharsis y Elyseum por encima. No se conoce el origen de esta asimetría, aunque lo más probable es que se deba a un enorme impacto que fundió la corteza del hemisferio Norte inmediatamente



después del periodo de intensos bombardeos de planetesimales que tuvieron lugar en el Sistema Solar interior hace 3.800 millones de años. Los antiguos cráteres de las llanuras del Norte habrían desaparecido cuando el impacto fundió la corteza, mientras que los del Sur se mantuvieron intactos.

3.2 EL INTERIOR DE MARTE

El conocimiento que hoy se tiene del interior de Marte sugiere que puede ser modelado como una estrecha cáscara, similar a la de la Tierra, un manto y un núcleo.

Utilizando cuatro parámetros se puede determinar el tamaño y la masa del núcleo de Marte. Sin embargo, solo se conocen tres de los cuatro: la masa total de Marte, su tamaño y el momento de inercia.

La masa y el tamaño del planeta se determinaron con precisión en misiones anteriores. El momento de inercia se determinó a partir de los datos obtenidos por la nave Viking y los datos Doppler del Pathfinder, registrados durante las mediciones de la velocidad de rotación de Marte. El cuarto parámetro, necesario para completar el modelo del interior, se obtendrá en misiones futuras. Con los tres parámetros conocidos, el modelo está bastante limitado. Si el núcleo marciano es denso

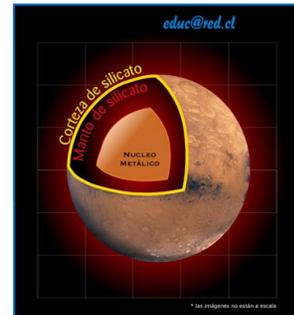


Fig 3.2b Estructura interna de Marte.

(compuesto de hierro) como el de la Tierra o de los meteoritos SNC que supuestamente proceden de Marte, entonces el radio mínimo del núcleo es de unos 1300 kilómetros. Si el núcleo está compuesto por materiales menos densos como una mezcla de azufre y hierro, entonces el radio máximo sería probablemente inferior a los 2000 kilómetros.

3.3 TECTONICA DE PLACAS EN MARTE

El hallazgo de Bandas de rocas magnéticas como las observadas en el fondo oceánico terrestre, hace suponer que Marte en alguna vez tuvo tectónica de placas activa y que hubo un interior caliente con roca derretida y placas que se movían sobre tal superficie. Por lo tanto podemos inferir que el planeta rojo empezó igual que la tierra pero se quedó sin sus fuentes de energía interna y llegó a ser un planeta geológicamente muerto a muy temprana edad.

Los datos sugieren que Marte tuvo un campo magnético, pero que este dinamo desapareció, dejando como registro las bandas magnéticas en superficie. Los nuevos descubrimientos sugieren que Marte pudo haber tenido placas de tamaño similar al de los continentes terrestres, y que estas se movían lentamente empujadas por el flujo de magma que ascendía por enormes fracturas hasta la superficie.

La energía que calentaba las rocas aparentemente se perdió en los primeros cientos millones de años. Este enfriamiento habría ocurrido más rápido (a comparación de la Tierra), debido a que este planeta es más pequeño, y por consiguiente menor energía interna, es decir menos energía generada por fricción y decaimiento de minerales radiactivos.

3.4 RASGOS ESTRUCTURALES DE LA TECTONICA DE PLACAS

La actividad de las placas continentales, o tectónica de placas, es la responsable de la deriva continental, de la formación de las cuencas oceánicas y de los terremotos en nuestro planeta. Se cree que, en Marte, estas fuerzas tectónicas han cesado desde hace mucho tiempo. La imagen muestra fallas curvas, que llegan a medir hasta 1.700 mts. de profundidad, que se han abierto en la cadena montañosa Acheron del planeta rojo.

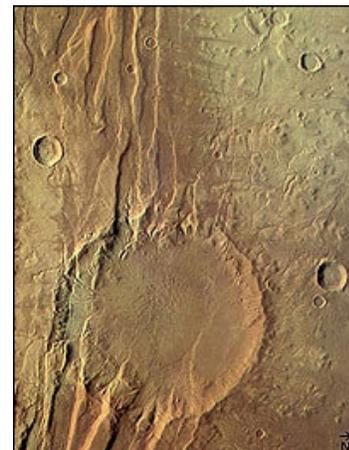


Fig3.4a Acheron Fossae: Las fallas cortan un cráter de impacto

La región, conocida como Acheron Fossae (Fig 3.4a), marca el extremo norte de la meseta Tharsis y se encuentra a unos 1.000 km. al norte del enorme volcán Olympus Mons, el más alto de los volcanes de todo el sistema solar.

La *Zona de Ruptura* corresponde a parte de una red de fracturas que irradian desde el “abultamiento Tharsis”, un área de elevación regional donde alguna vez hubo una intensa actividad volcánica. Las fallas que se muestran en las imágenes fueron creadas por un proceso de elevación: las fracturas en la corteza se formaron cuando el material caliente que salía de las profundidades del manto marciano empujó hacia arriba a la litósfera (capas superficiales de roca) que yacía encima. Cuando las tensiones se hicieron demasiado grandes, la quebradiza corteza que estaba sobre la litósfera se rompió a lo largo de zonas de debilidad. La zona de Acheron Fossae podría ser similar a algunas zonas de hendidura en la Tierra, tales como el Rift Valley en África oriental, donde se están separando unas placas continentales.

Los especialistas llaman a Acheron Fossae a un sistema de “Horst y Graben”.

Los restos de la topografía pre-existente son llamados “horsts”. Este patrón de fallas alteró algunos antiguos cráteres de impacto que se hallaban en el lugar.

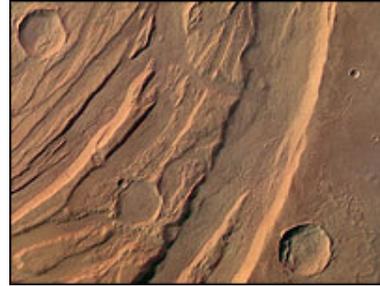


Fig 3.4b Acheron Fossae: Una intensa actividad tectónica dio forma a la región.

El Olympus Mons es una de las estructuras mas sobresalientes de Marte (Fig.3.4c), y ostenta ser el Volcán mas grande del Sistema Solar con 24 Km. de altura, es decir 3 veces el Monte Everest. Está flanqueado por grandes acantilados de hasta 6 Km. de altura, y su caldera tiene 85 Km. de largo, 60 Km. de ancho y 2,4-2,8 Km. de profundidad, pudiéndose apreciar hasta seis chimeneas superpuestas de cronología sucesiva.

Olympus Mons es un volcán en escudo en forma de caldera, formado como resultado de flujos de lava muy poco viscosa durante largos períodos de tiempo, y es mucho más ancho que alto; la pendiente media del monte es muy suave.

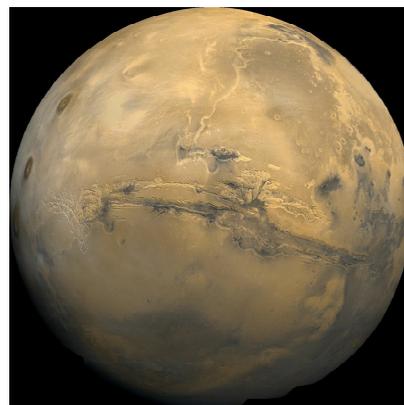


Fig 3.4c Olympus Mons

Otro rasgo importante es el Valle de Marineris, el cual es un gigantesco sistema de cañones que recorre el ecuador del planeta Marte justo al Este de la región de Tharsis. Sus dimensiones son de 4.500 Km. de longitud, 200 Km. de anchura, y 11 Km. de profundidad máxima.

Su origen esta en discusión, pero hay dos teorías que son las mas aceptadas:

1. Por acción erosiva del agua o la actividad termokárstica, es decir, aguas productos de la fusión de permafrost que pudiera existir debajo del suelo marciano.
2. En la actualidad, la teoría más aceptada es la que expone que Valle Marineris es en verdad una falla tectónica, similar a la del Gran valle de Rift de la Tierra, y posteriormente agrandada por la erosión y los derrumbes sucesivos de los muros de falla.



4. VENUS

Venus es el segundo planeta del sistema solar, se encuentra a 108×10^6 Km. del Sol. y a 39.514.827 Km. de La Tierra. Se dice que Venus es el planeta hermano de la Tierra porque posee un tamaño y una densidad similares además de una misma edad de formación. En la figura 4a se puede ver el tamaño de Venus en comparación al tamaño terrestre. La gran diferencia existente entre Venus y la Tierra consiste en que Venus posee una atmósfera muy rica en CO_2 , esto genera un gran efecto invernadero, donde la temperatura promedio oscila en los 480°C (mayor que Mercurio) provocando que si alguna vez tuvo H_2O , esta se volatilice y escape del sistema.



Fig. 4a. Venus (izquierda), Tierra (derecha)

Uno de los grandes problemas es que la densa atmósfera de CO_2 trae inconvenientes para su observación ya que la cobertura de anhídrido carbónico hace la suerte de espejo. Recientemente a partir de la década del noventa se pudieron obtener imágenes de radar de su superficie.

4.1 ESTRUCTURA INTERNA DE VENUS

Al igual que la Tierra, Venus se divide en 3 capas composicionales principales: CORTEZA – MANTO – NÚCLEO. Donde la corteza tendría una parte sialica (equivalente a la continental terrestre) y una máfica (equivalente a la oceánica terrestre). Se supone un manto similar al terrestre y un núcleo férreo. En la figura 4b se observan las 3 capas composicionales supuestas para Venus. Existe un alto grado de discusión con respecto a las capas mecánicas venusinas, si bien faltan datos para establecer conclusiones, existen publicaciones que apoyan la no existencia en Venus de astenósfera y la no existencia de un núcleo externo líquido, estas conclusiones se basan en que no se ha detectado un campo magnético actualmente activo. La contraparte que apoya la existencia de un núcleo líquido y astenósfera plantea que el campo magnético no fue descubierto aún, pero plantea su existencia.

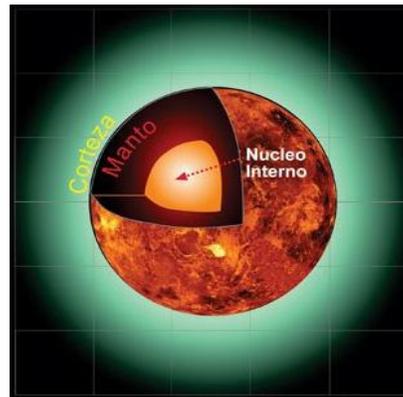


Fig. 4b. Estructura interna de Venus

4.2 SUPERFICIE DE VENUS

Las primeras imágenes de la superficie de Venus fueron realizadas en el año 1978 por la sonda Pioneer, pero estas eran escasas. Finalmente su superficie pudo ser estudiada a partir del año 1990 a través de las imágenes de radar enviadas por la sonda Magallanes.

A través de estas imágenes se evidenció una escasa corteza sialica con respecto a la corteza máfica, esto se manifiesta mediante la presencia de algunas pequeñas zonas elevadas (equivalente a continentes terrestres) en su superficie. En la figura 4c se observan en color castaño las elevaciones.

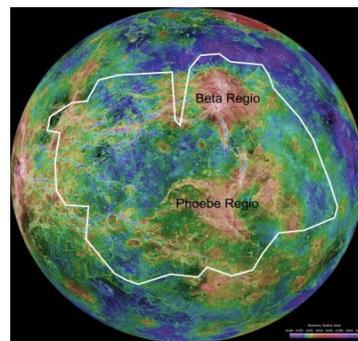


Fig. 4c. Superficie de Venus

En un estudio mas detallado de la superficie de Venus se observaron una serie de estructuras con equivalentes terrestres:

- PLEGAMIENTO
- FALLAMIENTO COMPRESIONAL, EXTENSIONAL Y DE TRASFORMACIÓN.
- CADENAS DE VOLCANES ACTIVOS ALINEADOS.
- GRANDES CADENAS MONTAÑOSAS.
- GRANDES CAÑONES Y VALLES DE RIFT.

4.3 TECTONICA DE PLACAS EN VENUS

En base a las estructuras enumeradas en el punto anterior se puede suponer que Venus cuenta con tectónica de placas, sin embargo, si se considera la ausencia de campo magnético (indicando la no presencia de núcleo en parte líquido) y la ausencia de astenósfera que proponen algunos autores, no se podría hablar de tectónica de placas.

Estas consideraciones llevaron a plantear dos hipótesis:

- **TECTONICA DE PLACAS LENTA E INCIPIENTE:** esta hipótesis estaría apoyada por la presencia de estructuras típicas de una tectónica de placas. La escasa cantidad de corteza sialica indicaría que Venus se encuentra en un estadio tectónico primitivo. La ausencia de agua impediría que el movimiento de placas se produzca con la velocidad de desplazamiento terrestre.
Los científicos que apoyan esta teoría indican que Venus posee campo magnético pero que aún no pudo ser detectado.
- **TECTONICA DE PLACAS AUSENTE:** esta hipótesis se apoya en la no existencia de campo magnético, en que no posee agua superficial y en la propuesta ausencia de astenósfera. Las estructuras que presentan similitud con las estructuras terrestres son explicadas por los científicos que apoyan esta teoría como producto de una intensa actividad magmática en una delgada y caliente corteza.

5. CONCLUSIÓN

Como conclusión de este trabajo podemos establecer diferencias en cuanto al grado desarrollo de una tectónica de placas, independientemente de otros rasgos, como ser, tamaño (Fig. 5a), atmósfera, densidad, Temperatura, distancia al sol, etc.

Respecto a la Luna podemos decir que, debido a su pequeño tamaño y génesis, esta nunca llegó a desarrollar una tectónica de placas activa, no obstante, en la superficie de esta se observan evidencias de un magmatismo incipiente en un breve lapso de tiempo.

En el caso de Marte y Venus, se trata de extremos opuestos, Marte por su parte carece de tectónica actual, sin embargo presenta estructuras que indicarían que en algún tiempo fue un planeta activo. En cambio Venus, según las últimas hipótesis, representaría el estadio temprano de la tectónica terrestre.

Por último, La Tierra presenta una tectónica de placas activa en la actualidad, estaría en un estadio desarrollo intermedio entre Marte y Venus.



Fig.5a. Diferencias de Tamaño entre el Satélite Luna, y los Planetas, de izq. a der., Marte, Tierra, y Venus.

6. BIBLIOGRAFÍA

1. Ciencias de la Tierra. Tarbuck
2. <http://www.solarviews.com>
3. <http://www.astromia.com>
4. <http://es.wikipedia.org>
5. <http://www.cte.edu.uy> (PDF. TECTONICA DE PLACAS EN PLANETAS TELURICOS. Alicia Castro – Claudino Fontaiña).
6. www.fisica.edu.uy (Contenido teórico en PDF del curso de ASTRONOMIA FUNDAMENTAL. Tabaré Gallardo).
7. <http://www.windows.ucar.edu/>