



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN Y ORIGEN DEL  
AGUA EN LA LUNA**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**LICENCIADA EN FÍSICA**

**P R E S E N T A:**

**JAZMÍN MICHEL MEJÍA CHÁVEZ**

**DIRECTOR DE TESIS:**

**DRA. MARÍA GUADALUPE CORDERO TERCERO**

**2011**





Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **Hojas de Datos del Jurado**

### 1. Datos del alumno

Mejía

Chávez

Jazmín Michel

56193545

Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ciencias

Física

30306054-9

### 2. Datos del tutor

Dra.

Cordero

Tercero

María Guadalupe

### 3. Datos del sinodal 1

Dr.

Novaro

Peñalosa

Octavio

### 4. Datos del sinodal 2

Dra.

Maravilla

Meza

María Dolores

### 5. Datos del sinodal 3

Dr.

Málaga

Iguñiz

Carlos

### 6. Datos del sinodal 4

Dr.

Durand

Manterola

Héctor Javier

### 7. Datos del trabajo escrito

Estudio de la distribución y origen del agua en la Luna

134 p.

2011

## **AGRADECIMIENTOS**

Antes que nada quiero agradecer a Dios por darme las fuerzas suficientes para concluir este trabajo de investigación con un resultado muy satisfactorio, así como darme la oportunidad de seguir mis estudios en otro país y de rodearme de gente maravillosa como mi familia y amigos.

Este trabajo quiero dedicárselo a mi familia ya que ellos son lo más importante que tengo en este mundo y siempre han estado a mi lado tanto en las buenas como en las malas y en las muy malas. A mi padre por ser mi amigo y brazo derecho en todo momento, y confiar en mí. También porque es una gran persona con metas y logros tanto profesionales como personales, que me han impulsado siempre a ser mejor cada día. A mi madre por transmitirme su fuerza e inteligencia para que siempre diera lo mejor de mí, así como ser una muy buena amiga. A mi hermana Wendy por ser mi amiga y confidente en todo momento, y por creer siempre en mí. A mi hermano Poncho por brindarme momentos de alegría en situaciones no muy agradables y por creer en mí. Gracias a mis padres soy una persona feliz y con muchas metas a futuro.

La palabra amigo implica: confianza, apoyo, felicidad, complicidad, entre muchas cosas más y que a lo largo de mi vida puedo contar a esas personas con los dedos de mi mano. Aunque una parte de estos amigos no está en estos momentos en México sé que tengo su apoyo desde donde estén. Ernesto (ardilla) gracias por creer en mí y apoyarme en todo momento, así como ser mi cómplice y confidente. Guille (tortuga) por ser una gran amiga que siempre me brindo muy buenos consejos y que admiro mucho por ser una gran mujer. Ricardo (el educado) por ser un ejemplo de vida, que demostró que cuando se tienen ganas de salir adelante todo lo puedes lograr, gracias por siempre brindarme tu apoyo. Roberto (el ruso) por ser una gran amigo que siempre me brindo su apoyo y estuvo al pendiente del proceso de mi tesis o no?. Leos (el de brackets) por ser una gran amigo que siempre me brindo su apoyo y consejos. Les agradezco por estar conmigo en el momento más difícil de mi vida y ser amigos incondicionales. Todos los momentos que pasamos juntos jamás los olvidare, como los que nos faltan por vivir en la nueva temporada de la serie, los quiero.

Javier gracias por llegar a mi vida y darme amor y comprensión en los momentos más estresantes del proceso de mi tesis, te quiero mucho.

Gracia a mi asesora la Dra. Guadalupe Cordero por guiarme en este proceso de aprendizaje donde me contagio su pasión a la ciencia espacial e impulso mi gusto para seguir preparándome en esta rama de la ciencia. También por apoyarme, comprenderme y brindarme su ayuda en todo momento.

Gracias Dr. Carlos Malaga por darme la oportunidad de ser su ayudante y brindarme su confianza, así como comprenderme en los momentos más duros del proceso de mi tesis.

Gracias Dr. Octavio Novaro por transmitirme sus grandes conocimientos durante mi formación académica y por brindarme sus sabios consejos, como también su apoyo incondicional.

Por último quiero dar las gracias a mis sinodales la Dra. Dolores Maravilla y el Dr. Héctor Duran por aceptar ser parte de mi jurado y brindarme su tiempo en la revisión de mi tesis, así como transmitirme sus conocimientos.

***“El agradecimiento es la memoria del corazón”***

*J. B. Massieu*

# INDICE

## INTRODUCCIÓN

### 1. GENERALIDADES SOBRE LA LUNA

<b>1.1</b>	<b>Características .....</b>	<b>6</b>
<b>1.2</b>	<b>Hipótesis sobre el origen de la Luna .....</b>	<b>10</b>
1.2.1	Hipótesis de captura lunar	
1.2.2	Hipótesis de fisión	
1.2.3	Hipótesis de acreción binaria	
1.2.4	Hipótesis de precipitación	
1.2.5	Hipótesis del gran impacto	
1.2.6	Hipótesis alternativa	
<b>1.3</b>	<b>Craterismo de impacto .....</b>	<b>14</b>
1.3.1	Etapa de Contacto y compresión	
1.3.2	Etapa excavación: El cráter transitorio	
1.3.3	Etapa de Modificación	
<b>1.4</b>	<b>Eras lunares .....</b>	<b>22</b>
1.4.1	Periodo Pre-Nectariano	
1.4.2	Periodo Nectariano	
1.4.3	Periodo Imbriano inferior	
1.4.4	Periodo Imbriano superior	
1.4.5	Períodos Eratosteniano	
1.4.6	Periodo Copernicano	
<b>1.5</b>	<b>Trampas frías .....</b>	<b>26</b>
1.5.1	Localización de las trampas frías para ambos polos lunares	

### 2. EXPLORACIÓN LUNAR

<b>2.1</b>	<b>Apollo .....</b>	<b>30</b>
2.1.1	Experimentos APOLLO	
<b>2.2</b>	<b>Clementine .....</b>	<b>37</b>
2.2.1	Experimentos Clementine	
<b>2.3</b>	<b>Lunar Prospector .....</b>	<b>41</b>
2.3.1	Experimentos Lunar Prospector	
<b>2.4</b>	<b>Chandrayaan-1 .....</b>	<b>44</b>
2.4.1	Experimentos CHANDRAYAAN-1	
<b>2.5</b>	<b>LCROSS .....</b>	<b>48</b>
2.5.1	Experimentos LCROSS	
<b>2.6</b>	<b>LRO .....</b>	<b>51</b>
2.6.1	Experimentos LRO	
<b>2.7</b>	<b>Misiones futuras .....</b>	<b>54</b>

### **3. RESULTADOS DE LA DETECCIÓN, DISTRIBUCIÓN Y ABUNDANCIA DE AGUA EN LA LUNA**

<b>3.1</b>	<b>Apollo</b> .....	<b>56</b>
3.1.1	Geología de Campo en la Luna	
3.1.2	Sismicidad	
<b>3.2</b>	<b>Clementine</b> .....	<b>71</b>
3.2.1	Cámara en el Cercano Infrarrojo (NIR)	
<b>3.3</b>	<b>Lunar Prospector</b> .....	<b>81</b>
3.3.1	Espectrómetro de Neutrones (NS)	
3.3.2	Magnetómetro (MAG)	
<b>3.4</b>	<b>Chandrayaan-1</b> .....	<b>93</b>
3.4.1	Radar pequeño de apertura sintética (Mini-SAR)	
3.4.2	Mapeo de la Mineralogía Lunar (M <sup>3</sup> )	
<b>3.6</b>	<b>LCROSS</b> .....	<b>101</b>
3.6.1	Espectrómetros NIR y UV/Vis	
<b>3.7</b>	<b>LRO</b> .....	<b>107</b>
3.7.1	Detector de Neutrones en la Exploración Lunar (LEND)	

### **4. ANALISIS DE DATOS Y RESULTADOS DE LAS MISIONES**

<b>4.1</b>	<b>Tiempo de permanencia del agua en la Luna (LCROSS)</b> .....	<b>112</b>
4.1.1	Agua sobre la superficie lunar	
4.1.2	Estabilidad del agua y del hielo en superficies planetarias	
<b>4.2</b>	<b>Mapas de la distribución de agua en la Luna</b> .....	<b>122</b>
<b>4.3</b>	<b>Valoración de las teorías de la existencia del agua en la Luna</b> .....	<b>127</b>

<b>5. CONCLUSIONES</b> .....	<b>129</b>
------------------------------	------------

<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS</b> .....	<b>130</b>
---	------------

## INTRODUCCIÓN

*“Es un pequeño paso para un hombre, pero un gran salto para la humanidad”*

*Neil Armstrong*

En décadas pasadas, la Luna solo había sido considerada como un satélite sin vida que adornaba nuestras noches terrestres. Sin embargo, en las últimas décadas varios investigadores se enfocaron en estudiar la Luna y en dar respuesta a varias preguntas que habían surgido a lo largo de la historia. Para esto diseñaron varias misiones espaciales enfocadas al análisis de la geología y evolución térmica lunar. Una de las interrogantes principales durante estas misiones fue el origen y los procesos geológicos en la Luna pues es de suma importancia entender su pasado para entender su presente y futuro así como su relación con la Tierra. Para esto surgieron varias hipótesis que explicaron un posible origen lunar. Una de las hipótesis más aceptadas por la sociedad científica fue la del “El gran impacto” ya que era la que mejor se ajustaba a las leyes físicas y a la composición de la Luna y de la Tierra.

Una de las implicaciones de la hipótesis del gran impacto es que, debido a la descomunal energía generada durante el impacto, el material del que se formó la Luna perdió todos sus volátiles, el agua entre ellos, por lo que, según este esquema, la Luna no tendría agua sobre ni debajo de su superficie. Las misiones Apollo, Clementine, Lunar Prospector, Chandrayaan-1, LCROSS y LRO tuvieron como objetivo principal encontrar rastros de agua sobre o debajo de la superficie lunar, por lo que contaron con instrumentos que permitieron analizar diferentes zonas de la superficie. Los datos obtenidos por las primeras misiones (Clementine y Lunar Prospector) fueron analizados por distintos grupos de investigación, los cuales notaron que las zonas con mayor presencia de agua se encontraban en los cráteres en sombra permanente cerca de los polos lunares. Esto permitió enfocar los estudios posteriores en estas zonas, llamadas trampas frías, en las cuales es posible que se conserven depósitos de agua a muy bajas temperaturas durante miles de millones de años.

En el capítulo 1 y 2 de este trabajo se abordan de manera somera algunos aspectos sobre el origen y la geología lunar, y se describen las principales misiones de exploración espacial realizadas para entender su origen y evolución.

En el capítulo 3 mostramos los análisis que fueron realizados por los distintos grupos de investigación con base en los datos recabados por las misiones lunares descritas en el capítulo 2. Los diferentes resultados obtenidos por cada grupo mostraron que hay una gran posibilidad de encontrar agua congelada en los polos lunares, principalmente en los cráteres de sombra permanente. En este capítulo también se mencionan los esfuerzos por saber cuál es el origen de los depósitos de agua congelada: aporte cometario o asteroidal o de naturaleza lunar.

En el capítulo 4 se analizó la permanencia de los depósitos de agua congelada sobre la superficie lunar, ya que estos suelen sublimarse debido a diferentes procesos como la desgasificación, las partículas del viento solar, los impactos con meteoroides y la radiación. En esta sección nos centramos en el análisis del cráter Cabeus, donde tomamos las temperaturas del cráter para calcular la sublimación para diferentes grosores de depósitos de agua congelada. Esto nos ayudaría a saber cuál es el tiempo de permanencia de los depósitos de agua congelada de diferentes grosores en caso de que existieran en el cráter Cabeus. También mostramos dos mapas, uno del polo Sur y otro del polo Norte donde ubicamos las regiones con posibles asentamientos de agua congelada, los cuales fueron encontrados por las distintas misiones lunares.

Estos resultados nos mostraron que el agua existe sobre y debajo de la superficie lunar, principalmente en aquellos cráteres en sombra permanente cerca de ambos polos.

# CAPITULO 1

## GENERALIDADES SOBRE LA LUNA

### 1.1 CARACTERÍSTICAS

La Luna es el único satélite natural que posee la Tierra y debido a su gran cercanía, es uno de los cuerpos más estudiados del Sistema Solar. La Luna es uno de los objetos más brillantes en el cielo nocturno aunque esta luz no sea propia del satélite sino luz reflejada del Sol. Al igual que la Tierra y el resto del sistema solar, la Luna tiene una edad aproximada de 4,600 millones de años.

El radio medio de la Luna es 1,737.4 kilómetros, más que un cuarto del radio terrestre y su masa es de  $7.35 \times 10^{22}$  Kg, aproximadamente 1/81 de la masa de la Tierra. Esto se pudo deducir debido a que la fuerza de la gravedad en la superficie lunar es de sólo 1 / 6 de la terrestre.

A pesar de la fuerza gravitacional relativamente débil ejercida por la Luna, ésta está lo suficientemente cerca a la Tierra para causar efectos sobre ella. La distancia media desde el centro de la Tierra al centro de la Luna es 356,410 kilómetros. Debido a que la Luna no es un punto de masa sino un cuerpo sólido, la fuerza gravitacional que ejerce la Tierra sobre partes diametralmente opuestas del satélite es distinta, lo que deforman a la Luna dándole un aspecto de un elipsoide: el mismo efecto causa la Luna sobre la Tierra sólo que, por ser la fuerza del satélite sobre el planeta de menor intensidad, este efecto es más notorio en los océanos donde se producen las mareas. A lo largo de un mes, las mareas suben y bajan en los puntos más cercanos y más alejados de la Luna, pero éstas son mayores cuando la Luna se encuentra en la fase Luna nueva y Luna llena. Cuando la marea es muy baja se le llama marea muerta o baja que es cuando la Luna se encuentra en la fase cuarto menguante y cuarto creciente (fig.1.1).Las mareas hacen que se frene la rotación de la Tierra, pero para que se conserve el momento angular del sistema Tierra-Luna, la Luna se aleja 3.8 centímetros por año de la Tierra.

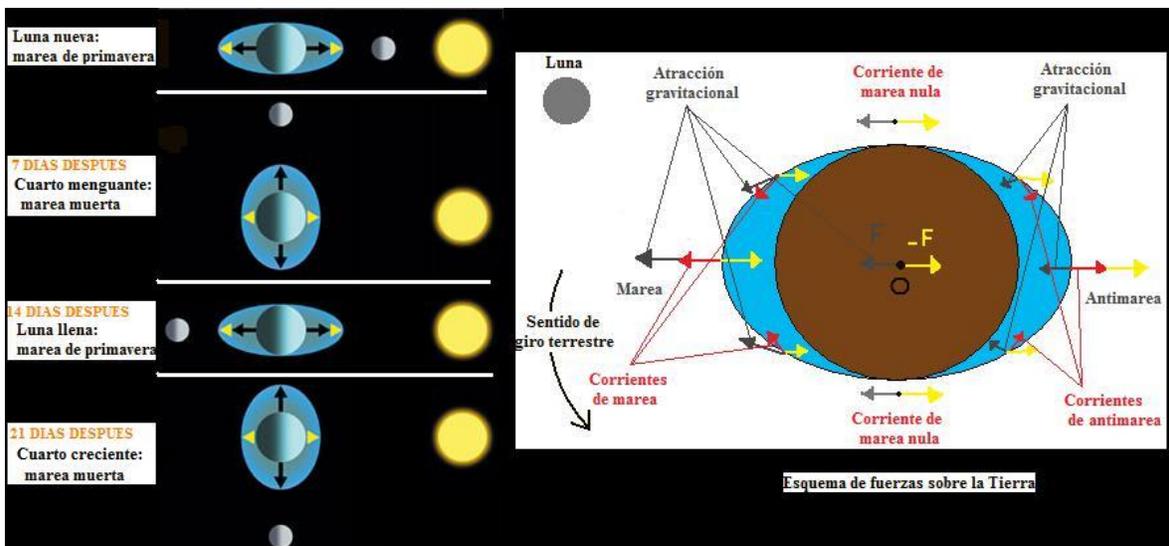


Figura.1.1.-Fuerzas que producen las mareas en el sistema Tierra-Luna.

La temperatura en el ecuador lunar durante la noche es de  $-173\text{ }^{\circ}\text{C}$  y durante el día es de  $127\text{ }^{\circ}\text{C}$ . En algunos cráteres profundos cerca de los polos de la Luna, la temperatura siempre está cerca de  $-240\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

En comparación con la Tierra, la Luna ha cambiado poco durante miles de millones de años, exhibiendo una superficie con zonas oscuras y brillantes (fig.1.2). En el año de 1609 Galilei hizo grandes aportaciones a la astronomía con las primeras observaciones con telescopio de la Luna y sus investigaciones sobre los movimientos de nuestro satélite. Al contemplar la Luna Galilei percibió que la superficie no era lisa y señaló la existencia de valles y montañas. Demostró que la superficie no era lisa ya que el límite que divide la parte iluminada por el Sol de la parte no iluminada, llamado terminador, no era uniforme, presentando irregularidades. En cuanto a los cráteres percibió numerosas manchas oscuras en la zona iluminada donde sus contornos son muy luminosos y sus sombras van disminuyendo a medida que aumenta la parte luminosa. Galileo comparó esta situación con lo que ocurre en la Tierra: al salir el Sol por el horizonte primero ilumina las cimas de las montañas y a medida que se va elevando alcanza a iluminar por completo algunos valles. La parte en sombra del interior de los cráteres se encuentra en dirección por donde sale el Sol.

Las áreas oscuras en la luna se conocen como maria (latín-de mares) son planicies extensas conformadas por afloramientos basálticos de erupciones provocadas por impactos con grandes asteroides o cometas, éstos perforaron y fracturaron la corteza lunar formando enormes cuencas de impacto, las cuales fueron rellenas por magma procedente del manto lunar. A Galilei también le fascinó la observación de los mares lunares. Una vez más razonó su naturaleza en base a las observaciones de nuestro propio planeta. Dedujo que las zonas que conformaban las grandes manchas estaban más hundidas con respecto a las tierras que la rodean y constató con observaciones que su superficie era más uniforme. En cuanto a la tonalidad, relacionó los mares terrestres con los mares lunares, ya que al contemplar ambos éstos se muestran más oscuros a la luz del Sol que las zonas emergidas. Con el tiempo se convenció que no había agua en la Luna (Galilei y Kepler, 2007).

Las áreas más claras en la superficie lunar son las más montañosas y presentan numerosos cráteres, éstas fueron denominadas por Galilei como tierras altas (conocidas como terrae (latín-tierra)) de color claro que se deben a la presencia de roca anortosita. Las tierras altas son la corteza original de la luna, rota y fragmentada por el impacto de asteroides y cometas. Las zonas terrae fueron relacionadas con la superficie sólida de la Tierra donde estas son tierras altas que presentan una mayor brillantez debido a su composición anortosítica. Hay muchos cráteres en terrae con diámetros de 40 kilómetros. El más grande es la cuenca Aitken del Polo Sur, que tiene un diámetro de 2,500 km.



**Figura.1.2.**-Imagen del lado visible de la Luna. Fuente: LPI (NASA).

Debido a que la atracción gravitacional de la Luna es muy baja cualquier tipo de gas que se encuentre sobre la superficie escapa, provocando que ésta no tenga atmósfera. Sin embargo con el programa Apollo se identificaron pequeñas cantidades de ciertos gases (He y Ar) presentes por encima de la superficie lunar. Más tarde, mediante observaciones en la Tierra se descubrieron iones de Na y K. En la tabla 1.1 se muestra la abundancia de estos gases durante el día Lunar. Ésta capa extremadamente delgada que posee la Luna se le conoce como exósfera, es decir, una zona de baja densidad de partículas que rodea un cuerpo. Lo extraño es que durante la noche lunar, su exósfera se comprime casi hasta el nivel de la superficie y cuando la luz del Sol regresa, las partículas del viento solar chocan con la regolita lunar y este material chocado renueva la exósfera, por otro lado, el choque de las partículas del viento solar con la exósfera les pueden proporcionar a éstas la velocidad necesaria para escapar de la atracción gravitacional lunar ([http://ciencia.nasa.gov/science-at-nasa/2009/23oct\\_ladee/](http://ciencia.nasa.gov/science-at-nasa/2009/23oct_ladee/)). Esto hace que su superficie esté expuesta al bombardeo constante del viento solar, los rayos cósmicos y los cuerpos pequeños (asteroides y cometas).

**Tabla1.1.-**Abundancias promedio durante el día  
en la exósfera de la Luna.

<b>Elemento</b>	(átomos/ cm <sup>3</sup> )
<b>H</b>	< 17
<b>He</b>	2 – 40 × 10 <sup>3</sup>
<b>Na</b>	70
<b>K</b>	17
<b>Ar</b>	4 × 10 <sup>4</sup>

Los avances en la exploración espacial han permitido un estudio más detallado de la dinámica y de las características físicas de la Luna (tablas 1.2 y 1.3). Se determinó que el tiempo que tarda la Luna en girar sobre su propio eje son 27.32 días. Ese es el período de tiempo entre un amanecer y otro, por lo que se denominó un día lunar.

La Luna completa una órbita alrededor de la Tierra con respecto a las estrellas cada 27.32 días, un período conocido como mes sideral. Pero con respecto al Sol, la Luna gira alrededor de la Tierra en unos 27.32 días, un período conocido como mes sinódico. Entonces un mes sinódico es igual a un día lunar. Por lo tanto la Luna se demora el mismo tiempo en dar una vuelta sobre su eje de rotación, que en dar una vuelta completa alrededor de la Tierra. Es por ello que la Luna siempre muestra la misma cara hacia la Tierra.

El eje de rotación de la luna, se inclina 1.5 ° y el de la Tierra 23.5°, debido a la poca inclinación del eje lunar ésta no posee estaciones como la Tierra. Otro resultado de la pequeña inclinación de la luna es que algunos pisos de cráteres cerca de los Polos Sur y Norte siempre están en sombra.

La órbita lunar como la órbita de la Tierra son elipses. La distancia entre el centro de la Tierra y el centro de la Luna varía a lo largo de cada órbita. En el perigeo, cuando la Luna está más cerca de la Tierra, la distancia es 356,410 kilómetros. En el apogeo la distancia es de 406,700 kilómetros.

**Tabla1.2-**Elementos orbitales (George y Michael, 2002).

---

<b>Inclinación del eje (respecto a la normal de su órbita)</b>	6.68°
<b>Excentricidad orbital</b>	0.0549
<b>Periodo orbital sideral</b>	27.322 días
<b>Radio orbital medio</b>	384 x10 <sup>3</sup> Km
<b>Rotación</b>	27.32 días
<b>Período sinódico</b>	29.531 días
<b>Inclinación orbital (respecto a la eclíptica)</b>	5 °

---

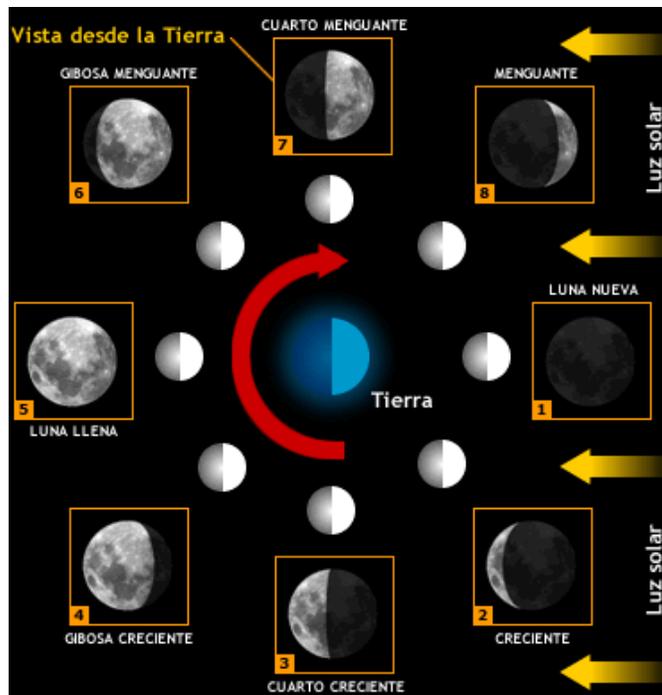
**Tabla1.3.-**Características Físicas de la Luna (George y Michael, 2002).

---

<b>Densidad media</b>	3.34 x 10 <sup>3</sup> Kg/m <sup>3</sup>
<b>Área</b>	38 millones de Km <sup>2</sup>
<b>Diámetro medio</b>	3476 Km
<b>Temperaturas</b>	noche -173 °C día 127 °C
<b>Gravedad</b>	1.62 m/s <sup>2</sup>
<b>Velocidad de escape</b>	2.38 Km/s
<b>Masa</b>	7.35 x10 <sup>22</sup> Kg
<b>Albedo</b>	0.12

---

A medida que la Luna orbita a la Tierra podemos observar distintas fases lunares que se producen por el cambio de las posiciones relativas de la Tierra la Luna y el Sol. El cambio del porcentaje de la superficie lunar iluminada por el Sol se observa desde la Tierra. Las fases lunares vistas desde la Tierra son: Luna nueva, Luna creciente, Luna en cuarto creciente, Luna gibosa creciente, Luna llena, Luna gibosa menguante, Luna en cuarto menguante y Luna menguante (fig.1.3).



**Figura.1.3.-**Las fases de la Luna en perspectiva desde el hemisferio sur de la Tierra.

Los eclipses se producen cuando la Tierra, el Sol y la Luna están en una línea recta, o casi. Un eclipse lunar ocurre cuando la Tierra está entre el sol y la luna, y la sombra de la Tierra cae sobre la Luna. Un eclipse lunar sólo puede ocurrir durante una luna llena. Un eclipse solar se produce cuando la Luna está entre el Sol y la Tierra, y la sombra de la luna cae sobre la Tierra. Un eclipse solar sólo puede ocurrir durante una luna nueva.

## 1.2 HIPÓTESIS SOBRE EL ORIGEN DE LA LUNA

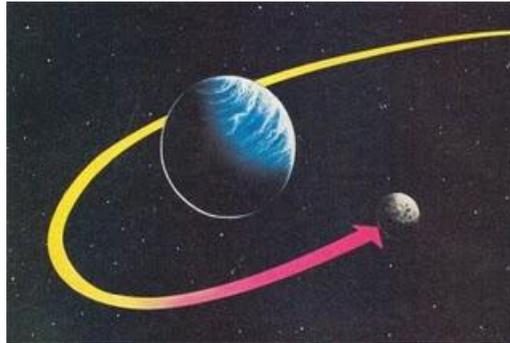
El origen y evolución de la Luna fue y es un tema de interés general debido a la influencia que ha tenido sobre nuestro planeta. Las teorías del origen de la Luna deben de cumplir las limitaciones impuestas por la composición química lunar y por las exigencias de la conservación del momento angular. Tales teorías también deben estar regidas por las condiciones de frontera durante la acreción de los planetas. Debido a que no es posible observar la formación de un satélite ni recrearlo experimentalmente, se han hecho esfuerzos para entender la formación de la Luna mediante simulaciones numéricas usando códigos hidrodinámicos en tercera dimensión en super-computadoras.

### 1.2.1 Hipótesis de captura lunar

La captura lunar fue propuesta por Fred Singer, ésta plantea que la Luna era un planetésimo que poseía una órbita elíptica con un afelio situado a la distancia que le separa ahora del Sol y con un perihelio cerca del planeta Mercurio. La trayectoria orbital de la Luna fue modificada por los efectos gravitacionales de planetas gigantes, expulsándola de su órbita. La Luna viajó durante mucho tiempo por el espacio hasta aproximarse a la Tierra donde fue atraída por la gravitación terrestre (fig.1.4). Dos de las grandes dificultades a esta hipótesis son:

- Desaceleración: No hay mecanismo aceptable para la eliminación de exceso de momento angular después de la captura lunar.

- Composición química: Debido a que la Luna provenía de otra parte del Sistema Solar, de acuerdo a la hipótesis, no tendría por qué tener similitudes con la composición química de la Tierra sin embargo las muestras lunares demostraron que los isotopos de algunos elementos como el oxígeno eran similares a los de la Tierra, por lo que la Luna no pudo haberse formado lejos de ella.



**Figura.1.4.-**Captura lunar.

### 1.2.2 Hipótesis de fisión

Esta hipótesis fue propuesta por primera vez por George Darwin en 1878. Esta teoría nos plantea que originalmente la Tierra y la Luna conformaban un mismo cuerpo, y que debido a la gran velocidad angular que tenía, se produjo una inestabilidad que hizo que una parte considerable de material se desprendiera conservando el momento angular del sistema inicial. Con el paso del tiempo el periodo de rotación del satélite se sincronizó con su periodo de traslación. El gran problema en esta hipótesis es que en el desprendimiento de una cantidad importante de material (Luna) de la proto-Tierra, el planeta pudo haberse acelerado, pero en ese caso se hubiera desprendido aun más material. Otro punto en contra de esta hipótesis es la dificultad de explicar cómo fue que en un principio la Tierra adquirió una velocidad lo suficientemente alta como para que ocurriera el desprendimiento (fig.1.5).



**Figura.1.5.-**Desprendimiento de una cantidad considerable de material.

### 1.2.3 Hipótesis de acreción binaria

La hipótesis de acreción binaria plantea que tanto la Tierra como la Luna se formaron al mismo tiempo a partir del mismo material y en la misma zona del sistema solar (fig.1.6). A favor de esta hipótesis está que al ser analizadas las muestras lunares traídas por la misión Apollo se encontró que la edad lunar es de entre

4.500 y 4.600 millones de años que es la edad aproximada de la Tierra. Uno de los grandes problemas a esta hipótesis es que si los dos se crearon en el mismo lugar y con la misma materia ¿por qué motivo tienen una composición química y una densidad diferente?, también va en contra de las leyes de la física ya que dos cuerpos tan grandes no podrían formarse bajo la influencia de su gravedad estando uno tan cerca del otro, por ese motivo esta hipótesis no es tan aceptada. Otro punto en contra es que no se puede explicar el porqué la Tierra rotó o empezó a rotar tan rápido.



**Figura.1.6.-**Acreción binaria

### 1.2.5 Hipótesis del gran impacto

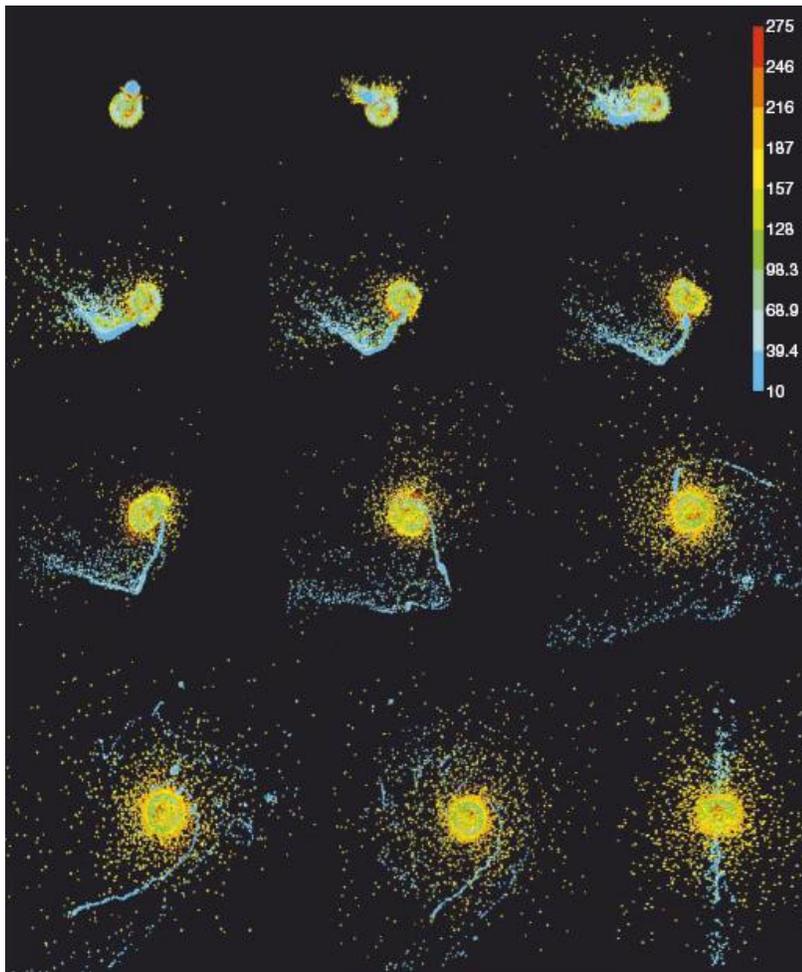
Esta teoría fue sugerida por William K. Hartmann y Donald R. Davis en su artículo acerca del origen de la luna y los satélites del tamaño de planetesimales publicado en 1975. Un año más tarde, otros dos científicos, William Ward y Alistair Cameron, llegaron a las mismas conclusiones apoyando esta idea. Esta teoría sugiere que en el Sistema Solar había un protoplaneta del tamaño de Marte, al que se ha llamado Theia, el cual chocó con la proto-Tierra hace 4,500 millones de años, cuando ésta tenía un tamaño aproximado de un 90 % de su tamaño actual. El choque entre ambos planetas fue oblicuo, casi rasante de tal modo que una parte de ambos se fundió y se alejaron el uno del otro hasta distanciarse varios diámetros terrestres, manteniéndose siempre unidos por un puente de material fundido. Por efecto de la atracción gravitacional, se aproximaron de nuevo y colisionaron por segunda vez, esta vez de forma frontal (fig.1.7). Parte de los materiales que fueron eyectados por la colisión cayeron de nuevo en la superficie terrestre o se alejaron hacia el espacio interplanetario, pero el resto del material quedó orbitando en torno a la Tierra y adoptó una morfología de disco incandescente similar a un disco proto-planetario. Con el paso del tiempo la materia que constituía ese disco formó un solo cuerpo al que hoy denominamos Luna.



**Figura.1.7.-**Segunda colisión, impacto frontal entre la Tierra y Theia

A pesar de ser la teoría dominante para explicar el origen de la Luna, esta debe de cumplir con las leyes físicas y de la química respetando las condiciones de frontera durante la acreción de los planetas. Para entender la formación de la Luna bajo estas restricciones se hacen simulaciones en tercera dimensión en supercomputadoras usando códigos hidrodinámicos (fig.1.8). El resultado de estas simulaciones fue que tanto el material arrancado de la Tierra como la distancia a la que fue lanzado debieron haber sido mayores a lo que se pensaba, por lo que el objeto que chocó con la Tierra debió tener una masa dos veces mayor que el planeta Marte (equivalente a la cuarta parte de la masa de la Tierra). Esto plantea nuevos problemas, pues según las simulaciones el impacto debió formar a la Luna más lejos de donde está. Por otro lado, los estudios de la formación de la Tierra indican que la colisión con un objeto del tamaño de Marte es más probable que ocurra, que una colisión con un planeta dos veces mayor que Marte. Al observar diferentes simulaciones, se percataron de que la mayor parte del material Proto-lunar proviene del cuerpo impactor por lo que se esperaba que los elementos de la Tierra y de la Luna fueran distintos en su mayoría. Al ser analizadas las muestras lunares traídas por misiones espaciales se encontró que los elementos de la Tierra y la Luna son muy parecidos lo que plantea otro problema para esta teoría.

A pesar de estos problemas los investigadores consideran que esto no es evidencia suficiente para descartar la hipótesis del gran impacto.



**Figura.1.8.**-Simulación de la teoría del gran impacto. La escala de colores representa la energía interna (ergs/g), donde el azul y el verde oscuro es materia condensada.

### 1.2.6 Hipótesis alternativa

Las muestras lunares revelaron un alto grado de similitud entre la composición elemental e isotópica del manto de la Tierra y la Luna. Esta similitud en los elementos ligeros y pesados y sus isótopos ya no concuerda con la hipótesis del gran impacto ya que propone que la Luna debe estar compuesta de 80% de material del objeto impactor y 20 % del material Terrestre por lo que su composición no tendrían que ser tan similar.

La hipótesis alternativa sugiere que nuestro satélite natural se formó después de una gran explosión nuclear natural en el manto terrestre.

Robbe Meijer y Wim Van Westrenen propusieron que las fuerzas centrífugas concentraron elementos pesados como el torio y el uranio en el plano ecuatorial y en el límite entre el núcleo y el manto de la Tierra. Las concentraciones de estos elementos radiactivos eran lo suficientemente altas como para provocar una reacción nuclear en cadena que se convirtió en supercrítica, causando una explosión nuclear. La Tierra entonces se convirtió en un georeactor nuclear natural que explotó y expulsó una burbuja de roca fundida del tamaño de la Luna, que se convertiría en nuestro satélite.

Los investigadores sugieren que la hipótesis explica la composición isotópica idéntica de elementos ligeros (como silicio y potasio) y pesados (cromo, neodimio y tungsteno) y también proponen que la explosión dejaría evidencias como el xenón-136 y el Helio-3, que se habrían producido en abundancia en el georeactor. La confirmación se complica por el hecho de que el viento solar deposita estos isótopos en la luna en grandes cantidades.

## 1.3 CRATERISMO DE IMPACTO

Un cráter de impacto es una depresión circular (en la mayoría de los casos) u ovalada en una superficie. Estos se forman cuando un impactor que puede ser un meteoróide o un cuerpo pequeño colisiona con un blanco (planetas, satélites o cuerpos pequeños) a gran velocidad. La geología lunar se encuentra dominada por éstos, ya que en su edad temprana y posterior a ella la Luna fue bombardeada constantemente. El tamaño y forma de estos cráteres se determina por distintos factores:

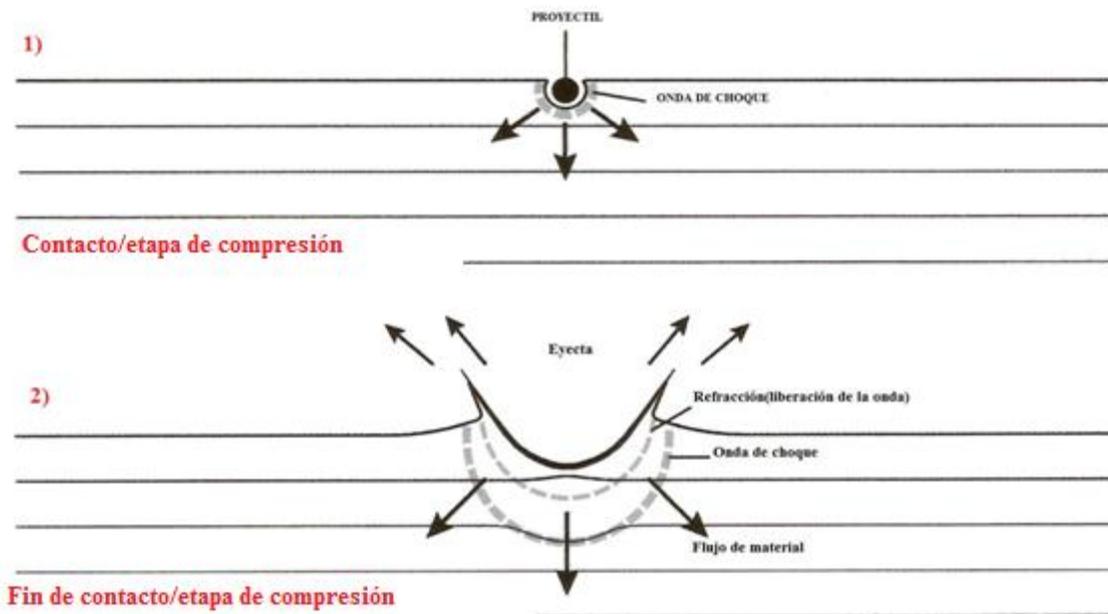
- Tamaño del impactor (oscila entre menos de 1 mm a los grandes asteroides y cometas de cientos de kilómetros de diámetro).
- Composición del impactor (hielo, roca, metales).
- Velocidad del impactor (típicamente está en un intervalo entre 11.2 a 70 km/s con un promedio de 20 km/s en la Tierra).
- Campo gravitacional del blanco (entre mayor sea el campo gravitacional del blanco, la velocidad de impacto aumenta y el cambio de regímenes de formación de cráteres se da a diámetros menores).

La formación de un cráter de impacto simple es un proceso complejo y continuo que fue recreado en laboratorios. Para su estudio, el proceso de craterismo de impacto se dividió arbitrariamente en tres etapas distintas (fig.1.9, fig.1.10 y fig.1.11), cada una dominada por diferentes fuerzas y mecanismos: contacto y compresión, excavación y modificación.

### 1.3.1 Etapa de contacto y compresión

Ésta etapa comienza en el instante en que el borde delantero del proyectil en movimiento entra en contacto con la superficie. Como el blanco tiene una estructura sólida, el proyectil se detiene en una fracción de segundo mientras penetra en el blanco una distancia de aproximadamente una vez su diámetro y su inmensa energía cinética se transfiere al suelo por medio de ondas de choque generadas en la interacción entre el proyectil y el blanco. La conversión de energía cinética en ondas de choque se ha determinado a partir de experimentos y estudios teóricos. Se encontró que las ondas de choque se transmiten hacia el interior desde el primer contacto del proyectil con la superficie. Las ondas de choque que se transmiten en el suelo pierden energía rápidamente a medida que se alejan del punto de impacto. Hay dos factores involucrados en esta pérdida de energía: (1) Al expandirse el frente de choque, éste cubre grandes zonas radialmente por lo que reduce la densidad de energía, y (2) la energía restante se pierde en el blanco en forma de calor, deformación, aceleración, ondas sísmicas y fracturamiento del material.

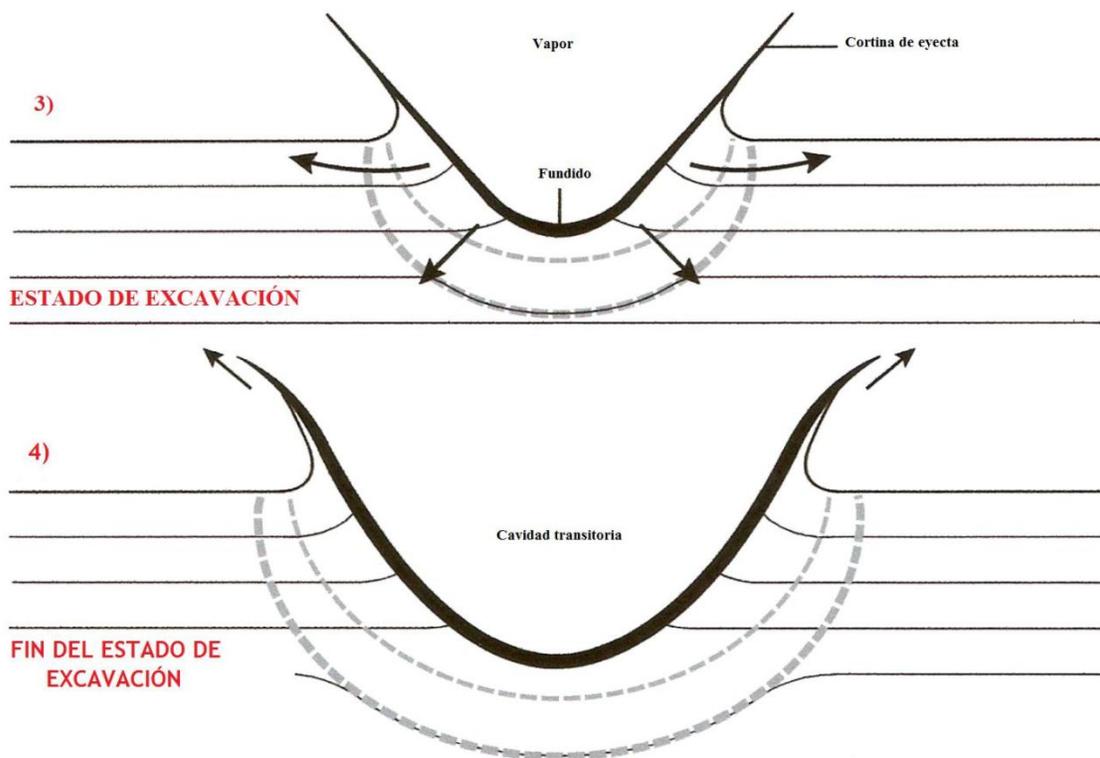
Modelos teóricos y estudios geológicos indican que la presión ejercida por una onda de choque cae exponencialmente con la distancia desde el punto de impacto (Ahrens y O'Keefe, 1977). Por tanto entre más se aleje el proyectil del punto de impacto las presiones a las que es sometido disminuirán. Cuando el proyectil es liberado de las grandes presiones se da la onda de refracción se destruye. La etapa de contacto y compresión no dura más que unos pocos segundos, incluso para los impactos con objetos muy grandes. Después de esta fase el proyectil no juega ningún otro papel en la formación del cráter de impacto.



**Figura.1.9.-** (1) Etapa de contacto y compresión: Inicia la penetración del proyectil y la propagación de la onda de choque hacia el interior, (2) Fin de la etapa de contacto y compresión, continua la expansión de la onda de choque en la cavidad; se desarrolla la onda de rarefacción después de la onda de choque; la interacción de la onda de rarefacción con la superficie acelera el material que se encuentra cerca de ésta hacia arriba y hacia afuera, inicia la etapa de excavación.

### 1.3.2 Etapa excavación

La onda de choque iniciada en la etapa anterior se propaga a través del blanco (corteza planetaria). Como la presión es mucho mayor que la resistencia del material, éste se comporta como un fluido el cual es acelerado a lo largo de líneas de flujo perpendiculares al frente de la onda de choque. Una vez que el material, que ha sido acelerado dentro del blanco, llega a la superficie, éste se comporta como partícula y sale disparado en trayectoria parabólica. En conjunto, el movimiento balístico de todo el material expulsado forma la llamada cortina de eyecta, la cual se ve como un cono truncado invertido cuya base se va ensanchando con el tiempo. El material arrojado balísticamente se emplaza alrededor del cráter recién creado formando lo que se conoce como la capa de eyecta. Justo cuando todo el material ha sido expulsado, se tiene una cavidad conocida como cráter transitorio pues un tiempo corto posterior se va a ver modificado por el derrumbe de las paredes, quedando finalmente un cráter menos profundo que el original.

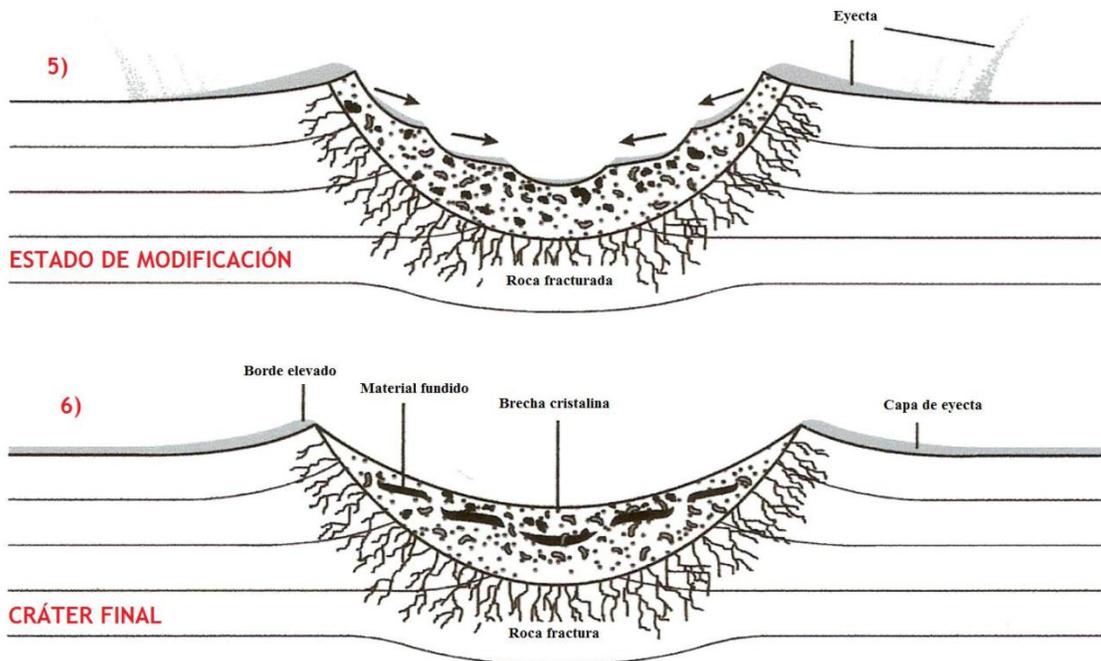


**Figura.1.10.-** (3) Conforme la onda de choque se propaga, acelera al material del blanco que se comporta como fluido. Cuando este material sale disparado desde la superficie se forma la cortina de eyecta. (4) Al final de la etapa de excavación se forma el cráter transitorio, así como la inversión de las capas del material del blanco en el borde del cráter.

### 1.3.3 Etapa de Modificación

La etapa de excavación termina cuando el cráter transitorio ha crecido a su tamaño máximo y comienza de inmediato la etapa de modificación. En esta etapa la cavidad de los cráteres no es estable, en general las paredes suelen derrumbarse bajo efectos de la gravedad. La cavidad formada es cubierta por una capa de brecha (roca fracturada debido al choque), fundidos de impacto y por algo de la eyecta. Si bien la modificación es muy rápida durante un tiempo corto después de la creación del cráter transitorio, ésta se da por largos periodos de tiempo y termina hasta que el cráter formado desaparece por la acción de agentes

externos tales como la formación de otro cráter de impacto cercano, erosión; interperismo, vulcanismo; tectonismo, etc.



**Figura.1.11.-** (5) El comienzo de la etapa de modificación está marcada por el colapso de las paredes más empinadas del cráter transitorio acompañado del relleno del fondo del cráter por fundidos y brechas de impacto, (6) después de las primeras modificaciones, el cráter continuará sufriendo cambios debido a factores externos.

Las estructuras de impacto que no son destruidas por la erosión pueden ser enterradas por sedimentos más jóvenes. El tectonismo y metamorfismo causado por impactos posteriores pueden destruir grandes estructuras haciéndolas totalmente irreconocibles. Los cráteres pueden también quedar sepultados bajo la eyecta de cráteres más jóvenes o, en el caso de la Tierra, por sedimentos depositados por acción del viento y el agua.

La modificación puede implicar importantes cambios en la estructura de un cráter: el levantamiento de la parte central del piso y los principales colapsos alrededor del borde. Los cráteres de impacto son clasificados visualmente en función de su morfología. Dependiendo de la modificación del cráter transitorio se pueden distinguir tres estructuras de impacto: cráteres simples, cráteres complejos y las cuencas multi-anillos.

### Cráteres simples

Los cráteres simples son depresiones forma de tazón. Cuando se forma el cráter transitorio en condiciones tales que la resistencia del material es más importante que los esfuerzos gravitacionales se forma este tipo de

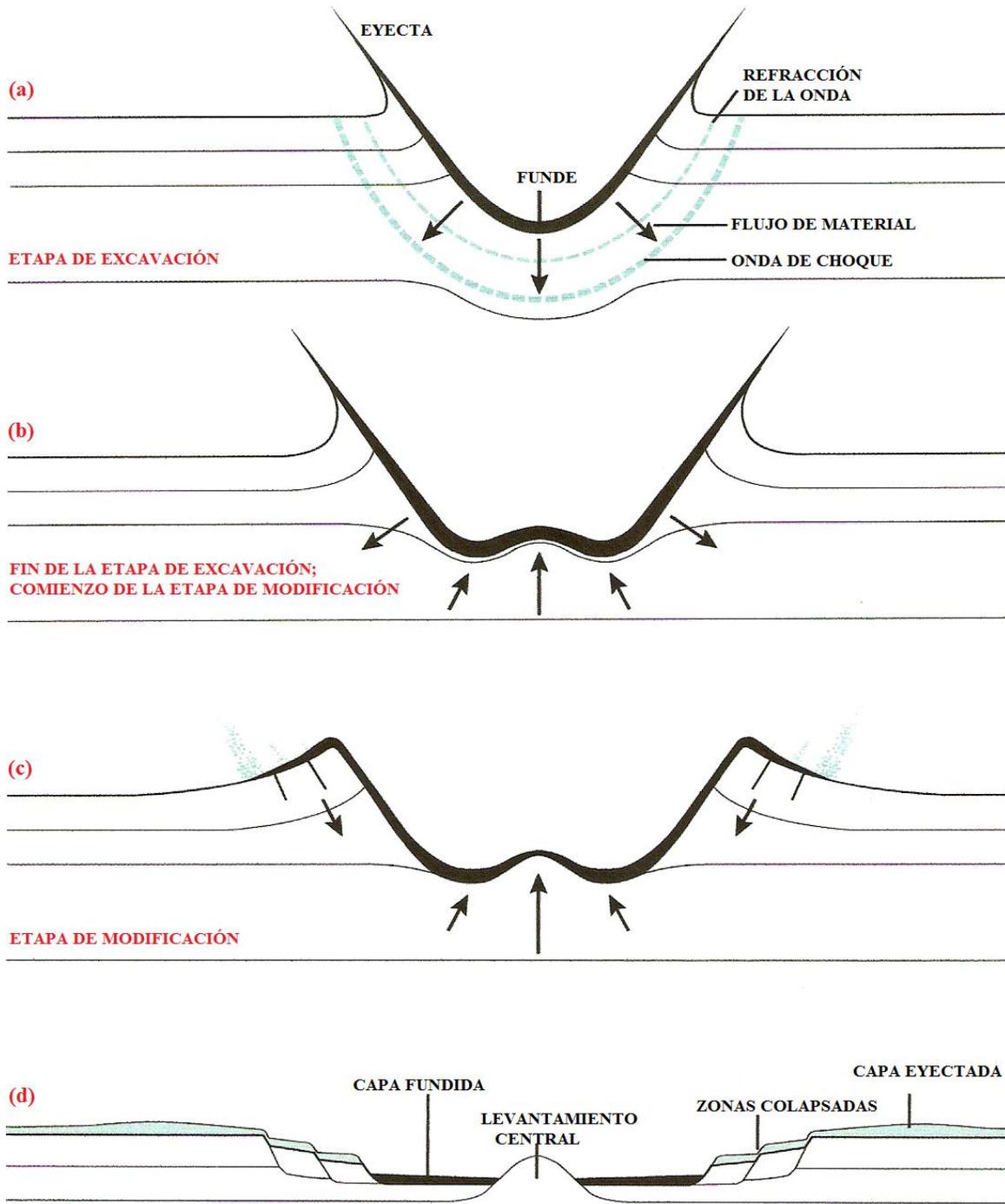
cráteres. Esto ocurre para cráteres relativamente pequeños. El cráter Moltke en la Luna es considerado un cráter simple (fig.1.12). El diámetro de este cráter medido borde a borde es de 6.5 Km y la profundidad medida desde la parte superior del borde al piso en el centro del cráter es de 1.3 km.



**Figura 1.12.** Cráter Moltke (NASA).

Cuando el derrumbe y la modificación de la cavidad transitoria son mucho más extensos, la estructura que resulta se llama *cráter complejo* (fig.1.13). El derrumbe de la cavidad transitoria es causada por la fuerza gravitacional.

De los cráteres observados en planetas y satélites del sistema solar, se tiene que mientras mayor es el diámetro de un cráter su estructura es diferente. Como se mencionó anteriormente, los cráteres de hasta unos cuantos kilómetros suelen ser cráteres simples, pero más allá de un cierto diámetro umbral que depende de la atracción gravitacional del blanco (planeta, asteroide o cometa) los cráteres son complejos. Los complejos más sencillos son los que tienen terrazas en las paredes y un pico central, en cráteres aún más grandes, el pico central se convierte en un anillo de picos y finalmente, los cráteres de más de 200-300 km se conocen como cuencas multianillo (fig.1.14)



**ESTRUCTURA FINAL**

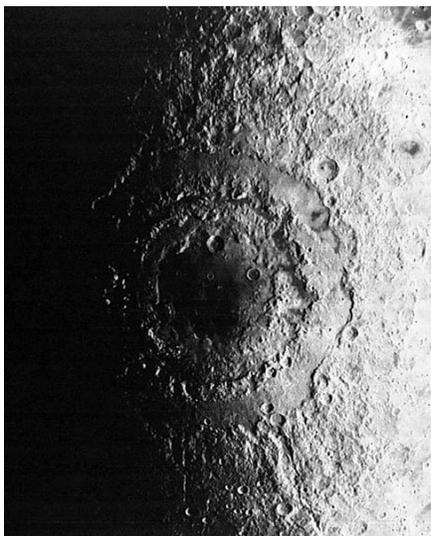
**Figura.1.13.** Desarrollo de la estructura de un cráter complejo: (a) Formación de un cráter transitorio, (b) inicio de la formación del levantamiento central durante la etapa de modificación; (c) comienzo del colapso periférico y evolución del pico central, (d) perfil de un cráter complejo. Nótese el pico central de rocas rodeado por una llanura relativamente plana y por terrazas en las paredes.

El cráter Copérnico en la Luna (Fig.1.14) tiene un diámetro de 93 Km, 3,760 m de profundidad y un borde que se eleva 900 m sobre la llanura circundante. El grupo de picos centrales se eleva hasta 1,200 m sobre el suelo del cráter.

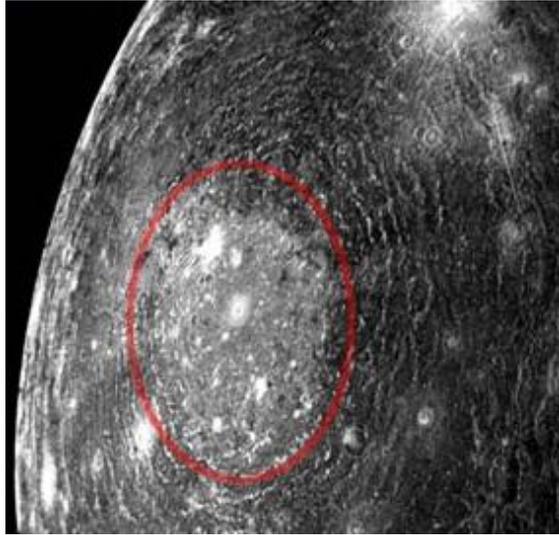


**Figura.1.14.**Copérnico es un cráter complejo en la Luna (NASA).

Las cuencas multi-anillos están caracterizadas por una serie de crestas y depresiones concéntricas. Terminando el anillo más externo se observan crestas bajas orientadas radialmente con respecto a la cuenca. En la Luna, los mares no son otra cosa que grandes cuencas multi-anillos que fueron cubiertas por lava. Otro ejemplo de este tipo de cráteres en la Luna es Mare Orientale (fig1.15). Las cuencas multi-anillos pueden tener hoyos centrales en lugar de picos centrales y contener muchos anillos concéntricos, por ejemplo el cráter Valhalla en Callisto (satélite de Júpiter) (fig.1.16).

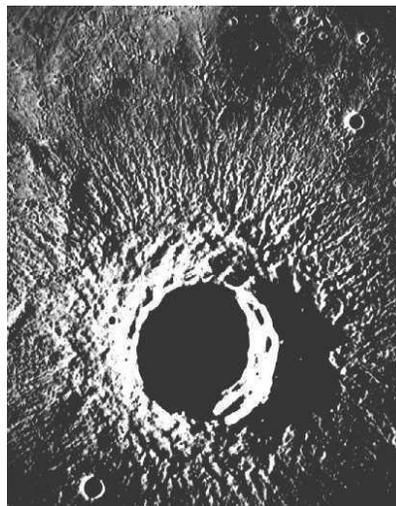


**Figura.1.15.-**Mare Orientale es una cuenca mlti-anillada (NASA).

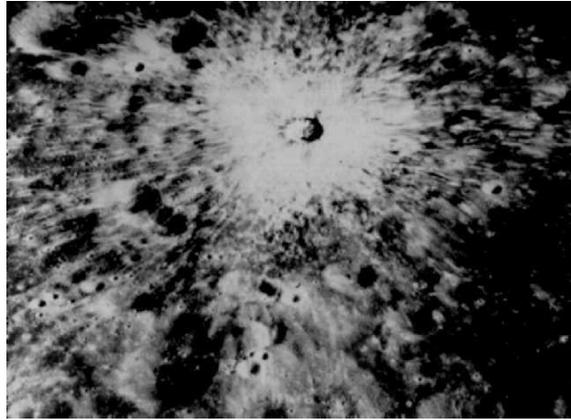


**Figura.1.16.-**Valhalla en Callisto (satélite de Júpiter) (NASA)

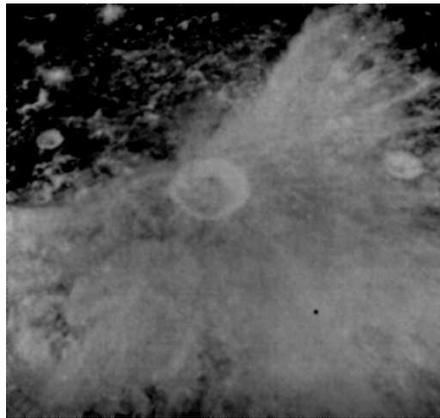
Además de la eyecta continua y discontinua que se emplaza alrededor del cráter debido a la caída balística del material excavado, existen otros tipos de depósitos alrededor. Para empezar, cuando algunos fragmentos del material excavado aún son relativamente grandes y tienen suficiente energía cinética como para a su vez formar otros cráteres de impacto, se producen los llamados cráteres secundarios que se forman alrededor del cráter, normalmente siguiendo una distribución radial respecto al centro del cráter o bien en “V” con el pico apuntando hacia el centro del cráter principal (fig.1.17). Después de su formación, los cráteres son afectados por un conjunto de procesos geológicos tales como la erosión, el entierro por material proveniente de la excavación de otros cráteres, y la deformación tectónica. Entre la eyecta expuesta en la superficie después de la formación del cráter, están los rayos (fig.1.18), estos están formados por el material muy fino que fue capaz de llegar más lejos, se distribuye en forma radial respecto al centro del cráter y se extiende a distancias considerables. Los rayos suelen erosionarse rápidamente hasta que desaparecen. La distribución simétrica de los rayos indica que el impactor golpeó en una trayectoria casi vertical (fig.1.18) y la distribución asimétrica de los rayos indica que la trayectoria del impactor tenía un cierto ángulo (fig.1.19).



**Figura.1.17.-**Cráter Timócaris, aquí se muestra su manto de eyecta y cráteres secundarios (fotografía de la NASA).



**Figura.1.18.** Los rayos emplazados alrededor de un cráter son estructuras características de cráteres jóvenes (NASA).



**Figura.1.19.** Los rayos de un cráter producidos por un impactor con una trayectoria casi horizontal que va de izquierda a derecha (NASA).

#### 1.4 Eras lunares

En 1962 los geólogos Shoemaker y Hackman del Servicio Geológico de EE.UU. desarrollaron una escala de tiempo Lunar para que los eventos geológicos importantes se pudieran organizar cronológicamente de forma adecuada. El desarrollo de una escala de tiempo geológico lunar fue un gran avance en el estudio de la geología planetaria. Por vez primera, la secuencia de acontecimientos en la historia de otro planeta fue establecida firmemente.

La cronología lunar se basó en la interpretación de la secuencia de eventos en las cercanías del cráter Copérnico (fig.1.20). Shoemaker y Hackman se dieron cuenta de que los materiales arrojados durante la formación de los cráteres Copérnico y Eratóstenes se superpusieron a las planicies de basalto de los mares, mientras que éstas están rellenas grandes cuencas de impacto pre existentes. A partir de este tipo de razonamiento establecieron una escala de tiempo geológico relativo para la Luna.



**Figura.1.20.**-Las edades relativas lunares están basadas en la superposición de material eyectado por los cráteres Copérnico y Eratóstenes.

La cronología Lunar se dividió en cinco periodos geológicos Pre-Nectariano , Nectariano, Imbriano(Superior e inferior) ,Eratosteniano y Copernicano, los cuales describen la evolución lunar (fig.1.21).

#### **1.4.1 Periodo Pre-Nectariano** (4.172 a 3.920 miles de millones de años)

El período Pre-Nectariano comienza con la formación de la Luna y termina cuando se forma la cuenca sobre la que se encuentra Mare Nectaris producto de un gran impacto. En la formación de Mare Nectaris y otras grandes cuencas por grandes impactos comienza el periodo Nectariano.

En el periodo Pre-Nectariano hubo un intenso bombardeo de cuerpos grandes y pequeños. El impacto de estos cuerpos formó un terreno densamente lleno de cráteres por toda la superficie de la Luna, un terreno que ahora se conserva en las tierras altas lunares. El material lunar Pre-Nectariano estuvo dominado por roca de anortosita, lo que sugiere que la etapa temprana de la formación de la corteza lunar se produjo a través de la cristalización de minerales de un océano de magma global producido por la gran cantidad de impactos con cuerpos pequeños. Estos fragmentaron la corteza facilitando el surgimiento y exposición de basaltos KREEP (potasio y elementos de tierras raras).

#### **1.4.2 Periodo Nectariano** (3.920 a 3.850 miles de millones de años)

El Nectariano corresponde al periodo de los grandes impactos con grandes asteroides que produjeron la mayor parte de las cuencas multi-anillos .Aproximadamente hay 40 cuencas mayores a la cuenca Imbrium con diámetros que van desde los 300 km hasta más de 1000 km. Durante y después de la formación de las cuencas multi-anillos, los impactos con asteroides y cometas de algunas decenas de kilómetros formaron cráteres como Platón con 101 km de diámetro, Arquímedes con 100 km de diámetro e Iridum sinusal con un diámetro de 260 km, éstos se fueron desgastando y erosionando debido a impactos menos energéticos. Los materiales de este periodo cubren una gran parte de la corteza lunar.

#### **1.4.3 Período Imbriano inferior** (3.850 a 3.750 miles de millones de años)

El período Imbriano Inferior comenzó con el gran impacto que creó la cuenca donde posteriormente se emplazó el enorme Mare Imbrium. Las otras grandes cuencas que dominan esta zona lunar (Crisium, Tranquilitatis, Serenitatis, Fecunditatis y Procellarum) también se formaron en este período. Estas cuencas se llenaron de basalto principalmente durante el posterior Período.

#### **1.4.4 Período Imbriano superior** (3.750 a 3.200 miles de millones de años)

El Período Imbriano Superior comenzó cuando el material del manto ascendió relleno las grandes cuencas de impacto de la cara visible de la Luna. En ese entonces los basaltos eran generados a una profundidad de 400 km en el manto lunar. El calor generado en el manto tenía principalmente dos fuentes: el decaimiento de elementos radioactivos y las fuerzas de marea. En este período terminó el evento del gran bombardeo que marco el final de la acreción de los planetas terrestres.

#### **1.4.5 Períodos Eratosteniano** (3.200 a 1.100 miles de millones de años)

El período Eratosteniano empieza con la formación del cráter Eratóstenes y termina con la creación del cráter Copérnico. La estructura lunar prácticamente ya no tuvo grandes modificaciones a final del período Imbriano. Durante el período Eratosteniano el masivo vulcanismo basáltico del Imbriano cesó provocando que la Luna entrara en un estado inactivo. Durante este lapso la litosfera se engrosó. Hoy en día es probable que la litosfera tenga un espesor.

#### **1.4.6 Período Copernicano** (1.100 miles de millones de años hasta la actualidad)

El período Copernicano comprende el período de tiempo en que se formaron los cráteres con rayos que observamos actualmente. Como se mencionó en párrafos anteriores, los rayos tienden a desaparecer en períodos de tiempo relativamente cortos, por lo que la existencia de rayos en un cráter significa que éste tiene una edad de formación menor a  $1.8 \times 10^9$  años. Un tema de estudio fueron los rayos de eyecta que presentan algunos cráteres ya que se ha encontrado que poseen una composición muy variante que tal vez se debe al continuo impacto de cuerpos celestes.

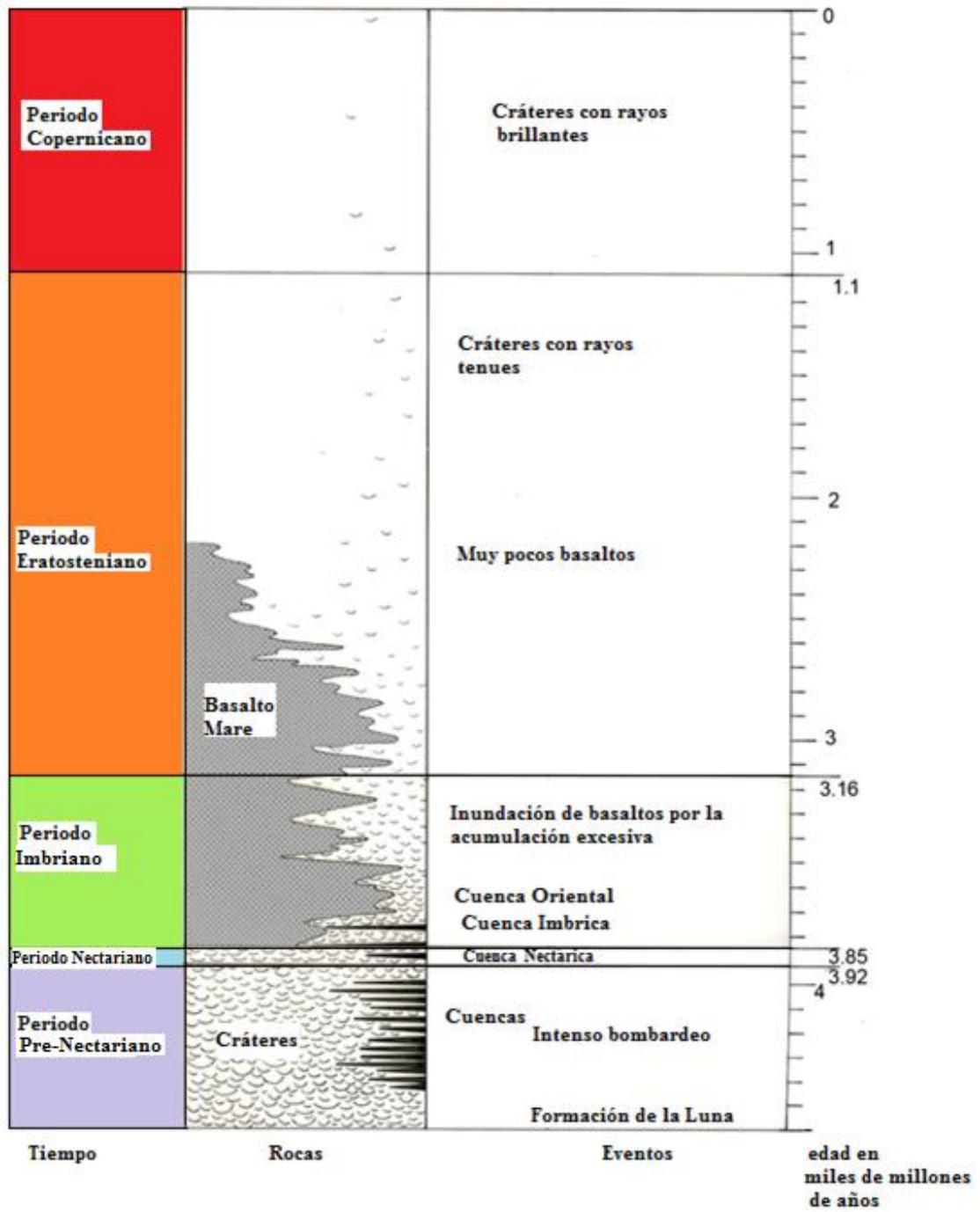


Figura.1.21.-Cronología Lunar.

## 1.5 TRAMPAS FRÍAS

### 1.5.1 Localización de las trampas frías en ambos polos lunares

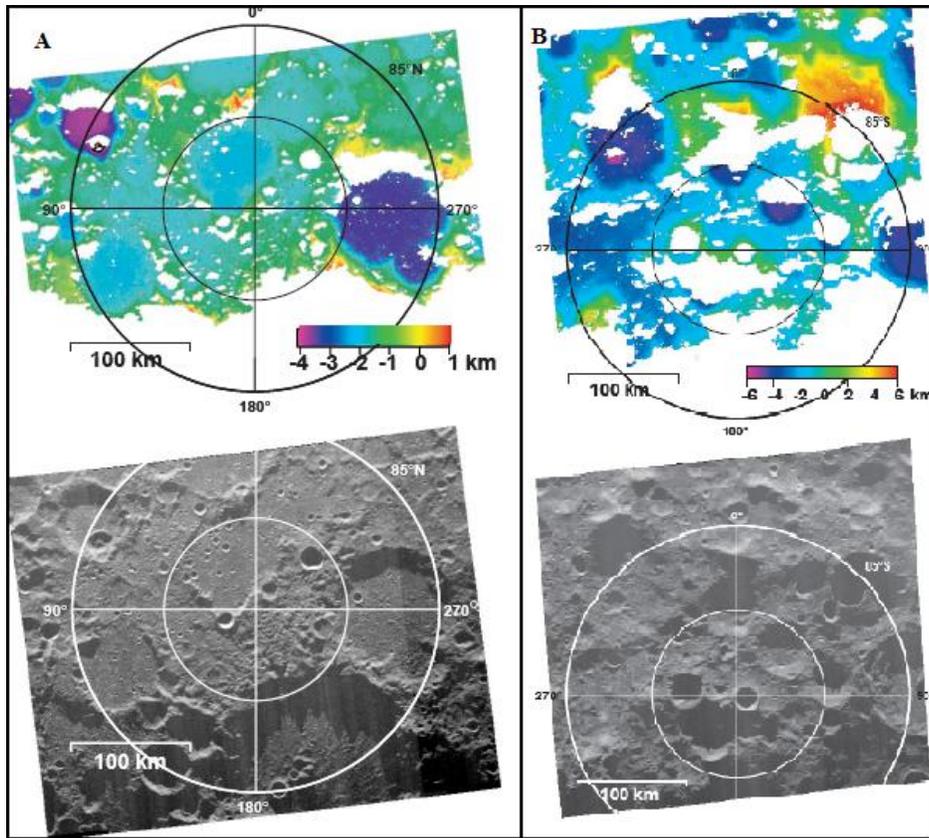
Los estudios realizados con interferometría de radar proporcionaron información sobre las localidades de la Luna que se encuentran en sombra permanente y que pueden actuar como trampas frías. Las zonas estudiadas fueron depresiones topográficas cerca de ambos polos donde existen temperaturas extremadamente bajas en comparación con otras zonas lunares y son grandes candidatas a albergar depósitos de agua congelada (Margot et al., 1999). Algunas estimaciones muestran que los volátiles como el agua congelada pueden permanecer sin escapar al espacio por millones de años (Helbert et al., 2009). Sin embargo, estos volátiles presentan procesos de pérdida a causa de bombardeo de micro-meteoroides, partículas del viento solar y radiación. Por lo que se sugiere que tales depósitos de agua congelada se encuentran protegidos debajo de una capa delgada de regolita.

Para el estudio de estas trampas frías, Margot y colaboradores utilizaron un radar de interferometría instalado en la Tierra con cuyos datos obtuvieron una serie de mapas topográficos con resolución espacial de 150 m en planta y 50 m en altura. Con esto implementaron un modelo de elevación digital del terreno (DEMs-digital elevation models) que les ayudó a describir las condiciones necesarias de iluminación solar para determinar las ubicaciones de las trampas frías que son posibles reservorios de depósitos de agua congelada. Para encontrar zonas en sombra permanente, Margot y su equipo simularon las condiciones de iluminación solares en las regiones polares teniendo en cuenta efectos latitudinales y el tamaño angular finito del suelo. Bajo estas consideraciones todos los puntos que estaban rodeados por una topografía que bloqueaba la luz del Sol todo el tiempo fueron considerados terrenos en sombras permanentes.

Podemos observar que el mapa topográfico del polo Norte muestra una topografía suave mientras que en el polo Sur el terreno es mucho más rugoso (fig.1.22), presentando elevaciones hasta 2.5 veces mayores que en el Norte. Con estos análisis se realizaron mediciones de las áreas en sombras permanentes en ambos polos (tabla.1.4) y también se estimaron las áreas que no fueron captadas por el radar (fig.1.22, parte superior con espacios en blanco).

**Tabla 1.4.** Áreas en sombra permanente en los polos Norte y Sur.

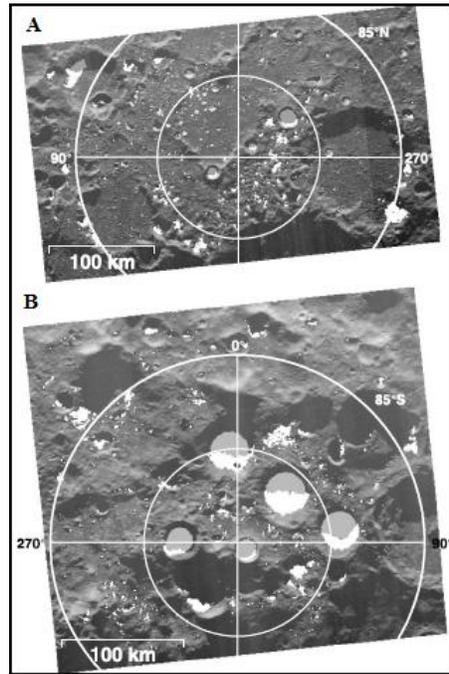
	<b>MEDICIONES (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>ESTIMACIONES (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>TOTAL (Km<sup>2</sup>)</b>
Área de la imagen (polo Norte)	2080	570	2650
Área de la imagen (polo Sur)	3150	1950	5100
Latitud $\geq 87.5^\circ$ (polo Norte)	690	340	1030
Latitud $\geq 87.5^\circ$ (polo Sur)	1480	1070	2550



**Figura 1.22.-** (A) Modelo de elevación digital (imagen superior) y mapa topográfico del polo Norte (imagen inferior). (B) Modelo de elevación digital (imagen superior) y mapa topográfico del polo Sur (imagen inferior).

Las zonas en sombra permanente fueron estimadas tomando áreas rectangulares que abarcaban latitudes entre 85° y 90° en ambos polos lunares. En el polo Norte se encontró que en conjunto, había una área en sombra permanente de 2650 Km<sup>2</sup>, mientras que en el hemisferio Sur se encontraron zonas en sombra permanente con un área en conjunto de 5100km<sup>2</sup>. En ambos polos las regiones en sombra se localizaron dentro de grandes cráteres. Ejemplos de esto son los cráteres Hermite (86°N, 270°E) y otros dos cráteres (85°N, 63°E y 85.9°N, 115°E) en el Norte y Faustini (87.3°S, 77°E) y Shackleton (89.7°, 110°E) en el Sur (fig. 1.23).

Por último, el cráter Cabeus (85°S, 45°E) presentó pequeñas regiones que se encuentran en sombra permanente. Sin embargo, esto no se puede asegurar del todo debido a que la parte Norte del cráter no fue tomada por el radar. A pesar de esto, éste podría ser uno de los cráteres con gran potencial para ser una trampa fría.



**Figura 1.23.-** Localización de las trampas frías en los polos Sur A) y Norte (B).

# CAPITULO 2

## EXPLORACIÓN LUNAR

A principios del siglo XX la exploración espacial era un sueño muy lejano. Sin embargo, los avances alemanes en cohetes realizados durante la Segunda Guerra Mundial ayudaron a los rusos y estadounidenses a intensificar la carrera al espacio.

Debido a los conflictos entre la Unión Soviética y los Estados Unidos durante la década de los 60's, el presidente John F. Kennedy se vio obligado a prometer, en el discurso ante el Congreso de EE.UU el 25 de mayo de 1961, "que el hombre aterrizaría en la Luna y volvería a salvo antes de que terminara la década". Este discurso se debió al hecho de que los Estados Unidos se sentían amenazados por la URSS pues se temía que los soviéticos tuvieran un mayor avance tecnológico y con ello, prestigio además de mayor desarrollo militar.

El 20 de julio de 1969 la promesa del presidente John F. Kennedy se cumplió ya que el Astronauta Neil Armstrong(fig.2.1) se convirtió en el primer ser humano en pisar la superficie lunar .Esta misión contribuyó con imágenes de alta resolución de la superficie lunar, muestras lunares y datos topográficos, sísmicos, de gravedad y del ambiente lunar.



**Figura.2.1.**-Neil Armstrong sobre la superficie lunar (NASA).

La era del programa Apollo marcó el mayor avance en la exploración espacial visto hasta entonces y Estados Unidos sobresalió sobre la Unión Soviética.

Años después surgieron las misiones Clementine, Lunar Prospector, Chandrayaan-1,LCROSS y LRO que han ayudado a tener un mejor conocimiento sobre la Luna, y en particular sobre la existencia de depósitos de agua . Durante estas misiones se realizaron mapeos y otros experimentos que detectaron agua congelada en algunas regiones de la superficie lunar.

Esta información hizo que se plantearan tres grandes incógnitas: ¿Qué tipo de volátiles se pueden encontrar sobre la superficie lunar? ¿Hay agua entre ellos? y ¿Cómo es que llegaron estos volátiles y se lograron conservar sin escapar al espacio?.

Las posibles respuestas, dadas en base a los modelos teóricos que se tenían durante los años 60's, mostraron que no había ninguna posibilidad de existencia de agua sobre la superficie lunar debido a la ionización y

escape térmico que garantizaban el escape completo de volátiles por lo que la Luna se calificó como un “hueso seco”.

Conforme fueron pasando los años, dichos modelos han sido modificados e incluso descartados ya que se han observado diferentes tipos de volátiles sobre la superficie lunar, especialmente en los cráteres localizados en los polos lunares donde hay posibles rastros de depósitos de agua congelada. Se cree que la diversidad de elementos sobre la superficie lunar se debe a la constante caída de cuerpos celestes provenientes del Sistema Solar. Los investigadores hoy en día siguen planteando posibles respuestas a las incógnitas anteriores.

## **2.1 APOLLO**

El programa Apollo tenía como objetivo llevar al hombre a la Luna y traerlo de regreso a salvo a la Tierra. Las seis misiones que lograron este objetivo fueron las Apollo 11, 12, 14, 15, 16 y 17, trayendo consigo una gran cantidad de datos obtenidos de los experimentos y/u observaciones realizados durante su aterrizaje y sobrevuelo, y casi 400 kilogramos de muestras lunares.

Previamente a éstas, se realizaron varios lanzamientos para probar los sistemas de vuelo (SA-1, SA-2, SA-3, SA-4, SA-5, SA-6, SA-7, AS-9/Pegasus 1, SA-8/Pegasus 2, AS-10/Pegasus 3, AS-203, AS-201, AS-202, Apollo 4, Apollo 5 y Apollo 6).

El diseño y construcción de las naves del programa Apollo se realizó durante la década de los 60's. Estas consistían de un sistema de escape de emergencia (Launch Escape System), un módulo de mando (Command Module), un módulo de servicio (Service Module), un módulo lunar (Lunar Module) y por último el adaptador del módulo lunar (System Lunar Adapter).

Estas componentes permanecían juntas encima del cohete de lanzamiento hasta cruzar la atmósfera terrestre. Una vez que la nave cruzaba la atmósfera y lograba colocarse en órbita lunar, el módulo lunar se desprendía para aterrizar sobre la superficie lunar, después volvía a la órbita con el resto de la nave y comenzaba el regreso a la Tierra.

El 27 de enero de 1967, poco antes de llevar a cabo el primer vuelo tripulado ocurrió una de las peores tragedias en la historia de las misiones espaciales, cuando la tripulación compuesta por Virgil Grissom, Edwar White y Roger Chaffee murieron en un terrible incendio que se dio en el módulo de comando del Apollo, durante una prueba de pre-vuelo. Ellos fueron la primera tripulación entrenada para los vuelos espaciales. Esta gran tragedia llevó a la NASA a detener el programa Apollo para realizar las investigaciones necesarias sobre la causa del accidente. Se encontró que la causa más probable del accidente fue una chispa que se originó en un pequeño circuito en un conjunto de alambres que se encontraba enfrente de un asiento de los astronautas, debido a la gran cantidad de material inflamable y un entorno lleno de oxígeno, el fuego iniciado se extendió rápidamente.

Al concluir las investigaciones de lo ocurrido al Apollo 1, la NASA se dio a la tarea de cambiar por completo el programa Apollo. Las modificaciones incluyeron un nuevo diseño de cabina donde habría una mezcla de oxígeno y nitrógeno durante el lanzamiento.

Se eliminó una gran parte del material inflamable reemplazándolo con componentes auto-extinguibles y se anexó una escotilla que se abriría rápidamente hacia afuera para una pronta evacuación de la cabina. Las modificaciones realizadas tuvieron un diseño más riguroso, se supervisó el más mínimo detalle pues la NASA no se podía dar el lujo de cometer otro error, y menos de arriesgar vidas humanas. El éxito final del programa Apollo también fue un homenaje a los tres astronautas Grissom, White y Chaffee cuya trágica pérdida no fue en vano. En Octubre de 1968 el Apollo 7 ya estaba listo para ser lanzado. Los Apollo 7 y 9 fueron las primeras astronave tripuladas que orbitaron la Tierra y que lograron el regreso de su tripulación. En las

misiones Apollo 8 y 10 se realizaron distintas pruebas de los sistemas de vuelo en órbita alrededor de nuestro satélite y se obtuvieron fotografías de la superficie lunar.

Después de los seis aterrizajes lunares, el programa Apollo se dio por terminado pues las misiones Apollo 18, 19 y 20 se cancelaron por limitaciones de presupuesto. El fin del programa Apollo marcó el fin de la mayor era de exploración espacial vista hasta entonces y puso a los Estados Unidos a la cabeza de la carrera espacial sobre la Unión Soviética, como lo deseaba John F. Kennedy.

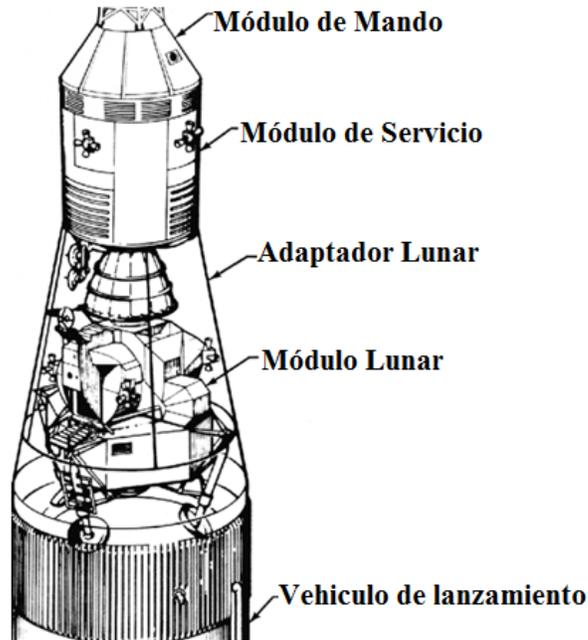


Figura.2.2.-Esquema de una nave Apollo.

### 2.1.2 Experimentos APOLLO

Los experimentos realizados durante las misiones Apollo tuvieron como objetivo conocer más sobre la morfología, origen y composición de la Luna, estos se muestran en la tabla 2.1 así como las misiones que los llevaron a cabo.

Tabla.2.1.-Lista de experimentos realizados durante las misiones Apollo 11 a 17(Fuente: <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/lunar/apollo.html>)

EXPERIMENTO	DESCRIPCION	MISIÓN
<p><b>Detector de Meteoroides en la Ventana</b></p> <p>Window Meteoroid Detector</p>	<p>El objetivo del experimento fue utilizar la superficie de la ventana del módulo de comando para obtener información sobre el flujo de meteoroides.</p> <p>Los residuos y morfología de los cráteres producidos en la ventana fueron examinados obteniendo información sobre la dinámica y propiedades físicas de los meteoroides.</p>	<p>Apollo 11 Apollo 12 Apollo 14 Apollo 15 Apollo 16 Apollo 17</p>

<p><b>Geología de Campo en la Luna</b></p> <p>Lunar Field Geology</p>	<p>Este experimento implica la colección y documentación de muestras de rocas. Las muestras fueron recolectadas usando tenazas, palas, martillos y tubos que penetraron la superficie lunar hasta una profundidad máxima de 3.3 m.</p> <p>Las muestras fueron puestas en contenedores sellados al vacío.</p> <p>Durante las distintas misiones se recolectaron 21 Kg (Apollo 11), 31 Kg (Apollo 12), 36 Kg(Apollo 14),82 Kg (Apollo 15) ,100 Kg (Apollo 16) y 110 Kg(Apollo 17) de muestras lunares que fueron analizadas en la Tierra para investigaciones científicas sobre la composición y origen de la Luna.</p>	<p>Apollo 11 Apollo 12 Apollo 14 Apollo 15 Apollo 16 Apollo 17</p>
<p><b>Composición del Viento Solar por Atrapamiento en una hoja</b></p> <p>Solar Wind Composition By Foil Entrapment</p>	<p>El objetivo de este experimento fue determinar la composición elemental e isotópica de los gases nobles y de otros elementos en el viento solar contando la cantidad de partículas atrapadas en una hoja.</p> <p>Esos datos ayudaron a poner restricciones a las distintas teorías sobre el origen del Sistema Solar, la historia de las atmósferas planetarias y la dinámica del viento solar.</p>	<p>Apollo 11 Apollo 12 Apollo 14 Apollo 15 Apollo 16 Apollo 17</p>
<p><b>Experimento Sísmico Pasivo</b></p> <p>Passive Seismic Experiment</p>	<p>El propósito del experimento sísmico pasivo fue monitorear la actividad sísmica de la Luna debido a oscilaciones lunares intrínsecas y a impactos de meteoroides.</p> <p>Los datos ayudaron a conocer la estructura interna de la Luna hasta unos 100 Km de profundidad.</p>	<p>Apollo 11 Apollo 12 Apollo 14 Apollo 15 Apollo 16</p>

<p><b>Retroreflector Laser para Medición de Distancias</b></p> <p>Laser Ranging Retroreflector</p>	<p>El retroreflector consistió en un cubo con una serie de ángulos reflectores que actuaban como espejo y que reflejaban un haz de luz proveniente de la Tierra.</p> <p>Este experimento aportó grandes contribuciones al conocimiento de la órbita lunar , la distancia entre la Luna y la Tierra (385,000 Km) , la distancia con la que se aleja la Luna de la Tierra (actualmente 3.8 cm por año) y la variación en la rotación de la Luna. Esa variación está relacionada con la distribución de la masa interior de la Luna por lo que las mediciones postularon de la existencia de un pequeño núcleo con un radio menor a los 350 kilómetros.</p> <p>Esos datos contribuyeron a tener un mejor entendimiento sobre los cambios de rotación de la Luna.</p>	<p>Apollo 11 Apollo 14 Apollo 15</p>
<p><b>Experimento de Sismicidad Activa</b></p> <p>Active Seismic Experiment</p>	<p>El objetivo de los experimentos de sismicidad activa fue generar y monitorear ondas sísmicas sobre de la superficie lunar para estudiar su estructura interna, propiedades físicas y los materiales subterráneos (máximo 900 m de profundidad).</p> <p>En el Apollo 14 la fuente de energía sísmica fue un dispositivo llamado “thumper” que contenía 21 cargas de pequeños explosivos. El aparato thumper registró dos ondas-P con distintas velocidades en el cráter Fra Mauro.</p> <p>En la Apollo 16 se monitorearon los sismos producidos de forma artificial y natural. Las ondas artificiales fueron producidas por cargas explosivas .Se registraron ondas-P con una velocidad 114 m/s.</p>	<p>Apollo 14 Apollo 16</p>
<p><b>Detector de Polvo Lunar</b></p> <p>Lunar Dust Detector</p>	<p>El experimento de detección de polvo lunar sirvió para evaluar el efecto del ambiente lunar (partículas cósmicas , radiación ultravioleta , acumulación de polvo y temperatura ) sobre las celdas solares de silicio .Otro de los objetivos fue determinar si el protector de vidrio que cubría las celdas era necesario.</p> <p>Los sensores que se colocaron en la celda solar detectaron temperaturas entre 84 y 408 K.</p> <p>El experimento medía la acumulación de polvo lunar el cual resultó no ser tan pesado como se esperaba.</p>	<p>Apollo 11 Apollo 12 Apollo 14 Apollo 15</p>
<p><b>Mecánica de Suelos</b></p> <p>Soil Mechanics</p>	<p>Este experimento se realizó para tener un mejor conocimiento sobre la naturaleza, origen, mecánica y los procesos responsables de la morfología actual de la superficie lunar. También sirvió para proporcionar datos de ingeniería sobre la interacción de sistemas y operación de la tripulación con la</p>	<p>Apollo 11 Apollo 12 Apollo 14 Apollo 15 Apollo 16 Apollo 17</p>

	<p>superficie lunar.</p> <p>Se obtuvieron datos de la composición, textura, propiedades mecánicas y variación del suelo lunar de los lugares donde se realizaron los aterrizajes. Esos datos fueron usados para formular, verificar o modificar teorías de la historia y procesos lunares.</p> <p>De importancia particular fue la determinación de las características del tamaño de las partículas, forma, densidad y resistencia.</p> <p>Los datos fueron obtenidos a través de fotografías, observaciones de los astronautas y examen de muestras del suelo.</p>	
<p><b>Espectrómetro para Viento Solar</b></p> <p>Solar Wind Spectrometer</p>	<p>El espectrómetro para viento solar fue diseñado para medir la cantidad de protones y electrones en la superficie lunar, así como estudiar las propiedades de la superficie e interior de la Luna, las del viento solar y la magnetosfera de la Tierra.</p>	<p>Apollo 12 Apollo 14 Apollo 15 Apollo 16</p>
<p><b>Magnetómetro de la Superficie Lunar</b></p> <p>Lunar Surface Magnetometer</p>	<p>Este experimento fue diseñado para medir el campo magnético Lunar. La información obtenida reveló información sobre la existencia de un núcleo lunar, el campo magnético de la Tierra y las anomalías del campo magnético en zonas locales.</p>	<p>Apollo 12 Apollo 14 Apollo 15 Apollo 16</p>
<p><b>Experimento con el Detector de Iones Supratermales</b></p> <p>Suprathermal Ion Detector Experiment(SIDE)</p>	<p>SIDE midió el flujo, densidad, velocidad y energía de los iones positivos que llegaban a la superficie lunar incluyendo los generados por la ionización ultravioleta y la corriente del viento solar que interacciona con la tenue exósfera lunar.</p>	<p>Apollo 12 Apollo 14 Apollo 15</p>
<p><b>Medidor Iónico de Cátodo Frío</b></p> <p>Cold Cathode Ion Gauge</p>	<p>Este experimento fue diseñado para medir la densidad de partículas neutras en la superficie lunar.</p> <p>Los datos que se obtuvieron de este experimento fueron expresados en términos de densidad, equivalente a una atmósfera lunar de nitrógeno, obteniendo de <math>2 \times 10^5</math> a <math>1 \times 10^{11}</math> partículas por cm cúbico.</p> <p>Esos datos ayudaron a tener un conocimiento más amplio sobre el origen y pérdida de la delgada atmósfera lunar.</p>	<p>Apollo 12 Apollo 14 Apollo 15</p>

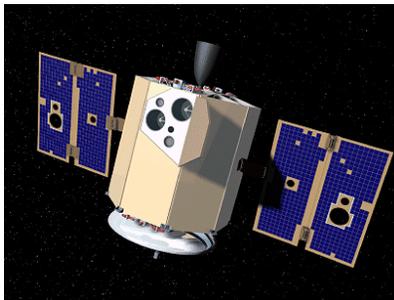
<p><b>Detector de rayos cósmicos en la superficie lunar</b></p> <p>Lunar Surface Cosmic Ray Detector</p>	<p>El detector de rayos cósmicos tuvo como objetivos los siguientes :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Medir el flujo de partículas del viento solar con número atómico <math>Z &gt; 26</math> usando detectores de mica.</li> <li>• Determinar el flujo de iones del viento solar usando una lámina de metal.</li> <li>• Medir el flujo de energía de partículas (galácticas y solares), durante condiciones de Sol quieto usando detectores de mica, vidrio y plástico.</li> <li>• Determinar la concentración de Radón en la atmósfera lunar .</li> </ul> <p>Todos los detectores fueron traídos de regreso a la Tierra para analizar las partículas que fueron detectadas.</p>	<p>Apollo 16 Apollo 17</p>
<p><b>Espectrometro de rayos –Gamma</b></p> <p>Gamma-Ray Spectrometer</p>	<p>El espectrómetro de rayos Gamma realizó un mapeo geoquímico mediante la observación de la radiación gamma emitida por la superficie lunar.</p>	<p>Apollo 15 Apollo 16</p>
<p><b>Fluorescencia de rayos-X</b></p> <p>X-Ray Fluorescence</p>	<p>El experimento fue diseñado para observar la intensidad y la distribución de la energía emitida por fluorescencia de rayos X producida por la interacción de los rayos solares con la superficie lunar.</p>	<p>Apollo 15 Apollo 16</p>
<p><b>Flujo de Calor</b></p> <p>Heat Flow</p>	<p>Con este experimento se determinó la tasa de pérdida de calor interno de la Luna. Se obtuvieron mediciones de temperatura que proporcionaron información sobre las propiedades térmicas de la superficie y subsuelo.</p>	<p>Apollo 15 Apollo 16 Apollo 17</p>
<p><b>Magnetómetro de Medidor de Flujo Biaxial</b></p>	<p>Con el magnetómetro se determinaron las propiedades físicas, eléctricas y las interacciones del plasma solar con la Luna.</p>	<p>Apollo 15 Apollo 16</p>

Biaxial Fluxgate Magnetometer		
<b>Gravímetro lunar de la superficie</b>  Lunar Surface Gravimeter	El propósito del experimento fue determinar el valor de la aceleración gravitacional en la Luna en relación con el de la Tierra, la deformación de la superficie lunar por las fuerzas de marea y la medición de los componentes verticales de la sismicidad natural de la Luna.	Apollo 17
<b>Perfil sísmico lunar</b>  Lunar Seismic Profiling	En este experimento se adquirieron datos sobre las propiedades físicas de los materiales cercanos a la superficie lunar .Los objetivos incluyeron mediciones de señales sísmicas producidas por detonaciones explosivas sobre la superficie, monitoreo de la actividad sísmica natural resultante de sismos lunares o impactos de meteoroides, registro resultante de señales sísmicas desde la etapa de ascenso del Módulo Lunar. Este experimento detalló información sobre las características de la geología lunar a una profundidad de 3km.	Apollo 15 Apollo 17
<b>Eyecta lunar y meteoritos</b>  <b>Lunar Ejecta and Meteorites</b>	Este experimento midió la frecuencia con que la Luna es impactada por partículas de polvo cósmico y los efectos de la expulsión de la eyecta causada por impactos con m meteoroides. Los objetivos de la misión fueron los siguientes: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Determinar los antecedentes y la tasa de variación, a largo plazo, del flujo de polvo cósmico en la superficie lunar.</li> <li>• Determinar el tamaño y naturaleza de la eyecta lunar por impacto de meteoroides con la superficie.</li> <li>• Determinar la contribución relativa de cometas y asteroides.</li> </ul>	Apollo 17
<b>Radiómetro por escaneo infrarrojo</b>  Infrared Scanning Radiometer	Se midieron las emisiones térmicas de la superficie lunar para obtener un mapa de alta resolución de las temperaturas de la superficie. Este mapa permitiría cálculos de curvas de enfriamiento de varias regiones y la caracterización de los parámetros físicos de la superficie lunar tales como la conductividad térmica, la densidad de masa y el calor específico.	Apollo 17

<b>Espectrómetro de partículas Alfa</b>  Alpha Particle Spectrometer	Este experimento fue diseñado para determinar la evolución, la composición y la identificación de fuentes de emisión de radón sobre la superficie lunar.	Apollo 15 Apollo 16
<b>Observaciones del Radar Biestático (Bistatic Radar)</b>  Down-Link Bistatic Radar Observations	Este experimento consistió en analizar las señales de radio reflejadas desde la superficie lunar. Los resultados revelaron información sobre las propiedades de la superficie lunar hasta una profundidad de 20m	Apollo 14 Apollo 15 Apollo 16

## 2.2 CLEMENTINE

El 25 de enero de 1994 la astronave conocida como Clementine fue lanzada desde la base de las fuerzas aéreas en Vandenberg, California. La tecnología utilizada por la NASA para la construcción de la sonda Clementine fue heredada de sensores utilizados para detectar misiles o aviones enemigos durante la guerra fría (1947-1991). Esta construcción también corrió a cargo del Laboratorio de Investigación Naval donde el principal objetivo de la misión fue el estudio de la superficie lunar. Para tener un estudio más detallado de la superficie lunar el laboratorio Naval ofreció a la NASA 10 instrumentos que incluían 6 cámaras que operaban en las bandas visible, infrarrojo (cercano y lejano) y ultravioleta, así como un telémetro con láser infrarrojo para la astronave. La astronave tenía forma cilíndrica y estaba dotada de 2 paneles con celdas fotoeléctricas (figura 2.3).



**Figura.2.3.-** Astronave Clementine (NASA).

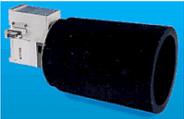
Clementine realizó 351 órbitas lunares transmitiendo a la Tierra 1.800.000 imágenes multispectrales de excelente calidad. Al finalizar la primera parte de la misión, Clementine abandonó la órbita lunar dirigiendo su objetivo al asteroide Geógrafos. Durante este segundo objetivo ocurrió un fallo informático que provocó una desestabilidad en la astronave. Al no recuperar el control se decidió modificar la trayectoria trayéndola de regreso a órbita lunar. Durante los dos meses que permaneció Clementine en órbita lunar se obtuvieron datos de suma importancia.

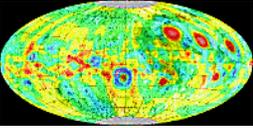
Al ser analizados estos datos, los científicos hicieron un gran descubrimiento: la posibilidad de la existencia de hielo de agua dentro de algunos cráteres localizados en los polos lunares. Este descubrimiento fue confirmado en 1998 por Lunar Prospector.

### **2.2.1 Experimentos Clementine**

Los experimentos de la misión Clementine proporcionaron una gran cantidad de información sobre la superficie lunar (morfología, topografía y composición) que permitió hacer inferencias sobre la historia y procesos lunares. En la tabla 2.2 se muestran los experimentos que fueron implementados durante esta misión.

**Tabla.2.2.-**Experimentos realizados durante la misión Clementine  
(<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/experimentSearch.do?spacecraft=Clementine>).

EXPERIMENTO	DESCRIPCIÓN	
<p><b>Cámara CCD Ultravioleta/Visible</b></p> <p>Ultraviolet /Visible CCD Camera (UV/Vis)</p>	<p>Esta cámara fue diseñada para estudiar la superficie lunar y el asteroide Geógrafos en el ultravioleta y el visible. Se tomaron imágenes que sirvieron para el estudio morfológico y del craterismo en la superficie lunar.</p> <p>El objetivo en el asteroide Geógrafos fue obtener información sobre las propiedades petrológicas por lo que se tomarían imágenes en distintos ángulos respecto al Sol. Debido a problemas durante la misión se tuvo que abortar el estudio del asteroide.</p>	
<p><b>Cámara CCD en el cercano infrarrojo</b></p> <p>Near-Infrared CCD Camera (NIR)</p>	<p>Esta cámara fue diseñada para el estudio de la superficie lunar y el asteroide Geógrafos en seis diferentes longitudes de onda en el infrarrojo cercano. Este experimento dio información sobre la petrología de la superficie lunar. Se obtuvo un mapeo completo la Luna durante los dos meses que duró esta misión.</p>	
<p><b>Cámara Infrarroja en Longitudes de Onda Larga</b></p> <p>Long-Wavelength Infrared Camera (LWIR)</p>	<p>Esta cámara fue diseñada para obtener imágenes de lugares oscuros para que proporcionaran información sobre las características de la Luna y del asteroide Geógrafos en el infrarrojo y de las propiedades térmicas de los materiales de ambos. Se valoraron las características de la regolita, tal como su composición.</p>	
<p><b>Cámara de Alta Resolución</b></p> <p>High-Resolution Camera (HIRES)</p>	<p>Esta cámara fue diseñada para capturar imágenes de la superficie lunar y de Geógrafos. La captura de imágenes permitió el estudio de los procesos que ocurren en la superficie lunar y en combinación con los datos espectrales, permitió el estudio de la composición y geología lunares.</p> <p>La alta resolución y el pequeño campo de visión solo permitió cubrir áreas particulares de la Luna.</p>	
<p><b>Cámara Seguidora de Estrellas</b></p> <p>Star Tracker Cameras</p>	<p>La astronave Clementine fue equipada con dos cámaras seguidoras de estrellas con el propósito de capturar imágenes de estrellas a diferentes altitudes de la nave espacial. La captura de estas imágenes ayudaría a elaborar un catálogo de imágenes estelares con distintos ángulos que podría ayudar a la navegación.</p>	

<p><b>Sistema de Detección y Mediciones de Distancia Mediante Laser</b></p> <p>Laser Image Detection and Ranging System(LIDAR)</p>	<p>Este experimento fue diseñado para medir la distancia desde la nave espacial hasta superficie de la Luna. Esto permitió hacer un mapa altimétrico que sería usado para reconstruir la morfología de la Luna. También sirvió para el estudio de la corteza lunar.</p>	
<p><b>Experimento de Radar Biestático</b></p> <p>Bistatic Radar Experiment</p>	<p>Este experimento utilizó un equipo de transmisión de radio para investigar las regiones polares de la Luna para encontrar alguna evidencia de hielo en cráteres en sombras permanentes. El método básico del radar biestático consistió en mandar señales de radio desde la nave espacial a un punto sobre la superficie lunar desde el cual se reflejaba hacia la Tierra donde eran captadas. La interpretación de la información recibida daba una descripción de la superficie lunar. Esa descripción era de suma importancia ya que la magnitud de la señal reflejada y la sensibilidad de la polarización mostrarían si la superficie contenía agua congelada u otros volátiles.</p> <p>Se notó que la señal reflejada tenía una mayor amplitud para volátiles congelados que para rocas de silicatos.</p> <p>Una de las características del hielo es que posee una polarización circular la cual fue detectada en la señal reflejada, la cual mostró polarizaciones circulares a la izquierda y derecha con un radio que podía cubrir la mayor parte del Polo Sur.</p> <p>También se realizó la detección conocida como retrodispersión coherente que consistió en tener una geometría nave espacial-objetivo-receptor con ángulos cercanos a cero. La señal reflejada proporciona información sobre las zonas donde se localiza el hielo incrustado. Los resultados indicaron la posibilidad de hielo (mezclado con regolita) en los cráteres en sombras permanentes.</p>	
<p><b>Experimento Transpondedor Banda-S (15-7.5 cm) de Gravedad Doppler</b></p> <p>S-Band Transponder Doppler Gravity Experiment</p>	<p>Este experimento fue diseñado para calcular el campo gravitacional de la Luna por medio de perturbaciones en el movimiento de la astronave ocasionadas por este campo. Esta información ayudaría hacer modelos de la estructura interior de la Luna. La emisión y recepción de la banda-S proporcionó información sobre la distancia relativa Luna-Tierra usando el efecto Doppler.</p>	

<p><b>Telescopio de Partículas Cargadas</b> Charged Particle Telescope (CPT)</p>	<p>El telescopio de partículas cargadas en Clementine fue diseñado para medir el flujo de electrones .Los principales objetivos de investigación fueron:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Estudio del efecto que ocasiona el campo magnético de la Tierra en la caída de cuerpos sobre la superficie lunar (meteoroides).</li> <li>• Monitoreo del viento solar en diferentes regiones de la superficie lunar.</li> <li>• Analizar los efectos de incidencia de partículas sobre las celdas solares de la astronave.</li> </ul>	
--	---	--

Debido a los grandes hallazgos realizados durante la misión Clementine , está se convirtió en uno de los mayores logros de EUA durante 1994.

### 2.3 LUNAR PROSPECTOR

La misión Lunar Prospector fue diseñada para continuar y complementar los estudios realizados por la misión Clementine, enfocándose en mapear con más detalle la superficie lunar (fig.2.4). Esta misión se enfocó en la composición de la superficie lunar para determinar la existencia de depósitos de agua congelada en los Polos lunares, así como en estudiar los eventos de desgasificación. La información capturada durante 19 meses permitió construir un mapa detallado sobre la composición de la superficie lunar. También se obtuvieron datos sobre el campo magnético y gravitacional de la Luna. Toda esta información permitió un mejor conocimiento sobre el origen, evolución y estado actual de la Luna.

Al terminar su misión el 31 de Julio de 1999 la Lunar Prospector fue lanzada para impactar de forma controlada en un área de sombras permanentes cerca del polo Sur, con la finalidad de detectar vapor de agua proveniente de acumulaciones de hielo. El 6 de Marzo de 1998 se recibió información a partir de la cual se infirió la posibilidad de la existencia de agua congelada en ambos polos lunares. Sin embargo en los observatorios terrestres no se detectó ningún rastro de vapor de agua, la explicación que se dio a este fallo fue que tal vez la nave no impactó donde estaba previsto.

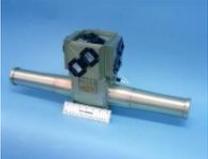


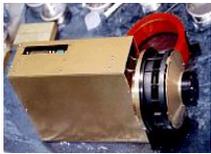
**Figura.2.4.-Luna Prospector.**

### 2.3.1 Experimentos Lunar Prospector

La misión Lunar Prospector llevó consigo 6 experimentos para el estudio detallado de la Luna. Debido a la gran cercanía de la órbita de la astronave con la superficie lunar (40 km para fotografías de alta resolución) se obtuvieron datos con mayor resolución.

**Tabla.2.3.-**Experimentos realizados en la misión Lunar Prospector (Fuente: <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/experimentSearch.do?spacecraft=Lunar%20Prospector>).

EXPERIMENTO	DESCRIPCION	
<p><b>Espectrómetro de Rayos Gamma</b></p> <p>Gamma Ray Spectrometer (GRS)</p>	<p>El propósito fundamental de este experimento fue proporcionar mapas globales de las abundancias de elementos sobre la superficie lunar. Fue diseñado para registrar el espectro de rayos gamma emitido por :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• El decaimiento radioactivo de elementos contenidos en la corteza lunar.</li> <li>• Elementos en la corteza bombardeada por rayos cósmicos y partículas de viento solar.</li> </ul> <p>De donde se quería obtener información sobre los elementos emisores de rayos gamma cuando éstos son golpeados por rayos cósmicos o partículas del viento solar como el hierro (Fe), el titanio (Ti), el oxígeno (O), el silicio (Si), el aluminio (Al), el magnesio (Mg) y el calcio (Ca). También de los elementos radioactivos que generan espontáneamente rayos gamma como el uranio (U), el torio (Th) y el potasio (K) .</p> <p>El espectrómetro también fue capaz de detectar neutrones epitermales que complementan el espectrómetro de neutrones en la investigación de agua sobre la superficie lunar.</p>	
<p><b>Espectrómetro de Neutrones</b></p> <p>Neutron Spectrometer (NS)</p>	<p>El espectrómetro de neutrones fue diseñado para la detección de pequeñas cantidades de hidrógeno sobre y debajo de la superficie lunar ya que uno de los objetivos de este experimento era la detección de agua congelada en los cráteres en sombras permanentes donde el hidrógeno podría ser indicativo de la existencia de este compuesto. El espectrómetro solo pudo detectar agua congelada a un nivel menor a 0.01%.</p> <p>Otro de los objetivos de este espectrómetro era la determinación del flujo de escape de neutrones rápidos,</p>	

	térmicos y epitérmicos, ya que estos proporcionan información sobre la cantidad de átomos de hidrógeno.	
<p><b>Magnetómetro</b></p> <p>Magnetometer (MAG)</p>	<p>Fue usado principalmente para detectar el campo magnético en diferentes regiones de la corteza lunar. La información obtenida sirvió para el estudio del origen y naturaleza del campo magnético así como para estimar el tamaño y composición del núcleo lunar.</p> <p>Finalmente se logró medir el flujo superpuesto de tres campos magnéticos: el de la Tierra, el que arrastra al viento solar y el de la Luna.</p>	
<p><b>Espectrómetro de partículas alfa</b></p> <p>Alpha Particle Spectrometer (APS)</p>	<p>Fue usado para encontrar eventos de desgasificación de radón sobre la superficie lunar por detección de partículas alfa provenientes del decaimiento del Radón en Polonio. Con este experimento se quería encontrar una fuente posible de la tenue atmosfera lunar la cual podría ser el resultado de una actividad tectónica/volcánica muy baja en la Luna.</p>	
<p><b>Reflectómetro de electrones</b></p> <p>Electron Reflectometer (ER)</p>	<p>Este experimento fue diseñado para recolectar información sobre el remanente del campo paleomagnético lunar. Este medía la energía espectral y la dirección de los electrones. Esta información fue usada para determinar la localización e intensidad del campo magnético. Este experimento ayudó a hacer el mapa de este campo y proporcionó información sobre sus orígenes.</p> <p>Los datos obtenidos ayudaron al estudio sobre el origen del paleomagnetismo lunar y sobre el tamaño y composición del núcleo lunar.</p>	
<p><b>Experimento de Gravedad Doppler</b></p> <p>Doppler Gravity Experiment (DGE)</p>	<p>El propósito de este experimento fue analizar la superficie y la parte interna de la Luna así como dar una estimación de su campo gravitacional. Las perturbaciones en la astronave debidas al campo gravitacional lunar permitieron afinar el modelo que se tenía de este campo. Al analizar la emisión y recepción de banda-S se pudieron hacer estimaciones sobre la composición de la superficie y del interior de la Luna.</p>	

## 2.4 CHANDRAYAAN-1

La astronave no tripulada Chandrayaan-1 (fig.2.5) orbitó la Luna durante dos años realizando distintos experimentos de interés científico que ayudaron a tener un mejor conocimiento de nuestro satélite (fig. 2.5). Este lanzamiento fue catalogado como el más grande avance espacial de la India.

Esta astronave mostró grandes avances tecnológicos, uno de ellos fue la fuente de energía que logró que la sonda viajara por tanto tiempo: un panel solar. Esta misión llevaba consigo cinco experimentos fabricados por la India y otros seis en el extranjero, estos son brevemente explicados en la tabla 2.5.

La misión CHANDRAYAAN-1 tenía los siguientes objetivos:

- Mapear ambas caras de la Luna.
- Mapear la mineralogía y los elementos químicos (Magnesio, Aluminio, Silicio, Calcio, Helio, Titanio, Radón, Uranio, Torio y Hierro) que se encuentran en las regiones en sombra permanente en la superficie lunar.
- Búsqueda de agua congelada en la superficie y subsuelo, especialmente en los polos lunares.
- Identificación de los elementos químicos en las rocas situadas en las tierras altas de la Luna.
- Observación de toda la superficie lunar por medio de rayos-X (10 keV).
- Tratar de probar alguna de las nuevas teorías sobre el origen y evolución de la Luna.

En caso de que se detectara la presencia del elemento  $He_3$  (que es difícil de encontrar en la Tierra) en la superficie lunar este serviría en un futuro como fuente de energía (fusión nuclear).

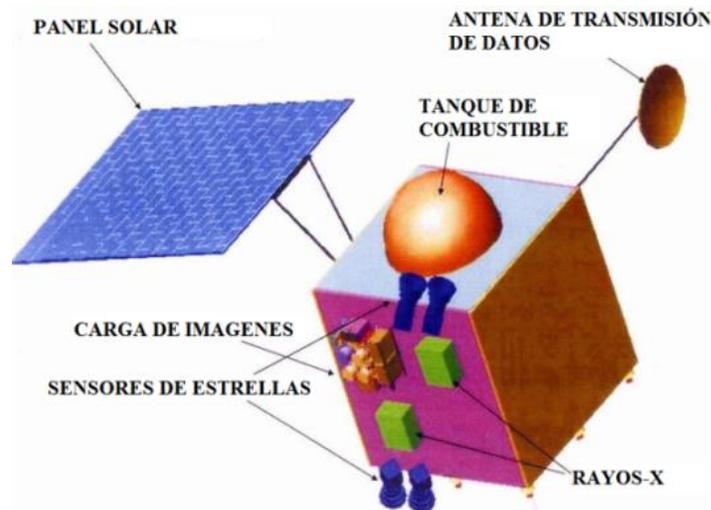
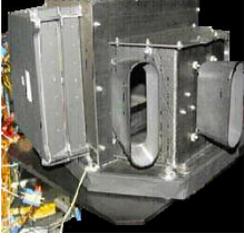
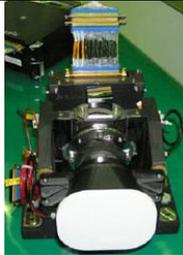
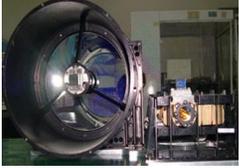


Figura.2.5.- Astronave Chandrayaan-1

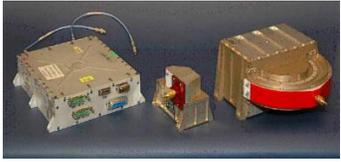
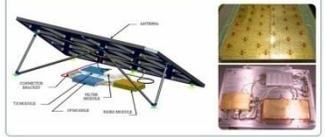
## 2.4.1 Experimentos CHANDRAYAAN-1

En la siguiente tabla 2.4 se da una breve explicación de los experimentos realizados durante la misión CHANDRAYAAN-1.

**Tabla.2.4.-**Experimentos realizados durante la misión CHANDRAYAAN-1 (Fuente: <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/experimentSearch.do?spacecraft=Chandrayaan%201%20Lunar%20Orbiter>).

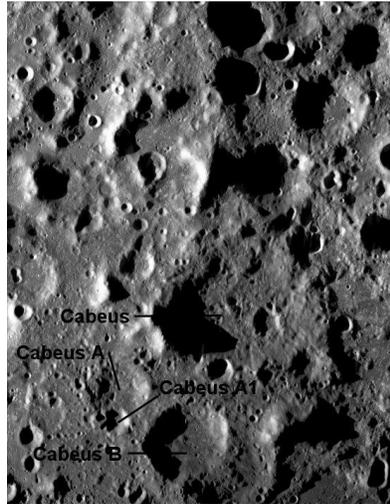
EXPERIMENTO	DESCRIPCIÓN	
<p><b>Cámara de mapeo de terreno</b></p> <p>Terrain Mapping Camera (TMC)</p>	<p>El objetivo de esta cámara fue mapear la topografía de la Luna desde distintas distancias y hacer un Atlas en 3a-dimensión con un alta resolución espacial . Esto ayudó a entender los procesos de evolución y permitió el estudio detallado de regiones de interés científico. El modelo de elevación digital del terreno obtenido por la TMC mejoró el conocimiento de la Topografía Lunar.</p>	
<p><b>Imágenes Hiper Espectrales</b></p> <p>Hyper-Spectral Imager(HySI)</p>	<p>Este experimento fue diseñado para obtener datos de espectroscopia para mapear minerales sobre la superficie lunar. Los datos obtenidos ayudaron a confirmar la composición de la superficie lunar así como la composición mineralógica del interior de la Luna.</p>	
<p><b>Instrumento de Medición de Distancias Mediante Laser</b></p> <p>Lunar Laser Ranging Instrument (LLRI)</p>	<p>Este experimento fue diseñado para realizar un mapa de la topografía lunar desde órbita polar. El resultado fueron mapas topográficos globales con una resolución de 10 m, basados en la información de bandas espectrales entre el visible y en el cercano infrarrojo (430 a 3000nm).</p> <p>También ayudó a determinar la densidad de la corteza lunar por medio del estudio de la deformación y del plegamiento de la litosfera.</p>	
<p><b>Mapeo de la Mineralogía Lunar</b></p> <p>Moon Mineralogy Mapper(M<sup>3</sup>)</p>	<p>De este experimento se obtuvieron mapas de alta resolución de la Luna que ayudaron a comprender más su evolución temprana y sus recursos minerales.</p> <p>El M<sup>3</sup> es un espectrómetro con solo un detector que considera longitudes de onda desde 430 a 3000 nm (del visible al cercano infrarrojo) a una resolución espectral a 10 nm.</p> <p>Con este espectrómetro se analizaron los diferentes tipos de absorción y emisión de las rocas y los minerales a partir de su espectro característico.</p> <p>También obtuvo información detallada de las tierras altas, cráteres de impacto y la posibilidad de la existencia de volátiles.</p>	

<p><b>Espectrómetro Infrarrojo</b></p> <p>Infrared Spectrometer (SIR-2)</p>	<p>El espectrómetro infrarrojo (SIR-2) tiene una forma de red que cubre el espectro infrarrojo desde 0.93 hasta 2.4 <math>\mu\text{m}</math> y tiene una resolución angular de 1.11 milirradiantes.</p> <p>Los objetivos de este experimento:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Determinar la composición de la corteza y del manto de la Luna. Analizar la geología, mineralogía y topografía de la superficie lunar.</li> <li>▪ Investigar los procesos de los basaltos en los maria y la formación de cráteres sobre la superficie lunar.</li> <li>▪ Estudiar la composición de la corteza y los recursos minerales para planificar futuros sitios de aterrizaje y exploración.</li> <li>▪ Estudiarla “erosión espacial” como un proceso sobre la superficie lunar.</li> </ul>	
<p><b>Espectrómetro de rayos-X</b></p> <p>X-ray Spectrometer (C1XS)</p>	<p>Este experimento fue diseñado para determinar la composición de los principales materiales de la superficie lunar así como dar solución a la pregunta sobre el origen y evolución de la Luna. Uno de los objetivos primarios de este experimento es medir las abundancias de los tres principales elementos formadores de rocas: Mg, Al, Si. También se esperaba detectar elementos menores tales como el Ti, Ca y Fe durante eventos de máxima actividad solar (en este periodo el Sol emite rayos-X con la suficiente energía para excitar estos átomos) .</p>	
<p><b>Espectrómetro de rayos-X de alta energía</b></p> <p>High Energy X-ray Spectrometer (HEX)</p>	<p>Este espectrómetro medía tanto rayos X como rayos gamma en un intervalo de 20 a 250 keV para detectar emisiones de la superficie lunar debidas al decaimiento radioactivo. Para regiones más complicadas se usó un intervalo de 30 keV a 270 keV. Este es el primer experimento que llevó a cabo estudios espectrales de superficies planetarias complejas usando rayos-X y buenos detectores de energía.</p> <p>Los objetivos a realizar durante la misión :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Identificar el exceso de <math>^{210}\text{Pb}</math> en regiones del Polo Sur depositado ahí como resultado del transporte de <math>^{222}\text{Rn}</math>, un producto de decaimiento de <math>^{238}\text{U}</math>, desde otras regiones de la Luna. Eso permitió entender el transporte de otros volátiles tales como el agua en las regiones de los polos.</li> </ul>	

	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Detectar otras emisiones radioactivas dentro del intervalo de 30 a 270 keV en la superficie lunar.</li> <li>▪ Explorar la posibilidad de identificar regiones polares cubiertas por gruesos depósitos de hielo.</li> </ul>	
<p><b>Analizador de reflexión sub-atómica</b></p> <p>Sub-Atomic Reflection Analyzer (SARA)</p>	<p>El analizador daría una imagen de la superficie lunar usando átomos neutros de baja energía en el intervalo de 10 eV a 3.2 keV para obtener:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ La composición de la superficie lunar incluyendo las áreas en sombra permanente y áreas ricas en volátiles.</li> <li>▪ La interacción del viento solar y la superficie lunar.</li> <li>▪ Las anomalías magnéticas de la superficie lunar.</li> <li>▪ Estudios del clima espacial.</li> </ul>	
<p><b>Radar pequeño de apertura sintética (Mini-SAR)</b></p> <p>Miniature Synthetic Aperture Radar (Mini-SAR)</p>	<p>El Mini-SAR es un radar que fue diseñado principalmente para elaborar mapas para identificar las zonas de dispersión en los polos lunares para determinar si era posible encontrar agua congelada. Los datos capturados por Mini-SAR mostraron concentraciones de hielo en ciertas zonas.</p>	
<p><b>Monitor de Dosis de Radón</b></p> <p>Radon Dose Monitor (RADOM)</p>	<p>El experimento RADOM (Bulgaria) monitoreó la radiación en la superficie lunar. Los objetivos científicos a desarrollar durante la misión fueron los siguientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Medir el flujo de partículas, los espectros de energía y la acumulación de radiación en la órbita lunar.</li> <li>▪ Proporcionar una estimación de la dosis de radiación alrededor de la Luna en diferentes latitudes y altitudes.</li> <li>▪ Estudiar los riesgos de radiación durante la exploración lunar. Los datos obtenidos son usados para evaluar la radiación ambiental y la protección contra la radiación en futuras misiones lunares tripuladas.</li> </ul>	

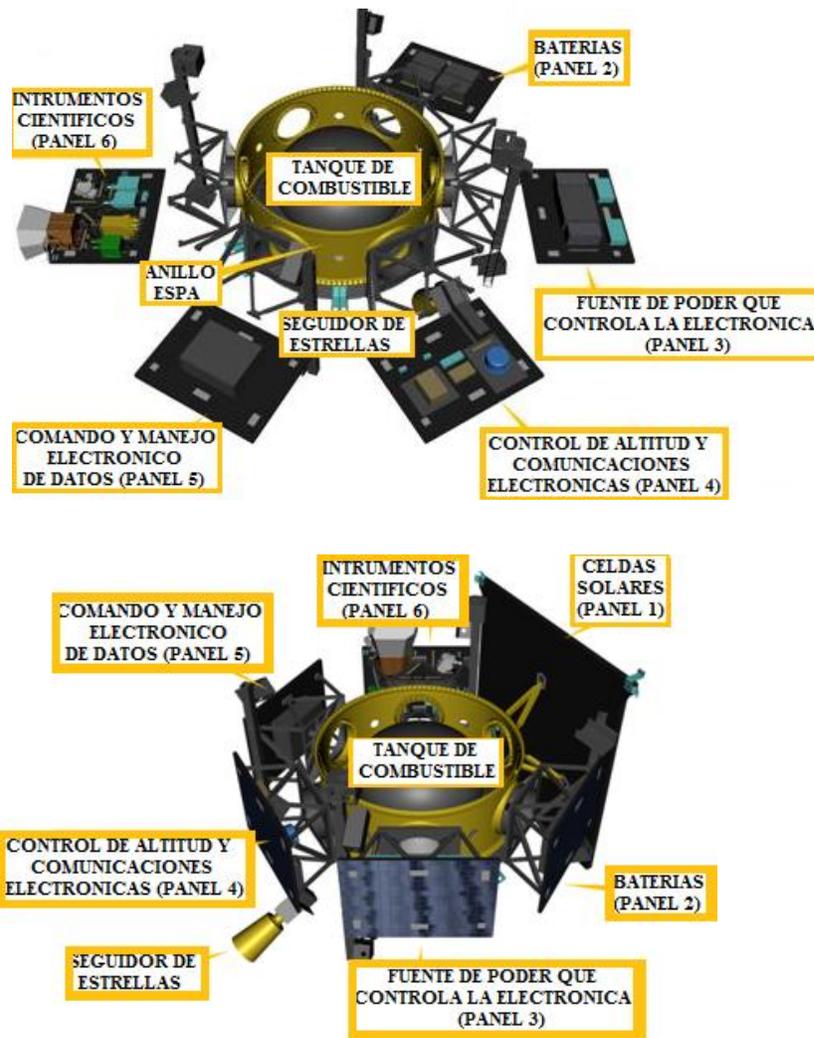
## 2.5 OBSERVACIÓN DE CRÁTERES LUNARES Y SATÉLITE DE DETECCIÓN (LCROSS)

La misión LCROSS fue diseñada para investigar la existencia de agua sobre la superficie lunar por medio del impacto de un cohete sobre el cráter Cabeus (fig. 2.6). Esto causó una gran explosión y creó un cráter que arrojó toneladas de escombros, agua congelada y vapor sobre la superficie lunar. Este impacto liberó materiales desde la superficie lunar que al ser analizados, proporcionaron información sobre la presencia de minerales hidratados sobre la zona impactada.



**Figura.2.6.-**Sitio del impacto (Cráter Cabeus).

La misión LCROSS estaba constituida por la Nave Pastora y el cohete Centauro (fig. 2.7). La Nave Pastora guiaba al cohete Centauro a un sitio sobre la superficie lunar que tenía una alta probabilidad de contener agua. Debido a que solo se tendría una oportunidad de impacto los investigadores fueron muy cautelosos en buscar el mejor sitio.

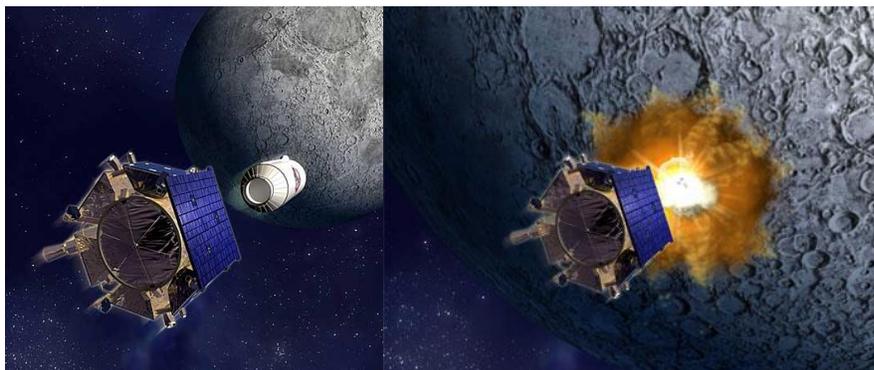


**Figura.2.7.-**La Nave Pastora LCROSS estaba constituida por 6 paneles y un anillo ESPA (Adaptador de Carga del Vehículo de Lanzamiento Secundario Expandible y Evolucionado (Evolved Expendable Launch Vehicle Secondary Payload Adapter)) (Fuente: [http://www.nasa.gov/mission\\_pages/LCROSS/spacecraft/Spacecraft1.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/LCROSS/spacecraft/Spacecraft1.html)).

La nave Pastora y el cohete Centauro fueron lanzados el 18 de Junio del 2009 junto con otra nave llamada el Orbitador de Reconocimiento Lunar (LRO) diseñada por la NASA. Las tres se mantuvieron conectadas durante el despegue, pero la nave LRO se separó cuatro horas después de éste.

Después de 38 días de vuelo se encontraban en la posición adecuada para lanzar el cohete, por lo que el cohete Centauro se separó de la nave Pastora impactando la superficie lunar a una velocidad dos veces mayor a la de una bala (4 veces la velocidad del sonido 343m/s) causando un impacto que dio como resultado una gran nube de eyecta de materiales lunares (fig. 2.8).

En cuanto eso sucedió, la nave Pastora, que tenía consigo instrumentos científicos abordo incluyendo cámaras, capturó imágenes del descenso del cohete y del impacto sobre la superficie lunar. Cuatro minutos después, la nave Pastora siguió casi el mismo camino del cohete Centauro, descendiendo sobre la nube de eyecta para analizarla. El análisis se enfocó en encontrar rastro de agua (hielo y vapor), hidrocarburos y materiales hidratados. Los análisis revelaron que la nube de eyecta contenía minerales hidratados que indicaban presencia de agua cerca de la superficie en el Polo Sur lunar. Con este descubrimiento LCROSS proporcionó información y tecnología que ayudarán a futuras misiones tripuladas a la Luna.



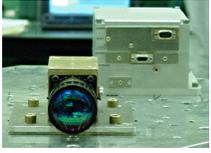
**Figura.2.8.**-La LCROSS y el Cohete Centauro durante el impacto.

### 2.5.1 Experimentos LCROSS

Los experimentos mostrados en la tabla 2.5 fueron utilizados para comprobar la existencia de agua por medio del impacto del cohete Centauro sobre el cráter Cabeus (en sobras permanentes) .Estos experimentos se encontraban colocados en el panel 6 de la nave Pastora.

**Tabla.2.5.**-Experimentos realizados en la misión LCROSS (Fuente: [http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/experimentSearch.do?spacecraft=Lunar%20Crater%20Observation%20and%20Sensing%20Satellite%20\(LCROSS\)](http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/experimentSearch.do?spacecraft=Lunar%20Crater%20Observation%20and%20Sensing%20Satellite%20(LCROSS))).

<b>EXPERIMENTO</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	
<p><b>Cámara en el visible</b></p> <p>Visible camera (VIS)</p>	<p>Es una cámara video con el objetivo científico de tomar imágenes en el visible, monitorear la morfología de la nube de eyecta y determinar las propiedades de los granos en el visible.</p>	
<p><b>Cámaras 1 y 2 en el Infrarrojo Cercano</b></p> <p>Near Infrared Cameras 1 and 2 (NIR1 and 2)</p>	<p>Estas dos cámaras en el infrarrojo cercano (0.9-1.7 <math>\mu\text{m}</math>) tenían como objetivo tomar imágenes del impacto del cohete Centauro. El estudio de las imágenes proporcionaría información sobre la composición isotópica de la eyecta. También se planeaba elaborar un mapa que indicara las concentraciones de agua.</p>	

<p><b>Cámaras 1 y 2 en el Infrarrojo Medio</b></p> <p>Mid-Infrared Cameras 1 and 2 (MIR1 and 2)</p>	<p>MIR es un microbolómetro de óxido de vanadio (Vox) diseñado para obtener imágenes térmicas MIR (6.0-13.5 <math>\mu\text{m}</math>) del impacto del Centauro y del eyecta, así como imágenes de los residuos del cráter.</p>	
<p><b>Fotómetro de luminiscencia Total</b></p> <p>Total Luminance Photometer (TLP)</p>	<p>Fue diseñado para medir la luminiscencia del resplandor ocasionado por el impacto, la magnitud y el decaimiento de la curva de luminiscencia en el visible (0.4 a 1.0 <math>\mu\text{m}</math>).</p>	
<p><b>Espectrómetro en el visible</b></p> <p>Visible Spectrometer (VSP)</p>	<p>Este fue diseñado para detectar rastros de vapor de agua en la eyecta ocasionada por el impacto del Centauro usando el espectro en el visible (263-650 nm) .También se midió la florescencia del OH- (308 nm) y del H<sub>2</sub>O.</p>	
<p><b>Espectrómetros en el Infrarrojo Cercano</b></p> <p>Near Infrared Spectrometers 1 and 2 (NSP1 and 2 )</p>	<p>Este experimento fue diseñado para tomar el espectro NIR de la emisión y reflectancia de la pluma de vapor y de la eyecta resultante del impacto del Centauro. También se analizaron las propiedades de los materiales que fueron excavados, entre ellos el agua.</p>	

## 2.6 LUNAR RECONNAISSANCE ORBITER (LRO)

El Orbitador de Reconocimiento Lunar (LRO) fue el primer programa robótico de exploración lunar de la NASA. Este fue diseñado para elaborar mapas con las características de la superficie lunar para futuros aterrizajes. Los mapas se realizaron en términos de la rugosidad del terreno, los recursos que podrían ser utilizables y el entorno de radiación. La realización de estos mapas facilitaría el futuro regreso de los hombres a la Luna y ayudaría a responder preguntas fundamentales sobre el sistema Tierra-Luna.

Para la elaboración de estos mapas se necesitó:

- Caracterizar la radiación espacial en la órbita lunar.
- Obtener la topografía geodésica global.
- Mapear hidrógeno.
- Mapear la temperatura en regiones polares que se encuentran en sombra permanente.
- Obtener imágenes de la superficie en regiones en sombra permanente.
- Identificar depósitos de agua congelada cerca de los polos lunares.
- Evaluar los sitios de aterrizaje donde se puedan utilizar recursos (in situ resource utilization ISRU)

- Caracterizar la iluminación en torno a las regiones polares.

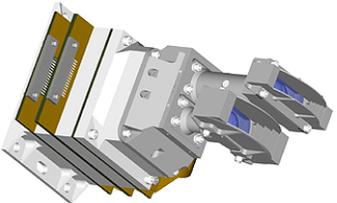
Si durante el análisis de los datos obtenidos se encontrara agua congelada se planea que en futuras misiones tripuladas ésta sea utilizada por los astronautas como combustible, aire y quizá para el crecimiento de plantas y como agua potable.

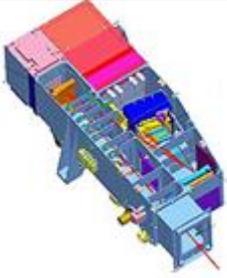
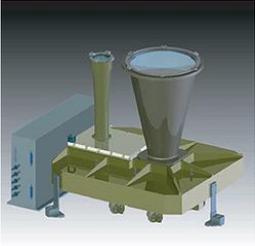
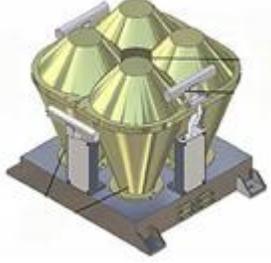
### 2.6.1 Experimentos LRO

La misión LRO llevaba consigo seis experimentos los cuales se describen en la tabla 2.6.

**Tabla.2.6.-**Experimentos realizados en la misión LRO

(Fuente:<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/experimentSearch.do?Spacecraft=Lunar%20Reconnaissance%20Orbiter%20>).

EXPERIMENTOS	DESCRIPCIÓN	
<p><b>Cámara del Orbitador de Reconocimiento Lunar</b></p> <p>The Lunar Reconnaissance Orbiter Camera (LROC)</p>	<p>Este fue el primer instrumento con el objetivo de identificar y certificar sitios de aterrizaje. Las tareas a realizar con este tipo de cámara fueron:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hacer mapas de las regiones que se encuentran en sombra permanente y de regiones iluminadas por el Sol</li> <li>• Hacer superposiciones de mapas Apollo-LCROSS para observar la topografía .</li> <li>• Elaborar mapas multiespectrales de minerales en siete longitudes de onda entre 300 y 680 nm.</li> </ul>	
<p><b>El Experimento de Radiometría Lunar</b></p> <p>The Diviner Lunar Radiometer Experiment</p>	<p>Este experimento es un radiómetro con multi-canales diseñado para tomar medidas de temperatura en la superficie lunar. Los objetivos a realizar con este instrumento fueron:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hacer un mapa global de la temperatura en la superficie durante el día y la noche, caracterizar el ambiente térmico para la habitabilidad.</li> <li>• Determinar la abundancia de agua en regiones de la</li> </ul>	

	<p>superficie lunar para futuros aterrizajes.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Identificar depósitos de agua congelada en los polos.</li> <li>• Investigar la existencia de agua congelada cerca de o expuesta en la superficie.</li> </ul>	
<p><b>El Mapeador en Alfa-Lyman</b></p> <p>The Lyman-Alpha Mapper (LAMP)</p>	<p>Es un espectrómetro en el ultravioleta diseñado para condiciones con poca luz. LAMP tomó imágenes en regiones de sombra permanente cerca de los polos lunares. Los objetivos de este experimento fueron:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Identificar y localizar depósitos de agua congelada y mapear los relieves en regiones que se encuentran en sombra permanente.</li> <li>• Analizar la atmósfera lunar y su posible variabilidad.</li> </ul>	
<p><b>El Altimetro Laser del Orbitador Lunar</b></p> <p>The Lunar Orbiter Laser Altimeter (LOLA)</p>	<p>LOLA fue utilizado para reproducir mapas topográficos y marcos geodésicos globales de alta resolución que permiten una orientación precisa para futuros aterrizajes y la movilidad para llevar a cabo actividades de exploración en la superficie. También se utilizó para detectar agua congelada en los cráteres en sombra permanente cerca de los polos lunares.</p>	
<p><b>El Detector de Neutrones durante la Exploración Lunar</b></p> <p>The Lunar Exploration Neutron Detector (LEND)</p>	<p>LEND fue diseñado para detectar el flujo de neutrones desde órbita. Estos datos serían usados para determinar la abundancia de hidrógeno en la superficie lunar. También se caracterizó la distribución y la densidad de columna de posibles depósitos de agua congelada cerca de la superficie.</p>	

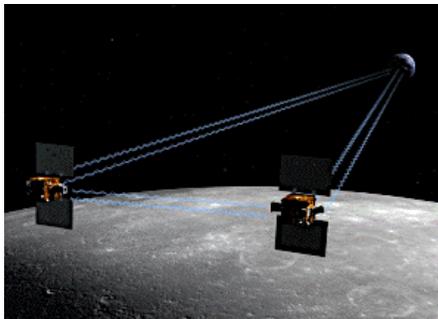
<p style="text-align: center;"><b>El Telescopio de Rayos C3smicos para los Efectos de Radiaci3n</b></p> <p style="text-align: center;">The Cosmic Ray Telescope for the Effects of Radiation (CRaTER)</p>	<p>CRaTER fue dise1ado para caracterizar el ambiente de radiaci3n y sus efectos biol3gicos. Los detectores determinaron los efectos de radiaci3n en los tejidos humanos por medio de tejidos pl1sticos con propiedades similares.</p> <p>Los principales objetivos a seguir durante la misi3n fueron medir el espectro de los rayos c3smicos solares y gal1cticos para realizar modelos y desarrollar tecnologa que permitan una estancia segura a comunidades humanas en el espacio.</p>	
---	---	---

## 2.7 MISIONES FUTURAS

Las misiones que ya est1n confirmadas para realizar investigaciones sobre la Luna son:

- **GRAIL** (Laboratorio del Interior y de Mediciones de Aceleraci3n Gravitacional Lunar [The Gravity Recovery And Interior Laboratory], (fig. 2.9)): Fue programada para el 9 de Octubre del 2011. Esta nave fue dise1ada para determinar la estructura interior de la Luna y entender la evoluci3n t3rmica de 3sta. Los principales objetivos a realizar durante la misi3n ser1n :

- Mapear la estructura de la corteza y la litosfera lunar.
- Entender la evoluci3n t3rmica asim3trica de la Luna.
- Determinar la estructura subterr1nea de las cuencas de impacto y el origen de mascones (concentraciones de masa en la corteza lunar).
- Determinar la evoluci3n temporal de la corteza mediante brechas y magma.



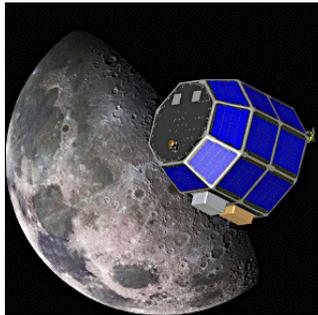
**Figura.2.9.-**Nave GRAIL.

- **LADEE** Explorador de Polvo en el ambiente y de la Atmosfera lunar [The Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer], (fig. 2.10): Contin1a bajo estudio para ser lanzada en el 2013. LADEE est1 dise1ada para caracterizar desde 3rbita la tenue atm3sfera y el polvo del medio ambiente lunares. Durante

la misión se utilizará un espectrómetro de masa cuadrupolar que detectará elementos desde los 50 Km de altitud, los elementos y compuestos a detectar son  $\text{CH}_4$ , S, O, Si, Kr, Xe, Fe, Al, Ti, Mg, OH, y  $\text{H}_2\text{O}$ . En el UV/Vis se detectará Al, Ca, Fe, K, Li, Na, Si, T, Ba, Mg,  $\text{H}_2\text{O}$  y O, también se va a monitorear la composición del polvo lunar.

Los objetivos científicos de la misión serán:

- Determinar la densidad global, composición y variabilidad temporal de la frágil exósfera lunar antes de que ésta sea perturbada por la actividad humana.
- Determinar el tamaño, carga y distribución espacial del transporte electrostático de granos de polvo y evaluar sus probables efectos sobre la exploración lunar y la astronomía con base en la Luna.



**Figura.2.10.**-Nave LADEE.

Estas misiones ayudarán a verificar los datos de las misiones anteriores y sobre todo a verificar la existencia de agua congelada sobre la superficie ya que se harán muchos estudios sobre la composición lunar.

# CAPÍTULO 3

## 3.1 APOLLO

### 3.1.1 Geología de Campo en la Luna

Durante la misión Apollo se realizaron distintos experimentos algunos enfocados en el estudio de la superficie lunar y en la búsqueda de agua. Uno de ellos fue el experimento llamado Geología de Campo Lunar (Lunar Field Geology) donde se analizaron las muestras lunares para encontrar rastros de la molécula de agua, deuterio D, Hidrógeno H y minerales hidratados como la apatita  $[\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})]$ . La identificación de estos elementos en las muestras lunares se realizó mediante diferentes métodos.

Algunos análisis realizados a las muestras lunares recolectadas por los Apollo 11, 12, 14, 15, 16 y 17 se hicieron con el propósito de determinar la abundancia de Hidrógeno y su procedencia, así como de encontrar rastros de la molécula de agua (Taylor y Epstein, 1973). El método utilizado para el análisis de las muestras fue el de pirólisis. Este consistía en calentar una muestra lunar hasta su evaporación y después se hacía reaccionar CO y el H<sub>2</sub> con CuO para recuperarlos como CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O. Posteriormente, el agua se pasaba a través de un tubo en U conteniendo Uranio caliente (700 °C) para recuperar el H<sub>2</sub>. Finalmente, los gases obtenidos se pasaron a un espectrómetro de masas para obtener los cocientes isotópicos.

Uno de los problemas experimentales en el análisis de muestras lunares es la contaminación por Hidrógeno y/o Deuterio contenidos en el agua terrestre (vapor de agua y agua sobre la superficie de los tubos de vidrio del arreglo experimental – ver siguiente párrafo). Por lo que es importante llevar a cabo un buen control experimental para evitar o disminuir dicha contaminación.

La extracción de gases de las muestras lunares fue mediante un proceso de cuatro etapas: la primera etapa consistía en calentar la muestra a 100-150°C, durante esta etapa no hubo una desgasificación apreciable de hecho esta es la temperatura a la que la superficie lunar está sometida durante el día. Durante la segunda etapa se calentó la muestra lunar lentamente de 150-500 °C, el gas obtenido se pasó a través de una trampa fría de Nitrógeno líquido mientras que el gas no condensable se envió a un contenedor para medir su volumen. Entre los gases condensables de interés estaba el agua y el bióxido de carbono, y entre los no condensables estaban el Hidrógeno, gases raros, CO y posiblemente N<sub>2</sub>. Los gases colectados en esta fase son la fracción A mostrada en la tabla 3.1, la cual consistió principalmente de agua y bióxido de carbono, los cuales fueron almacenados aparte. En la tercera etapa se calentó la muestra 500-550 °C, los gases extraídos son la fracción B de la tabla 3.1. Los gases condensables de la fracción B, también se guardaron aparte mientras que los no condensables se pasaron a través de CuO a 750 °C para convertirlos en CO y H<sub>2</sub>O, para posteriormente separarlos y convertir el H<sub>2</sub>O en H<sub>2</sub> para su análisis en el espectrómetro de masas. Se siguió elevando la temperatura de la muestra de 550-600 °C, obteniéndose una fracción C de gases cuya composición y tratamiento experimental fueron similares a los de la fracción B. Se obtuvo aun una fracción más de gas, fracción D, calentando la muestra de 600-1400 °C, en esta ocasión el gas resultante era casi totalmente monóxido de carbono y fue tratado como los gases de la fracción B. El CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O guardados a final de la primera etapa se hicieron pasar a través de CuO para convertir el agua en Hidrógeno y se determinó su concentración y sus cocientes isotópicos siempre que fue posible (Epstein y Taylor, 1973).

Al ser observados los datos obtenidos en la tabla 3.1 se notó que en la muestra (1), los resultados obtenidos para la fracción A dan un valor de  $\delta \text{D/H} = -150 \text{ ‰}$  que es muy parecido al valor obtenido para el vapor de agua en Houston o Pasadena (Tierra), por lo que se podría pensar que las muestras pudieron haberse

contaminado por los cohetes del modulo lunar o bien por el vapor de agua emitido por los astronautas mientras estaban en la Luna.  $\delta D = \{[(D/H)_{\text{Muestra}} / (D/H)_{\text{SMOW}}] - 1\} \times 1000$  (donde SMOW significa Standard Mean Ocean Water- en la cual se considera una concentración de Deuterio de 157 ppm) (Epstein y Taylor, 1973).

Los cocientes isotópicos de agua en la fracción B son menores que en la fracción A esto podría deberse a que el agua en B es de origen terrestre pero con una menor cantidad de Deuterio debido a la oxidación con FeO de las rocas lunares o con Hidrógeno lunar. El aumento del cociente isotópico mostrada por las fracciones C y D sugiere que durante el calentamiento isotópico hubo un intercambio entre el Hidrógeno del agua terrestre y el Hidrógeno lunar. Los resultados de la tabla 3.1 sugieren que el  $\delta D/H$  del hidrógeno del viento solar tiene un valor máximo de -888 ‰ (valor mínimo registrado) y que el agua obtenida de las muestras lunares es de origen terrestre (Epstein y Taylor, 1973). Se piensa que la contaminación terrestre puede ser controlada si se tomaran más precauciones cuando se colectan y manejan las muestras.

**Tabla 3.1.-**Concentraciones de Hidrógeno y agua obtenidas de la extracción de gases a diferentes temperaturas de las tres muestras lunares.

Temperatura de la muestra	GAS DE HIDRÓGENO		AGUA	
	Concentración de Deuterio		Concentración de Deuterio	
	$\delta D/H$	ppm	$\delta D/H$	ppm
1.- Muestra 10084-1				
A			-150	133
B	-888	18	-365	100
C	-856	23	-483	81
D	-615	60		
Total	-853	23	-261	116
2.- Muestra 10084-2				
A			-275	114
B	-849	24		
C	-828	27		
D	-609	61		
Total	-830	27	-275	114
3.- Muestra 10061 (brecha)				
A			-412	92
B	-882	18		
C	-868	21		
D				
Total	-873	20	-412	92

Epstein y Taylor estimaron el cociente  $\delta D/H$  del Hidrógeno lunar utilizando las cantidades relativas totales del  $H_2O$  y del  $H_2$  de la tabla 3.1. Para esto hicieron tres cálculos de balance de masa haciendo dos consideraciones: en la primera supusieron una composición isotópica para el Hidrogeno lunar y calcularon el contaminante por Hidrógeno terrestre (columna dos de la tabla 3.2); en la segunda supusieron un valor para el contaminante para el Hidrógeno o el agua terrestre y estimaron el cociente isotópico que debería tener el Hidrógeno lunar. Para este último usaron dos valores para el contaminante (-150 ‰ y -75 ‰, este último valor correspondiente al vapor de agua en Houston). La segunda columna de la tabla 3.2 representa el contaminante terrestre de las muestras lunares suponiendo que no hay Deuterio en el Hidrógeno lunar, estos valores son altos, sobre todo el tercero, implican un alta concentración de Deuterio incluso para el agua terrestre por lo que la contaminación debió haber sido por el agua del sistema de enfriamiento de los trajes de

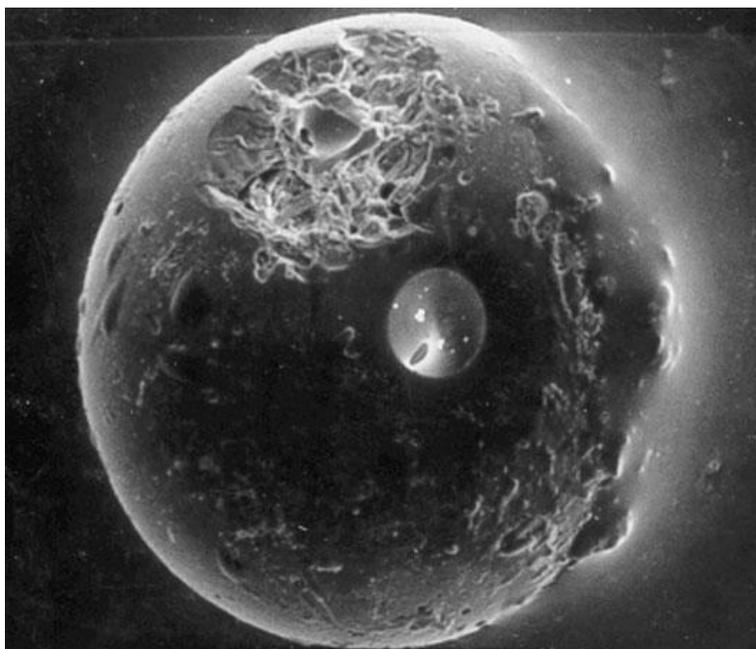
los astronautas o bien por el combustible del módulo lunar. Por otro lado, si el  $\delta$  D/H proveniente de la contaminación por agua tiene un valor de  $-75\%$  entonces el cociente isotópico para el Hidrógeno es de  $-935 \pm 5$  para todas las muestras lo que sugiere que el Hidrógeno lunar puede tener alrededor de 10 ppm de Deuterio. La conclusión de Epstein y Taylor es que aunque sus experimentos no pueden eliminar que exista algo de agua en las rocas lunares, no dudan que la fracción más grande de Hidrógeno proviene del viento solar.

**Tabla 3.2.-**Cálculo de balance de masa. Partición de los cociente  $\delta$  D/H entre el gas de hidrógeno y el agua extraídos de las muestras.

Muestra	Valores de $\delta$ D/H del agua que debió haber absorbido la muestra para que el $\delta$ D/H del Hidrógeno lunar este libre de Deuterio	Calculo de $\delta$ D/H de Hidrógeno lunar, suponiendo dos valores distintos de $\delta$ D/H provenientes de contaminantes por el agua terrestre:	
		-150 ‰	-75‰
(1)	+ 45	-904 (15 ppm)	-943 (9 ppm)
(2)	+57	-891 (17 ppm)	-930 (11 ppm)
(3)	+300	-917 (13 ppm)	-936 (10 ppm)

Posteriores análisis realizados a las rocas lunares fueron a una muestra del Apollo 15, la 15427-41 que es un basalto de picrita (vidrio volcánico rico en olivino), del cual se extrajeron cuatro distintos tipos de vidrios con muy bajo contenido de Ti. Las esférulas de vidrio de la muestra tenían tamaños entre 200-400 $\mu$ m (fig.3.1). Esta muestra fue estudiada con el propósito de encontrar evidencias de volátiles, especialmente H<sub>2</sub>O, y evaluar si procesos de desgasificación en la Luna los originaron. Este análisis se realizó en dos ocasiones, con un año de diferencia, y variando algunos aspectos (Saal et al., 2008 y 2009).

Por medio del SIMS (espectrómetro de masas de iones secundarios –Secondary-Ion Mass Spectrometry) pudieron estudiar la abundancia de volátiles (H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, F, S y Cl), en los vidrios volcánicos y en minerales anhídridos de las muestras lunares. Las medidas hechas por el SIMS se realizaron sobre una muestra pulida que fue golpeada por un haz de Cs<sup>+</sup> cuyo diámetro era de 10  $\mu$ m (fig.3.1). Dentro de este haz se generó otro con iones secundarios. El haz de Cs<sup>+</sup> creó un cráter de 35  $\mu$ m sobre la muestra. Después fueron estudiadas las grietas y los cristales dendríticos. Se insertó una apertura de campo para permitir la transmisión de iones solamente dentro de un área de 10  $\mu$ m de diámetro con centro en el centro del cráter (Saal et al., 2008).



**Figura.3.1.-** Esférula de vidrio de la muestra lunar donde se muestra el micro-cráter hecho por el haz de Cs+.

Las muestras fueron colocadas en la cámara de muestra de la prueba iónica 12 horas antes de su análisis para mejorar los límites de detección del agua. Los límites de detección de H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, F, S y Cl fueron determinados utilizando un análisis repetido de forsterita sintética (Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>). Para calibrar los resultados se graficaron las concentraciones de volátiles estándar contra los cocientes medidos de volátil/ Si. Las calibraciones para el agua fueron verificadas utilizando vidrios y minerales anhídridos estándar antes de cada sesión analítica; las abundancias para otros elementos se realizaron a partir de calibraciones de vidrios estándar (Saal et al., 2008).

Los resultados obtenidos del análisis de los vidrios volcánicos y los minerales anhídridos mostraron que las concentraciones de CO<sub>2</sub> estuvieron por debajo del límite de detección (< 6 ppm) por lo que se descartó para análisis posteriores. Las abundancias encontradas dentro del cráter a partir de su centro hasta una distancia de 5 μm fueron las siguientes:

**Tabla.3.3.-** Abundancia de volátiles dentro de un área de 10 μm de diámetro.

Elemento	Concentraciones (ppm)
H <sub>2</sub> O	30 - 0
F	10 - 2
S	270 - 114
Cl	0.5 - 0.03

Saal y colaboradores encuentran en sus mediciones dos cosas importantes: la primera es la correlación significativa entre los contenidos de volátiles, mientras que en la segunda es una clara relación entre los contenidos de volátiles y los elementos mayores en los vidrios lunares con muy bajo contenido en Ti. Esto último apoya la hipótesis de que hubo diferencias significativas en el contenido inicial de volátiles y/o que el mecanismo de desgasificación y erupción de los vidrios fue distinto. Mas importante aun es el hecho que la correlación entre los volátiles sugiere que el contenido de agua medido en los vidrios volcánicos es original es decir que el agua no fue producida por la implantación de H por el viento solar. Lo anterior a su vez sugiere que no en toda la Luna hubo agotamiento de volátiles y que la presencia de agua debe incluirse en los modelos térmicos y químicos de la evolución del interior lunar (Saal et al., 2008).

Para confirmar su hipótesis determinaron las concentraciones de volátiles dentro de una sola cuenta de vidrio volcánico. Donde se obtuvo que para el H<sub>2</sub>O, la abundancia en el centro de la cuenta fue de 30 ppm y en el borde fue de 14 ppm. Lo que verifica la hipótesis respecto a que el agua encontrada en los vidrios volcánicos es de origen lunar que fue perdiéndose debido a procesos de desgasificación o actividad volcánica (Saal et al., 2008).

En un segundo análisis tuvieron más cuidado en la selección de los vidrios volcánicos que serían analizados, en esta ocasión, se tomaron cuentas de vidrio donde éstas tendrían un diámetro similar, y se cuidó que tuvieran una superficie pulida, así como el número de cuentas utilizadas en el análisis. Esto les permitiría tener una mayor precisión geométrica en muchas de las cuentas y también en las concentraciones de volátiles. La concentración máxima de H<sub>2</sub>O que se encontró en las cuentas de vidrio fue de 70 ppm, superior a la encontrada en los primeros análisis, tal vez debida al cuidado en la selección de las cuentas de vidrio analizadas. Esta abundancia de agua indicaría que la Luna primitiva tuvo grandes concentraciones de agua, las cuales se fueron perdiendo debido a los procesos de desgasificación o actividad volcánica (Saal et al., 2009).

Por último evaluaron la pérdida de volátiles por difusión de vidrios volcánicos lunares durante una erupción. Para esto utilizaron un modelo difusivo sobre una esfera cuya superficie sufría una evaporación al mismo tiempo ocurría la difusión. Los parámetros importantes de su modelo fueron: (a) Radio de la esfera, (b) Temperatura de fusión durante la erupción, (c) Intervalo de enfriamiento, (d) Concentración inicial de volátiles en las cuentas de vidrio, (e) Coeficientes de difusión de los volátiles dentro de la cuenta, (f) Tiempo permitido para la difusión y (g) Intervalos de evaporación de la superficie de la cuenta.

Con la idea de que sus resultados tuvieran un 95% de confianza encontraron que el mejor ajuste a los perfiles de concentración de volátiles ocurrían al considerar tasas de enfriamiento de 3°C/seg y un tiempo de enfriamiento de 120 s lo que sugería una concentración inicial de agua de ~750 ppm como máximo y un mínimo de 260 ppm (Saal et al., 2008).

Un año después, un grupo de investigadores se dio a la tarea de hacer más estudios sobre las muestras lunares traídas a la Tierra por la misión Apollo para encontrar rastros de agua y plantear una posible explicación sobre su origen (Greenwood et al., 2011). Se reportaron mediciones de concentraciones de agua e isótopos de hidrógeno en minerales hidratados como la apatita (Ca<sub>5</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>(F, Cl, OH)), derivados de la cristalización de los basaltos lunares. Se analizaron secciones delgadas de las muestras por medio del SIMS para medir concentraciones de agua y deuterio en los granos apatita. La nueva técnica utilizada en el SIMS consistió primero en montar secciones delgadas de las muestras sobre cubre objetos, éstas fueron cubiertas por carbono para permitir el análisis del micro haz de iones y electrones sobre los granos apatita. El análisis por haz de electrones les permitió obtener una imagen de los granos apatita y de otros minerales. Utilizando el SIMS y el SCAPS juntos se puede obtener una micro-distribución bidimensional de los cocientes isotópicos que están sobre una superficie sólida, a esta distribución se le conoce como isotopográfica. Por medio de imágenes isotopográficas se puede determinar semi-cuantitativamente las concentraciones de Hidrógeno y cuantitativamente las concentraciones de H<sub>2</sub>O y δ D en los granos apatita de las muestras lunares. Para esto se definió el  $\delta D = \{[(D/H)_{\text{Muestra}} / (D/H)_{\text{VSMOW}}] - 1\} \times 1000$  (donde VSMOW se refiere a Vienna Standard Mean Ocean Water, considerando que este patrón tiene valores entre ~ -500‰ y +100‰, siendo los más comunes entre -200‰ y +50‰) (Greenwood et al., 2010).

Las muestras fueron bombardeadas con un haz de Cs<sup>+</sup> de 10 μm de diámetro a partir del cual se generaron iones secundarios desde el centro del haz. Con este haz se creó un cráter de 35 μm donde se estudiaron las grietas, micro-grietas y los alrededores de los granos de apatita en las imágenes isotopográficas. Para eliminar un poco la contaminación por agua terrestre, las muestras fueron colocadas en un sistema donde se hizo un vacío de 3 x 10<sup>-8</sup> torr por más de tres días antes del análisis.

Las muestras analizadas de las misiones Apollo fueron seleccionadas de diferentes sitios de aterrizaje con el propósito de considerar distintas composiciones isotópicas del suelo lunar. Estas muestras eran de basaltos de los mares (Apollo 11:10044; Apollo 12: 12039 y 12040; Apollo 14: 14053; Apollo 17: 75055), de brechas (Apollo 12: 12013 y Apollo 14:14305-94) y un clasto de anortosita alcalina de las tierras altas (Apollo 14: 14305). Los basaltos de los mares fueron asociados a los estados tardíos de cristalización de la apatita (vidrios rico en K-Si, pyroxferroita, fayalita, silicio, feldespato rico en K-Ba y mesostasis-material poroso producido por la cristalización del material atrapado-). En las brechas se estudiaron los fragmentos de granos apatita. Por último se estudio un grano de apatita de un clasto intrusivo de anortosita alcalina de las tierras altas. Los resultados obtenidos se muestran en la (tabla 3.4) (Greenwood et al., 2010).

Para los basaltos de los mares con bajo contenido de Ti, como en la muestra 12039, las concentraciones de agua encontradas (tabla 3.4) muestran una variación que podría indicar que los granos de apatita tuvieron diferentes estados de cristalización. Como el agua es incompatible con los magmas basálticos, se piensa que la presencia de agua en la apatita indica una cristalización tardía. A pesar de que hay una presencia significativa de agua, las concentraciones de  $\delta D$  son muy variadas, de 472 a 1010 ‰, superiores a las del agua terrestre, lo que podría indicar que el agua encontrada es de origen lunar debido a procesos de desgasificación y actividad volcánica. Sin embargo, podemos notar (fig. 3.2) que la componente  $\delta D$  muestra valores bajos y altos lo cual sugiere la existencia de otras fuentes que hicieron que las concentraciones de Deuterio variaran.

Para los basaltos de los mares: 10044 y 75055 (alto en Ti) y 14053 (bajo en Ti) se encontraron que las concentraciones de agua eran muy similares a pesar de ser de diferentes regiones lunares. Podemos observar (fig. 3.2) que solo un grano de apatita de la muestra 12039 tiene concentraciones de agua muy similares a las muestras anteriores. Los valores de  $\delta D$  de las primeras tres muestras mencionadas están entre -215 y 636 ‰, esta variación, como se vio en el párrafo anterior, puede deberse a diferentes fuentes de Deuterio y/o a mecanismos de pérdida de él. Por otro lado, la muestra 14053 tiene valores muy bajos de  $\delta D$  que podrían indicar que hubo una implantación importante del viento solar en la superficie lunar y un tiempo posterior un metamorfismo en el material impactado. Esto significa que el cociente D/H actual es menor que el cociente que había antes de la formación de los basaltos debido a esta contaminación por el viento solar.

Para el basalto 12040 (bajo en Ti) notaron que las concentraciones de agua son muy bajas. Esto, junto con el hecho de que esta muestra parece haberse formado a una tasa de enfriamiento muy baja, sugiere que el magma de donde proviene la 12040 pudo haber sufrido una severa desgasificación de agua.

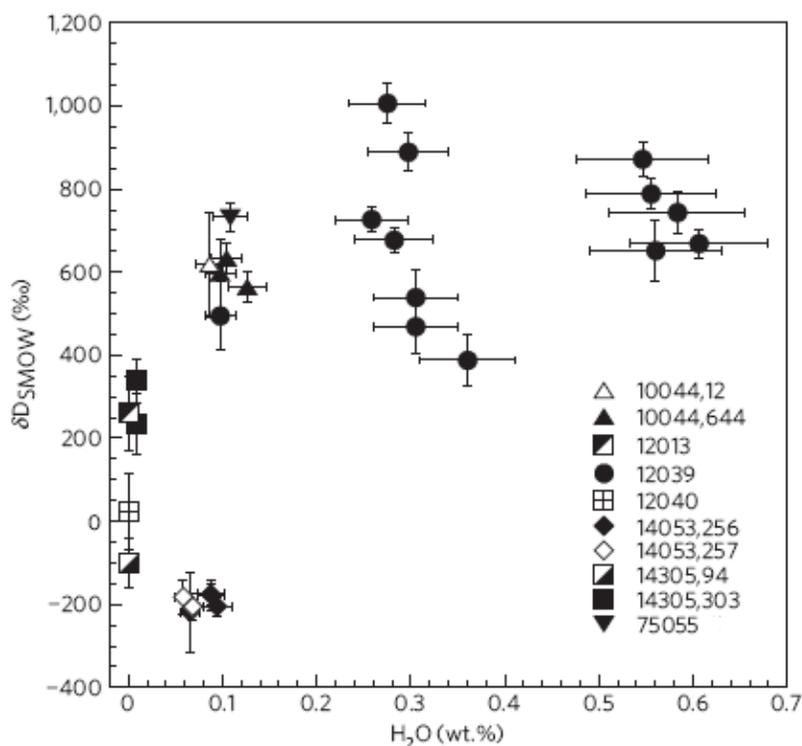
Las concentraciones de agua encontradas en los granos de apatita de los basaltos de los mares estuvieron dentro de un intervalo de 0 a 6,050 ppm, lo que indica que algunos de estos basaltos tienen concentraciones significativas de agua. Por lo que el manto lunar podría albergar grandes depósitos de agua.

Para las brechas 12013 y 14305,94 se encontraron muy bajas concentraciones de agua en los fragmentos de granos de apatita, lo que sugiere que la fragmentación y trituración sufrida por el material de la superficie lunar durante impactos provocaron una deshidratación en los granos de apatita que originalmente estaban hidratados.

**Tabla.3.4.-** Concentraciones de  $\delta D$  y  $H_2O$  en las muestras lunares obtenidas mediante el análisis conjunto de SIMS y SCAPS.

<b>BASALTO MARE</b>	Concentraciones de $\delta D$ (‰) en los granos apatita (mediciones obtenidas en los diferentes cráteres hechos por el haz de Cs+).	Concentraciones de $H_2O$ (% en peso) en los granos apatita.
<b>12039-42</b>	680	0.28
	730	0.25
	672	0.60
	792	0.55
	472	0.30
	542	0.30
	391	0.35
	655	0.55
	498	0.09
	875	0.54
	747	0.58
	1010	0.27
892	0.29	
<b>Promedio del análisis de punto:</b>	<b>689</b>	<b>0.25</b>
<b>10044-12</b>	<b>622</b>	<b>0.08</b>
<b>10044-644</b>	636	0.10
	567	0.12
	600	0.09
<b>Promedio del análisis de punto:</b>	<b>601</b>	<b>0.10</b>
<b>75055-55</b>	<b>735</b>	<b>0.10</b>
<b>14053-256</b>	-172	0.08
	-215	0.06
	-175	0.08
	-202	0.09
<b>Promedio del análisis de punto:</b>	<b>-191</b>	<b>0.08</b>
14053-257	-202	0.06
	-179	0.05
<b>Promedio del análisis de punto:</b>	<b>-190</b>	<b>0.05</b>
12040-211	27	-0.01
<b>TIERRAS ALTAS</b>		
14305-303	238	0.01
	341	0.01
<b>Promedio del análisis de punto:</b>	<b>290</b>	<b>0.01</b>
14305-94	-96	-0.01
12013-148	264	-0.02

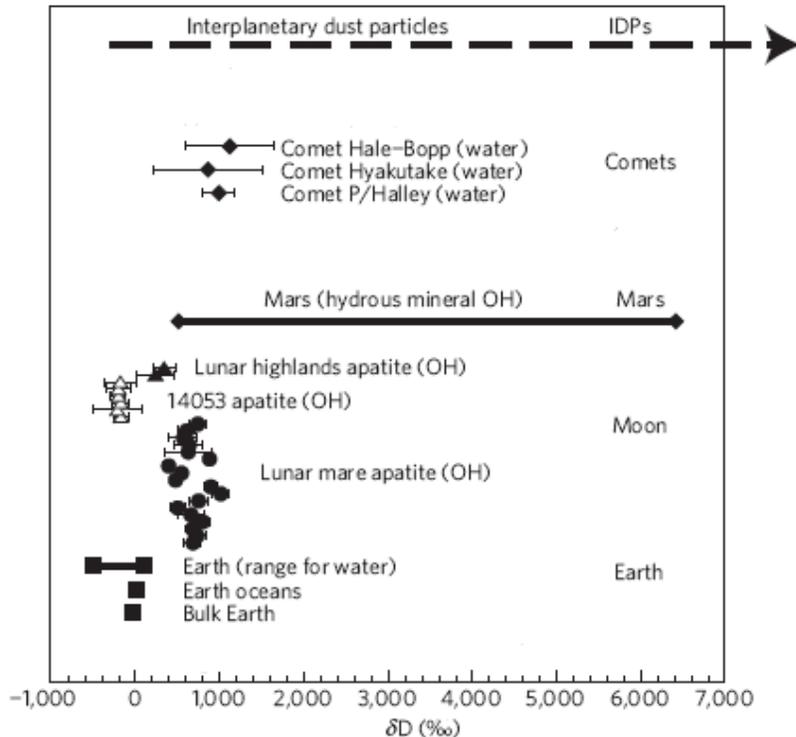
Por último para el clasto de anortosita alcalina de las tierras altas 14305,303 se encontraron valores  $\delta D$  altos. Estas rocas alcalinas se formaron en presencia de agua, la cual pudo provenir de materiales ricos en volátiles y materiales ricos en elementos incompatibles (elementos químicos que debido a su tamaño, carga o valencia son difíciles de ser parte de estructuras cristalinas por lo que se encuentran preferentemente en magmas- por ejemplo Li, Rb, Sr y los elementos de Tierras raras) resultado de la cristalización de los océanos de magma. Estos materiales pudieron ser asimilados o pudieron estar involucrados en la generación de magmas alcalinos. Como se puede observar en la figura 3.2, los valores de  $\delta D$  de la apatita de las tierras altas están entre 240‰ y 340 ‰, los cuales son los valores más bajos de los valores positivos. Por tanto la apatita de las tierras altas podría representar un reservorio de agua con bajo  $\delta D$  en el interior lunar. Los valores elevados de  $\delta D$  pueden deberse o bien a un escape de Hidrógeno durante la formación de la Luna o bien a un enriquecimiento de Deuterio debido al agua proveniente de cometas.



**Figura 3.2.**- $\delta D$  vs  $H_2O$  de los análisis de los granos apatita en las muestras lunares.

Para investigar el origen de los valores altos de  $\delta D$  se compararon los cocientes isotópicos de los granos de apatita con los de los cometas Hale-Boop, Hyakutake y Halley (fig.3.2), dando como resultado que las concentraciones de deuterio eran muy parecidas entre sí. También se compararon los valores de  $\delta D$  con los de algunos meteoroides, en este caso los resultados fueron diferentes; por lo que la fuente más probable de agua con alto contenido de deuterio en la Luna son los cometas (Greenwood et al., 2011).

Entonces las posibles fuentes de agua en la Luna son la desgasificación por actividad volcánica lunar y la contribución por impactos cometarios.



**Figura.3.3.-**Concentraciones de  $\delta D$  en el Sistema Solar.

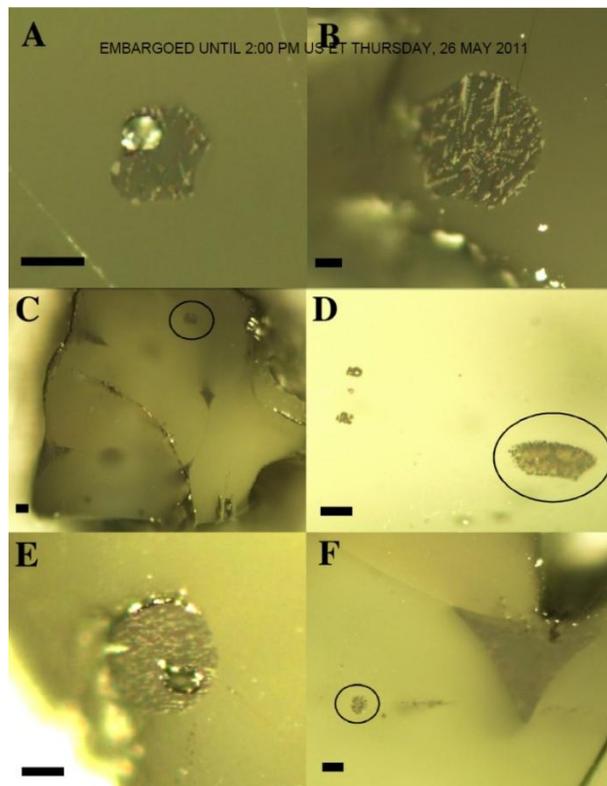
En un estudio reciente se realizó una serie de análisis con el SIMS con el objeto de medir el contenido de agua en inclusiones fluidas. Las inclusiones fluidas son pequeñas muestras de magma atrapadas dentro de cristales que crecieron en el magma antes de la erupción, por haber permanecido dentro de los cristales, estas inclusiones fluidas conservaron sus volátiles mientras que el resto del magma sufrió desgasificación durante erupciones volcánicas ocurridas aproximadamente hace 3,700 millones de años (Hauri et al., 2011).

Para realizar este estudio se utilizó la muestra 74220 traída por el Apollo 17. Esta muestra de suelo lunar contiene ~ 99% de cuentas de vidrio volcánico con alto contenido de  $TiO_2$  (9-12 % en peso). Dentro de este material se identificaron 9 cristales de olivino conteniendo inclusiones fluidas (fig.3.4). El contenido de agua medido en estas inclusiones fluidas fue de 615 ppm a 1410 ppm (fig.3.5) el cual es 100 veces mayor que el contenido de agua encontrado en la matriz de vidrio alrededor de los cristales de olivino (6 a 30 ppm de  $H_2O$ ) y de los centros de las cuentas de vidrio individuales. Estos valores son superiores a los encontrados en otros trabajos (Saal et al. 2008 y 2009; McCubbin et al., 2010). En particular las concentraciones de agua medidas fueron de 20 a 100 veces mayores que las mediciones realizadas en trabajos previos en cuentas de vidrio lunar para esta misma muestra a la cual se le estimo una pérdida de  $H_2O$  por desgasificación de 95 a 98 %, y son más altas que las estimaciones derivadas de mediciones de la apatita lunar, las cuales necesitaron correcciones de 95-99% para estimar el contenido de volátiles del magma primario. Entonces la importancia de este estudio radica en que se hicieran mediciones directas de la composición del magma lunar primario por lo que no tienen los problemas de desgasificación ni corrección por extrapolación (Hauri et al., 2011).

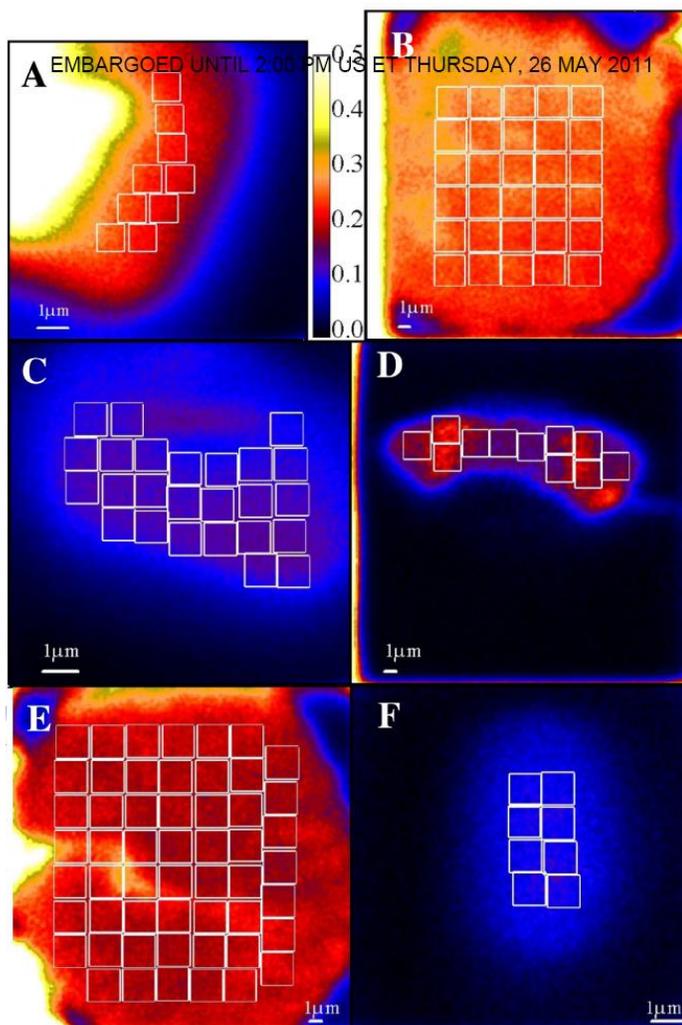
Después de obtener los resultados anteriores decidieron poner algunas limitantes a los datos: sólo seleccionaron inclusiones fluidas muy ricas en agua (después de haber sido atrapadas por cristalización) y magmas con alto contenido de Ti con fusiones parciales del 5-30% .Con lo anterior se midieron concentraciones de 79 a 409 ppm de  $H_2O$ , 7 a 26 ppm de F, 193 a 352 ppm de S y 0.14 a 0.83ppm de Cl. También utilizaron inclusiones fluidas en MORB (basaltos primitivos del océano terrestre) a las que

impusieron las mismas limitantes y realizaron los mismos análisis. Al comparar los resultados obtenidos de ambos tipos de muestras se observaron concentraciones similares. Esto podría indicar que la Luna primitiva tenía concentraciones de volátiles similares a los del manto terrestre.

Durante aproximadamente los primeros 2000 millones de años de historia lunar, nuestro satélite ha liberado una gran variedad de magmas, pero no se sabe si hay otras fuentes en el manto lunar que sean tan ricas en volátiles como los magmas con alto contenido en Ti de la muestra del Apollo 17. Esto nos dice que al menos en una parte de la Luna ésta no totalmente deshidratada como se pensaba. Esto es inconsistente con la hipótesis del gran impacto pues ésta nos dice que, debido a la gran liberación de energía producto del impacto, se produjo una pérdida total de volátiles en el interior lunar por procesos de desgasificación, dejando a la Luna completamente seca en su interior. Sin embargo, la igualdad entre volátiles de MORB y los basaltos lunares indica que durante el proceso de formación de la Luna pudo haber habido un intercambio de volátiles entre Tierra fundida y el disco proto-lunar ayudado probablemente la presencia de una atmósfera terrestre convectiva y a alta temperatura. También se maneja la hipótesis alternativa de que una parte del interior lunar escapara a la fusión producida por el gran impacto y simplemente heredaría el inventario de agua y de otros volátiles que caracterizan el manto superior terrestre. Estos estudios revelan también otra posible fuente del hielo de agua en los cráteres en sombra permanente: desgasificación magmática durante el emplazamiento y erupción de los magmas lunares (Hauri et al., 2011).



**Figura.3.4.-** Imágenes de los granos de olivino encontrados en la muestra 74220 del Apollo 17, las inclusiones fluidas están dentro de ellos. La escala de las barras es de 10  $\mu\text{m}$ .



**Figura. 3.5.-**Distribución de los cocientes isotópicos  $^{16}\text{OH}/^{30}\text{Si}$  mostrando la distribución de agua dentro de las inclusiones fluidas en los granos de olivino mostrados en la figura 3.4. En el inciso a esta la escala de colores: las regiones oscuras corresponde a cocientes con valores bajos (olivino alrededor de las inclusiones) mientras que las regiones rojas corresponde a valores altos del cociente isotópico localizadas dentro de las inclusiones fluidas ( $^{16}\text{OH}/^{30}\text{Si} \approx 0.25$  que corresponde  $\sim 1400$  ppm de  $\text{H}_2\text{O}$ ).

### 3.1.2 Sismicidad

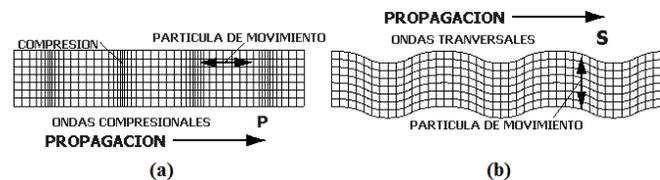
Durante la misión APOLLO se obtuvieron datos de la sismicidad lunar. La actividad sísmica identificada en la Luna tuvo cuatro fuentes: impactos artificiales, impactos de meteoroides, sismos con foco profundo (producidos probablemente por fuerzas de marea con la Tierra) y telesismos de alta frecuencia con foco superficial (producidos probablemente por procesos tectónicos o impactos de meteoroides). Se detectaron también señales sísmicas que no pudieron ser clasificadas. La actividad sísmica ayudo obtener información sobre la corteza, la estructura interna, las propiedades mecánicas y el estado térmico de la Luna (Heiken et al., 1991).

La misión Apollo llevo a cabo dos tipos de experimentos sísmicos, los pasivos y los activos. Los Apollo 11, 12, 14, 15 y 16 colocaron sismómetros en los sitios de aterrizaje, con estos aparatos se estudió durante 8 años la sismología lunar. Los experimentos de sismicidad pasiva consistieron simplemente en registrar cualquier actividad sísmica en la Luna, mientras que en los de sismicidad activa se produjeron sismos mediante cargas explosivas o golpes de “thumpers”.

El objetivo de los experimentos de sismicidad activa fue generar y monitorear ondas sísmicas sobre de la superficie lunar para estudiar su estructura interna, propiedades físicas y los materiales subterráneos (máximo 900 m de profundidad). Estos experimentos se realizaron durante los Apollo 14 y 16. En el Apollo 14 la fuente de energía sísmica fue un dispositivo llamado “thumper” que contenía 21 cargas de pequeños explosivos. El aparato thumper registró dos ondas-P con distintas velocidades en el cráter Fra Mauro. En el Apollo 16 se monitorearon sismos producidos de forma artificial y natural. Las ondas artificiales fueron producidas por cargas explosivas .Se registraron ondas-P con una velocidad 114 m/s.

El propósito del experimento de sismicidad pasiva fue monitorear la actividad sísmica de la Luna debido a oscilaciones lunares intrínsecas y a impactos de meteoroides. Los datos ayudaron a conocer la estructura interna de la Luna hasta unos 100 Km de profundidad. Para los sismos de foco profundo se registraron energías menores a  $10^{-2}$  J/año. Esta energía es extremadamente baja en comparación con la actividad sísmica interna de la Tierra ( $10^{17}$  a  $10^{18}$  J/año) (fig.3.7), por lo que la Luna parece ser rígida, inmóvil y fría en su interior en comparación con la Tierra. Estos sismos son producto de las fuerzas de marea Tierra-Luna generadas por el campo gravitacional de la Tierra en combinación con la rotación sincronizada de la Luna, esto ocurre mensualmente. También se distinguieron algunos sismos térmicos, éstos se deben a agrietamiento de rocas frescas alrededor de cráteres jóvenes. Sin embargo, estos eventos fueron muy pocos y con poca energía durante los registros. Los sismos con un foco superficial se deben a procesos tectónicos y a impactos de meteoroides. Los sismos debidos a impactos de meteoroides varían en energía dependiendo de la velocidad y tamaño del meteoroides (Vaniman et al., 1993).

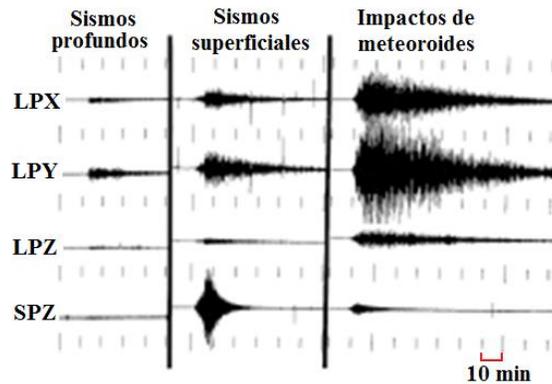
Los criterios importantes de evaluación en las ondas sísmicas fueron las velocidades de propagación de las ondas P y S sobre la superficie lunar (fig.3.6). Las onda P viajan a través de medios sólidos y líquidos, con velocidades típicas de ~1450 m/s en el agua y ~5000 m/s en el granito. Las ondas S viajan solo a través de medios sólidos. Las ondas P suelen tener una velocidad sísmica mayor que las ondas S (mayor a 1.73 veces). La velocidad de propagación de las ondas sísmicas presenta características de atenuación y difusión (Q) dependiendo del medio de propagación. Una baja atenuación en la velocidad sísmica indica una alta difusión (Q) y viceversa.



**Figura.-3.6.-** (a) Las ondas P (ondas longitudinales): el suelo es alternadamente comprimido y dilatado en dirección de la propagación; (b) Las ondas S (ondas transversales o de corte): el suelo es desplazado perpendicularmente a la dirección de propagación.

Las ondas sísmicas en la Luna se caracterizan por una baja atenuación y una alta difusión. La atenuación de las ondas sísmicas aumenta a temperaturas altas y en presencia de agua, por lo que la atenuación de este tipo de ondas en la Luna indica que su interior es frío y seco. Por debajo de los 1000 km de profundidad, la atenuación de las ondas sísmicas aumenta lo que podría indicar la presencia de una pequeña cantidad de roca fundida (LPI, 2011).

La velocidad de las ondas P son bajas en la regolita, del 92 a 114 m/s, con una velocidad promedio de 105 m/s. Estas bajas velocidades se relacionan con la brechiación y la alta porosidad del medio, por comparación, la velocidad de la onda P en la ceniza volcánica no consolidada en la Tierra, es de 400 m/s (Vaniman et al., 1993).



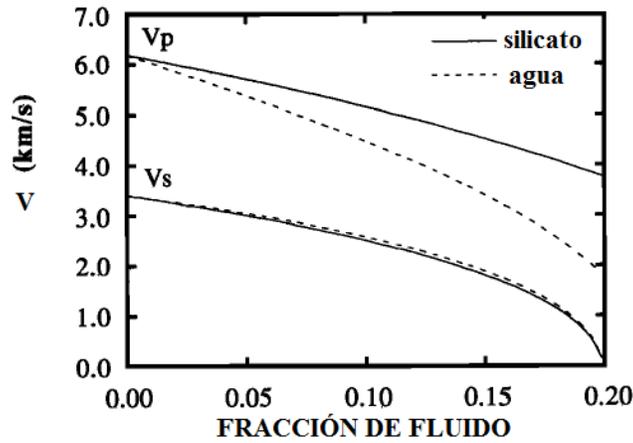
**Fig.-3.7.-**Datos sísmicos de los experimentos de sismicidad pasiva. Los registros muestran sismos con foco a diferentes profundidades. LPX, LPY y LPZ son las componentes para periodos largos y SPZ es la componente de periodo corto.

Al asociar las velocidades sísmicas de las ondas P y S con modelos geoquímicos, geofísicos, petrológicos y térmicos se estimó la composición del manto lunar a distintas profundidades. De 0-300 km (manto superior) se encontró ortopiroxeno con muy pequeñas cantidades de olivino, clinopiroxeno, plagioclasas y granito, de 700-1200 km (manto inferior) domina el olivino con muy pequeñas cantidades de granito y clinopiroxeno. También hay un incremento en la cantidad de magnesio con la profundidad. La velocidad que se registró en las ondas P y S en el manto inferior fue de  $8.0 \leq V_p \leq 8.2$  km/s y de  $4.4 \leq V_s \leq 4.55$  km/s (Kuskov y Kronrod, 2009).

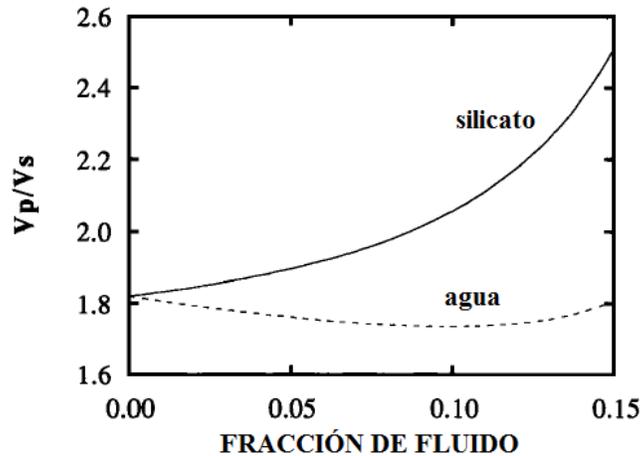
Watanabe (1993) realizó estudios sobre el comportamiento de las velocidades de las ondas P y S en rocas graníticas terrestres que contenían fundido de riolita o agua. El objetivo de sus estudios fue identificar claramente cuál era el comportamiento de las velocidades sísmicas en presencia de agua, esto nos ayudó al análisis de los datos sísmicos lunares.

En las ondas P se observó que su velocidad de propagación es menor en rocas graníticas con cierta fracción de agua que en rocas graníticas con la misma fracción de fundido de riolita. Esto se debe a que los dos fluidos tienen diferentes módulos de compresibilidad.

Los resultados indicaron que las velocidades de propagación de las ondas S en las rocas graníticas con cierta fracción de agua o con cierta fracción de fundido de riolita son muy similares. Esto se debe a que en ambos casos la onda S identifica a ambos como fluidos y por tanto se reduce de manera similar, además, la pequeña diferencia en las velocidades se debe a la densidad del fluido: una roca que contienen agua libre es menos densa a la misma fracción de fluido, de tal forma que muestra una velocidad de cizalla mayor. La disminución en la velocidad de la onda S se puede interpretar como una pérdida de coherencia en el material causada por fracturas (fig.3.8). La gran similitud entre las curvas de velocidad de propagación de las ondas S a través de granito con agua y con fundido de riolita no permite utilizar este tipo de ondas para distinguir entre ambos fluidos. Las ondas P son más útiles para este propósito aunque en realidad se ha visto que un mejor indicador es el cociente de las ondas sísmicas  $V_p/V_s$  (fig.3.9) (Watanabe, 1993).



**Figura.3.8.-** Velocidades  $V_p$  y  $V_s$  vs fracción de volumen de fluido en el granito.



**Figura.3.9.-** Cociente de las velocidades  $V_p/V_s$  en rocas de granito con diferentes concentraciones de agua o de fundido de riolita en función de la fracción de volumen del fluido que contiene (datos empíricos).

De la figura 3.9, se puede observar que el cociente de las velocidades de las ondas sísmicas aumenta con la fracción de fluido de riolita. El cociente de velocidades sísmicas para la roca con agua decrece con el aumento de la fracción de fluido en el intervalo de 0 a 0.10, mientras que en el intervalo de 0.10 a 0.15 aumenta ligeramente. De la grafica anterior se podría proponer que el cociente de las velocidades sísmicas es un buen indicador para saber si la roca contiene agua o está parcialmente fundida. Lo anterior puede ser aplicado a diferentes matrices solidas y a diferentes composiciones de fundido de silicatos (Watanabe, 1993).

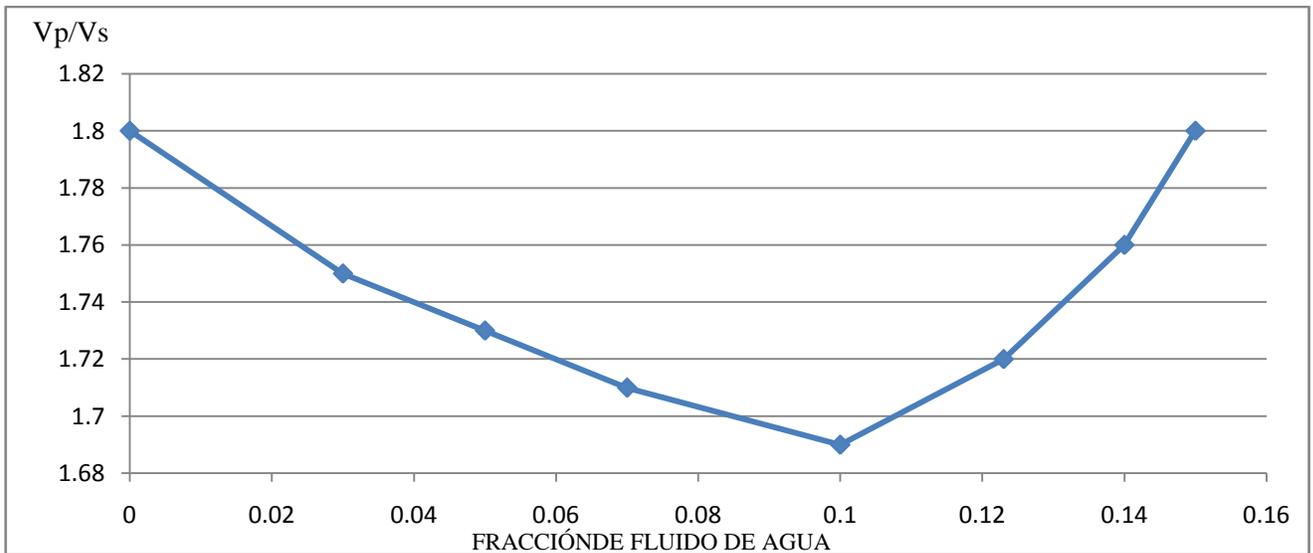
Los resultados anteriores podrían ser utilizados para analizar los datos sísmicos lunares. La corteza lunar está compuesta por anortosita, por su composición y color se asemeja al granito por lo que en primera aproximación podríamos utilizar los resultados obtenidos para el granito para darnos una idea de lo que pasaría en la Luna.

Tomamos los datos de las velocidades sísmicas de las ondas P y S en el interior lunar obtenidos por diferentes equipos de investigación que usaron diferentes métodos para estimarlas (Tabla 3.4). A nosotros nos interesan las velocidades sísmicas hasta una profundidad de entre 60 y 150 km que es el grosor aproximado de la corteza lunar. Tomando como referencia la figura 3.9 haremos una interpolación para las fracciones de volumen de fluido en relación al cociente de velocidades sísmicas (tabla 3.5). Esto nos podría dar una idea de la posible existencia de agua en la corteza lunar.

**Tabla 3.5.-**Datos de velocidades sísmicas de las ondas P y S a diferentes profundidades en el interior lunar (tomada de Kuskov y Kronrod, 2009). La última columna se calculó para este trabajo de tesis.

MODELO	PROFUNDIDAD	V <sub>P</sub> (km/s)	V <sub>S</sub> (Km/s)	V <sub>P</sub> / V <sub>S</sub>
Goins et al.,1981	60	7.75	4.57	1.70
Nakamura, 1983	60-300	7.74	4.49	1.72
Gagnepain-Beyneix et al. ,2006	40-240	7.65	4.44	1.72
Kuskov et al.,2002	30-300	7.81	4.51	1.73
Kuskov,Kronrod, 1998	60-270	7.67	4.46	1.72

Los datos útiles de la tabla 3.5 fueron ordenados de acuerdo a la profundidad (tabla.3.6) e interpolados respecto a los datos de la figura 3.10.



**Figura 3.10-** Datos seleccionados de la figura 3.9 y graficados para tener una mejor apreciación de los valores de la fracción de fluido para un cociente de velocidades dado.

**Tabla.3.6.-**Datos de la tabla 3.5 ordenados de acuerdo a la profundidad. La última columna muestra la fracción de agua resultado de la interpolación de datos en la gráfica de la figura #.

<b>Profundidad (km)</b>	<b><math>V_p/V_s</math></b>	<b>Fracción de fluido</b>
30-300	1.73	0.05
40-240	1.72	0.06
60	1.69	0.10
60-270	1.71	0.07
60-300	1.72	0.06

Como se observa de la tabla 3.6 existe la probabilidad de que haya agua contenida en la corteza lunar, aunque si se consideraran errores, probablemente no se podría decir que los cocientes de velocidades sísmicas impliquen la existencia de agua.

### 3.2 CLEMENTINE

#### 3.2.1 Cámara en el Cercano Infrarrojo (NIR)

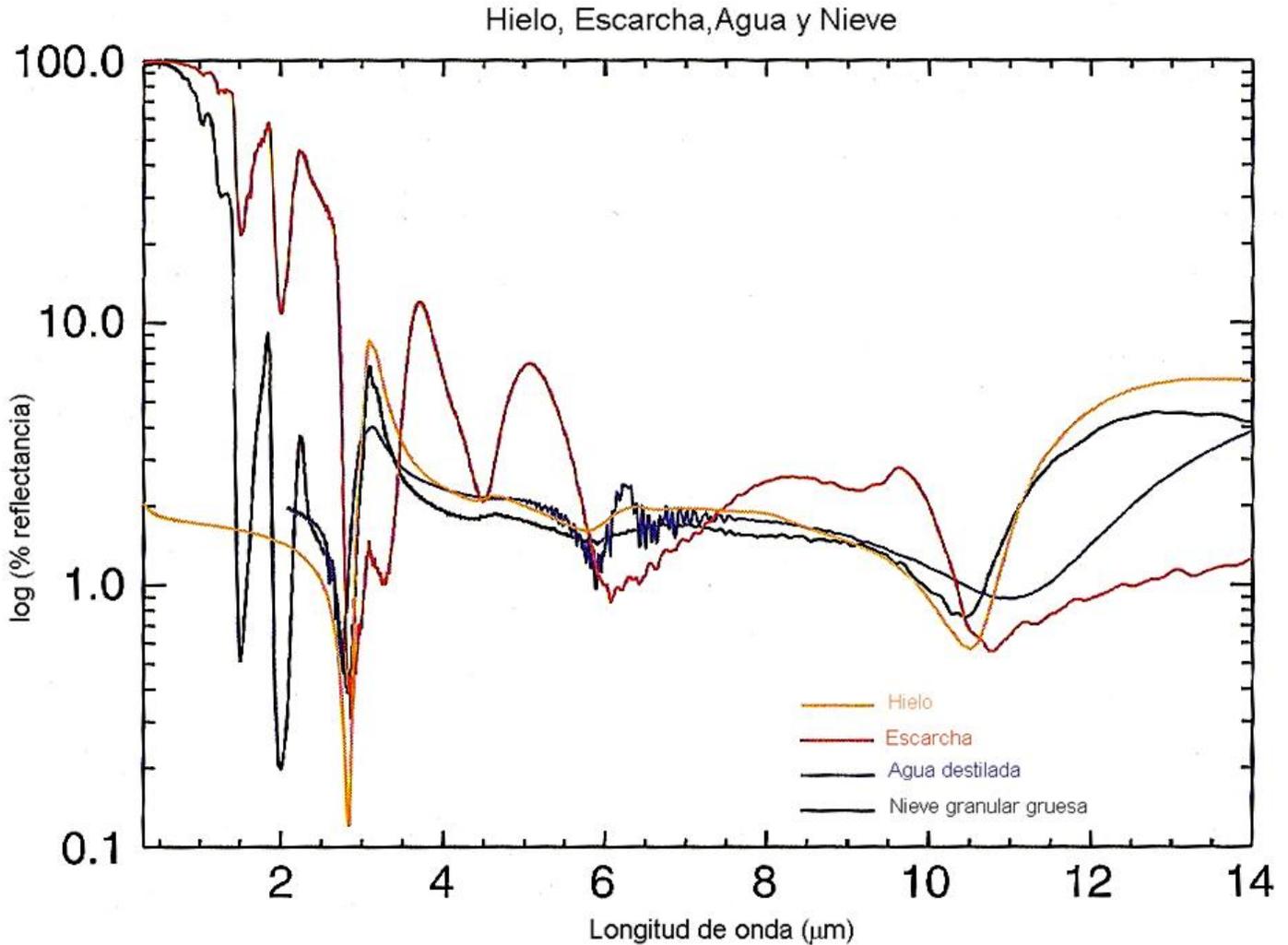
En la misión Clementine se realizaron diferentes experimentos donde la cámara en el cercano infrarrojo (NIR [0.4 $\mu$ m a 2.7 $\mu$ m]) tuvo como objetivo encontrar rastros de agua congelada sobre o cerca de la superficie lunar. Ya que algunas de las longitudes de onda en el cercano infrarrojo son fuertemente absorbidas por la molécula de agua y por minerales que contienen hidroxilo (OH<sup>-</sup>), las firmas espectrales obtenidas en el NIR ayudan a identificar depósitos de agua sobre la superficie lunar. Por lo que es conveniente tener una buena resolución espectral en el infrarrojo.

Al obtener el espectro de reflectancia se pueden identificar las características espectrales del agua. Estudios previos del espectro de reflectancia en el ultravioleta (0.01 a 0.38  $\mu$ m) y en el infrarrojo cercano y medio revelaron los modos de vibración (estiramiento simétrico, flexión y estiramiento antisimétrico) de la molécula de agua en diferentes fases (sólido, líquido o gaseoso) (tabla 3.7). En otras palabras, los modos de vibración son diferentes para cada estado del agua, lo que resulta en un espectro diferente que ayuda a identificar su estado en la superficie lunar a partir del espectro en el infrarrojo cercano (fig.3.11)(Helbert et al., 2009).

Los espectros de hielo y escarcha (agua congelada a muy bajas temperaturas) de agua se caracterizan por ser brillantes y planos a longitudes de onda del visual y muestran características distintivas en el ultravioleta y en el cercano infrarrojo y en el medio infrarrojo (fig.3.11). Los espectros de vibración contienen muchas características de absorción además de los modos fundamentales conocidas como matices (Gaffiey et al., 1993). El hielo de agua tiene fuertes matices en las bandas centradas a 1.5 y 2.0  $\mu$ m, sin embargo, el que la absorción en estas bandas sea tan fuerte hace que sean propensas a la saturación, por lo que los matices a 1.26 y 1.04  $\mu$ m son a veces más útiles. Muchos minerales incorporan agua e hidroxilo en su estructura. El agua también puede ser absorbida y mantenida entre las laminas de la estructura trilaminar de algunos minerales de arcilla o atrapa en inclusiones fluidas. En la Tierra esto ocurre en las rocas como resultado de intemperismo, alteración hidrotermal o por precipitación sedimentaria.

En la región del infrarrojo el agua presenta características espectrales distintivas, la mayor de todas es una fuerte absorción alrededor de las 3  $\mu$ m causada por la superposición de los modos de estiramiento simétrico y antisimétrico con el primer matiz con el modo de flexión a 6  $\mu$ m. Esta línea de absorción es muy útil para identificar la presencia de agua pero no la composición de la roca donde ésta se haya debido a que no es muy sensible a los cambios en la mineralogía. Entre 2.1 y 2.5  $\mu$ m hay un grupo de bandas débiles pero bien

definidas producidas por los modos de vibración de estiramiento del catión OH. Otras características distintivas son el matiz a 1.9  $\mu\text{m}$  producido por el agua absorbida o ligada a un mineral, como el agua intercapa en las arcillas esmectita, y el matiz a 1.4  $\mu\text{m}$ , característico tanto del agua como del hidroxilo. La presencia a 1.4  $\mu\text{m}$  combinada con la ausencia del matiz a 1.9  $\mu\text{m}$  es un indicativo de la presencia de minerales que albergan hidroxilo (Helbert et al., 2009).



**Figura.3.11.**-Firmas espectrales del agua en diferentes fases (líquido, hielo, escarcha y nieve (grano grueso) en el ultravioleta y en el infrarrojo(cercano y medio)(Spohh,2009).

**Tabla 3.7.**-Modos de vibración en el cercano infrarrojo donde hay fuertes absorciones debidas a la presencia de la molécula de agua.

MODOS DE VIBRACIÓN	GAS ( $\mu\text{m}$ )	LIQUIDO ( $\mu\text{m}$ )	HIELO ( $\mu\text{m}$ )
v <sub>1</sub>	2.74*	3.10 <sup>+</sup>	3.17*
v <sub>2</sub>	6.27 <sup>+</sup>	6.08 <sup>+</sup>	6.10 <sup>+</sup>
v <sub>3</sub>	2.66*	2.90 <sup>+</sup>	2.96*

\*Tomado de Gaffey et al., 1993.

+Tomado de Helbert et al., 2009.

Implementando la información anterior analizaremos los resultados obtenidos por diferentes equipos de investigación que tenían como objetivo encontrar agua congelada sobre la superficie lunar.

Durante la misión CLEMENTINE se utilizó un detector con once bandas espectrales (0.415, 0.75, 0.9, 0.95, 1.0, 1.1, 1.25, 1.5, 2.0, 2.6 y 2.7  $\mu\text{m}$ ) con una resolución espacial de 100-200 m/píxel sobre la superficie lunar. El Servicio Geológico de los Estados Unidos se encargó de elaborar un mosaico global utilizando la información obtenida en seis de esas longitudes de onda (1.1, 1.25, 1.5, 2.0, 2.6, 2.7  $\mu\text{m}$ ) con una resolución de 500 m/píxel. Dicho mosaico fue utilizado para hacer un mosaico cilíndrico con una resolución de 1km (proyección de 0 a 70N y de 70E a 30N).

Gillis y Lucey (2004) investigaron la presencia de fases acuosas en la regolita. Para esto normalizaron los datos de la banda de 2.7  $\mu\text{m}$  respecto a los de las bandas a 2.6 y 2.0  $\mu\text{m}$  con lo que obtuvieron dos imágenes cociente en las que buscaron absorción debida a la presencia de minerales portadores de agua. La banda centrada en 2.7 $\mu\text{m}$  fue seleccionada debido a la fuerte absorción presentada a estas longitudes de onda por el espectro del agua, como se menciona en párrafos anteriores. En particular, el encontrar una fuerte absorción a 2.7  $\mu\text{m}$  podría implicar la presencia de agua proveniente de cometas. Para determinar si existe una fuerte absorción a 2.7  $\mu\text{m}$ , los autores hicieron dos imágenes cociente:  $2.7\mu\text{m}/2.6 \mu\text{m}$  y  $2.7\mu\text{m}/2.0\mu\text{m}$ , pero no se observaron características espectrales que permitieran la identificación de agua o de minerales hidratados.

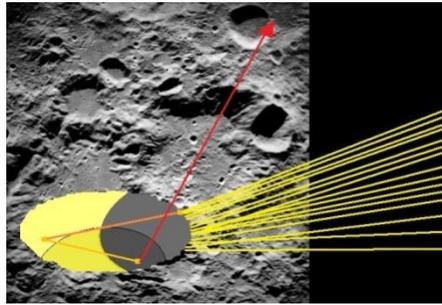
Como los estudios anteriores no mostraron rastros de agua congelada sobre la superficie lunar, se empezaron a analizar con más cuidado las imágenes en el NIR de los cráteres de impacto capturadas por CLEMENTINE. Los cráteres de impacto que se encuentran sobre la superficie lunar son causados por cuerpos provenientes del espacio (cometas, micro-meteoroides, meteoroides y asteroides) que a su vez van dejando escombros sobre la superficie lunar. Estos cuerpos suelen ser ricos en agua y tal vez pudieron depositar cantidades apreciables de ella bajo o sobre la regolita lunar.

Se cree que las moléculas de agua congelada provenientes de estos cuerpos impactores siguieron trayectorias balísticas arbitrarias, una parte de estas moléculas se perdió por causa del viento solar, por la radiación solar o por otros procesos, mientras que la otra parte se transportó a otros sitios donde fueron depositadas en cráteres en sombra permanente que actuaron como trampas frías conservando dichas moléculas. Por este motivo, los análisis se enfocaron en aquellos cráteres que se encuentran en sombra permanente cerca de los polos lunares.

Los primeros análisis realizados fueron para determinar las temperaturas de estas trampas frías donde se calculó una temperatura por debajo de 102 °K en los polos de la Luna y Mercurio. Al observar estas bajas temperaturas se quiso determinar el tiempo en que permanecen los depósitos de agua congelada en las trampas frías. Tomando una aproximación numérica y unas consideraciones (cráter en forma de tazón con un piso plano, una dispersión Lambertiana y un modelo térmico) se determinó que los depósitos de agua congelada en las trampas frías pueden permanecer ahí millones de años (Vasavada et al., 1999).

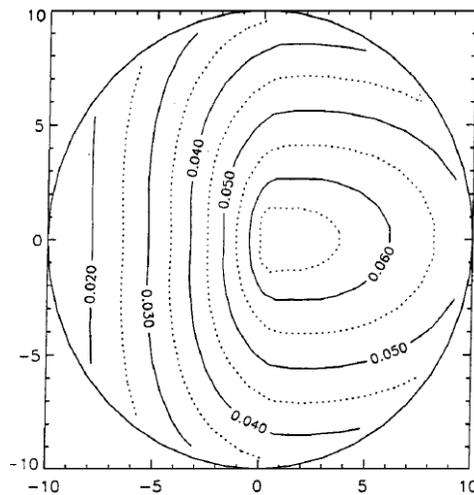
McConnochie y colaboradores (2001) observaron que las imágenes en el cercano infrarrojo tomadas por CLEMENTINE mostraban cantidades significativas de dispersión dentro de los cráteres en sombra permanente. Por lo que sospecharon que en la luz emitida por estos cráteres podrían encontrar las firmas espectrales de agua congelada. Para su análisis consideraron las imágenes en el infrarrojo cercano de los polos sur y norte de la Luna (McConnochie et al., 2001).

En estos estudios se determinó la cantidad de luz emitida por la sombra del cráter: la luz del Sol ilumina directamente sólo una parte del cráter, parte de la luz reflejada por la parte iluminada del cráter incide en la zona de sombra (primera dispersión) de donde a su vez es reflejada (segunda dispersión) y capturada por el detector de la nave. A esto se le llama dispersión múltiple (fig. 3.12).



**Figura.3.12.-**Dispersión múltiple en un cráter en sombra permanente.

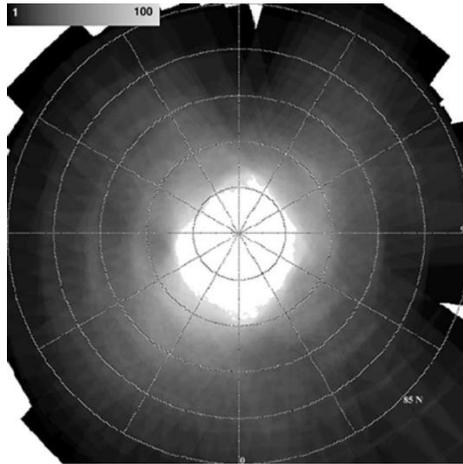
Para determinar la dispersión múltiple en un cráter, McConnochie y colaboradores calcularon primero el flujo total de luz reflejada proveniente de un cráter. Para esto ellos modelan como sería el flujo de la primera dispersión considerando que el ángulo de incidencia de la luz del Sol es de  $88^\circ$  y viene desde la derecha de un cráter cuyo cociente-diámetro es de 0.2. La figura 3.13 muestra el flujo total recibido del cráter debido a este primer evento de dispersión. Los números representan el cociente de la intensidad de luz dispersada entre intensidad de luz solar directa recibida por áreas sin sombra. Parte de la luz proveniente de esta primer dispersión va a incidir sobre las zonas en sombra donde a su vez va hacer dispersada al espacio. Debido a que las pendientes en la topografía lunar son pequeñas la geometría de la segunda dispersión proveniente de la zona de sombra es similar a la geometría de la luz dispersada proveniente superficies iluminadas cercanas a los polos por lo tanto, las intensidades observadas provenientes de regiones iluminadas directamente y en sombra difieren solamente por el cociente de los flujos recibidos por estas regiones es decir de 5 a 7 % (McConnochie et al., 2002)



**Figura.3.13.-**Gráfica de la primera dispersión de luz en un cráter por unidad de flujo de luz solar.

Con el estudio de la dispersión múltiple dentro de los cráteres en sombra permanente y utilizando los filtros de la cámara en el infrarrojo cercano McConnochie y colaboradores se dispusieron a buscar firmas espectrales de agua congelada sobre la superficie lunar.

Al utilizar el filtro a 1.1  $\mu\text{m}$  notaron un incremento en la señal en el piso de un cráter en sombra permanente (localizado en el centro de la fig.3.14) por lo que seleccionaron ese filtro para los análisis pues podría indicar la presencia de depósitos de agua.



**Figura.3.14.-**Imagen del Polo Norte con el filtro 1.1  $\mu\text{m}$  tomada con la cámara en el infrarrojo cercano.

Durante la captura de las imágenes en el infrarrojo cercano por CLEMENTINE se notó que los datos no estaban calibrados radiométricamente por lo que procedieron a la construcción de una calibración basada en calibraciones realizadas anteriormente a las imágenes NIR de CLEMENTINE.

Con las imágenes calibradas, McConnochie y colegas procedieron a la detección de agua congelada en los cráteres en sombra. La señal observada en la región sombreada,  $DN\_SHAD_f$ , para un filtro dado  $f$ , se relaciona con la reflectancia real de la región sombreada mediante la expresión :

$$DN\_SHAD_f = Solar_f \cdot A \cdot R\_ILLUM_f \cdot R\_SHAD_f \cdot Camara_f \quad (1)$$

donde  $R\_ILLUM_f$  representa la reflectancia de la región iluminada directamente que dispersa los fotones hacia la región sombreada,  $A$  es una constante no conocida, independiente de la longitud de onda, que relaciona la intensidad de la luz que sufre dispersión múltiple con la de la luz que es dispersada solo una vez y que proviene de la región fuente iluminada,  $Solar_f$  representa la radiación solar que es capturada por un filtro pasabanda,  $R\_SHAD_f$  representa la reflectancia de la región sombreada y por ultimo  $Camara_f$  es la función de respuesta del instrumento para un filtro dado.

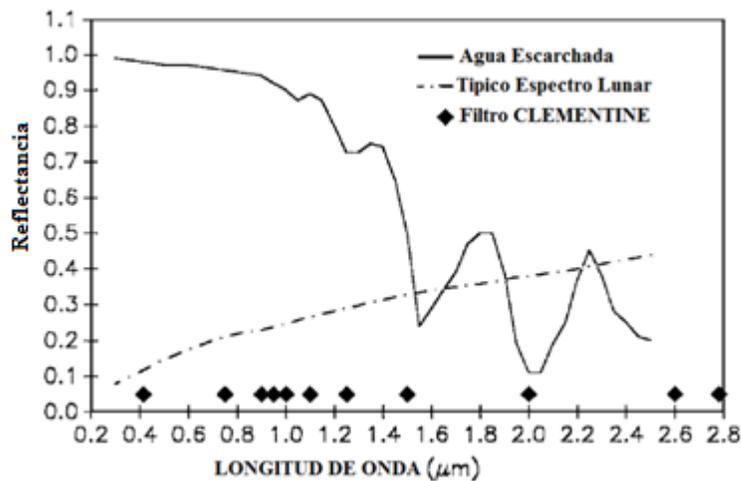
La señal observada proveniente de la región fuente iluminada,  $DN\_ILLUM_f$ , se obtuvo mediante una expresión similar a la de la ecuación (1). Ambas expresiones fueron acopladas para determinar la reflectancia de la región en sombra y de la región iluminada. Como  $A$  es una constante no conocida se normalizaron los valores de reflectancia provenientes de los distintos filtros respecto a los datos obtenidos del filtro a 1.1  $\mu\text{m}$ . Por otro lado, la reflectancia en la región sombreada puede verse como una combinación lineal de la reflectancia de una muestra de suelo maduro de las tierras altas de la zona de aterrizaje del Apollo 16 ( $R\_L_f$  – Pieters, 1999-) y la reflectancia de una muestra de agua escarchada a 77 °K ( $R\_W_f$  – Clark et al., 1993-):

$$R_{SHAD_f} = (1 - \rho) \cdot R_{L_f} + \rho \cdot R_{W_f} \quad (2)$$

donde  $\rho$  es la fracción de área de la región en sombra que está cubierta por agua escarchada.

Conjuntando 1 y 2 se encuentra una expresión normalizada a partir de la cual se pueden determinar los valores de  $\rho$ :

$$\frac{(1-\rho) \cdot R_{L_f} + \rho \cdot R_{W_f}}{(1-\rho) \cdot R_{L_0} + \rho \cdot R_{W_0}} = \frac{DN_{SHAD_f}}{DN_{SHAD_0}} \cdot \frac{DN_{ILLUM_0}}{DN_{ILLUM_f}} \quad (3)$$

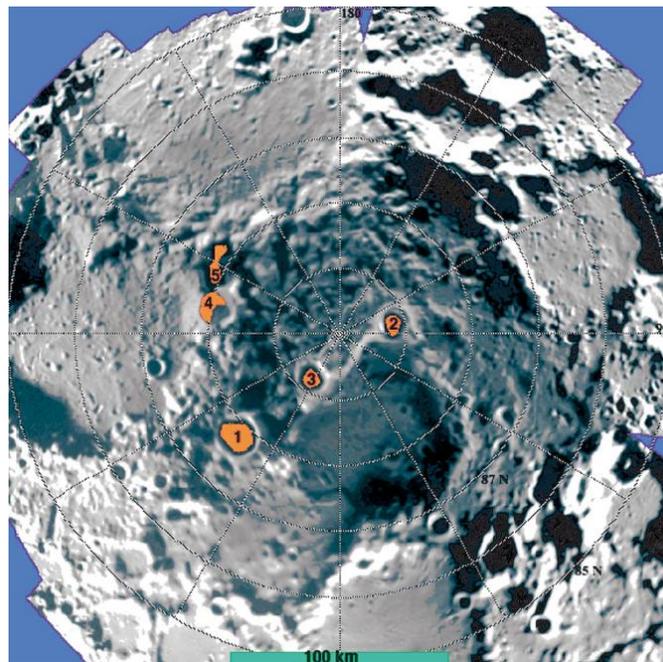


**Figura.3.15.**-Firmas espectrales del agua escarchada y de una muestra lunar del APOLLO 16. Los rombos muestran los filtros en el infrarrojo utilizados por CLEMENTINE en el mapeo de los polos lunares.

El análisis de dispersión múltiple se aplicó en 5 regiones (fig.3.16), 3 de las cuales fueron cráteres en sombra permanente identificados previamente por Margot y colaboradores en 1999. En cuanto a las otras dos, una de ellas es aparentemente una zona de sombra que fue detectada por McConnochie y colaboradores, y que Margot había caracterizado como una región que recibe directamente la luz solar en algunos puntos debido a la posición de la Luna respecto al Sol a lo largo del año. La última región no fue clasificada por Margot pero en su análisis de la señal de radar se observó como una sombra. Las muestras de referencia que fueron utilizadas en el modelo de combinación lineal (expresión 2) para la detección de agua congelada sobre las 5 regiones fueron proporcionadas por Pieters y Clark (fig.3.15). La muestra de tierra lunar provino del lugar de aterrizaje del Apollo 16 (Pieters, 1999), mientras que la otra es una muestra de hielo de agua a 77 °K (Clark et al., 1993). En la figura 3.17 se puede observar que a 1.5  $\mu\text{m}$  y 2  $\mu\text{m}$  se encuentran dos líneas de absorción características del agua congelada, por lo que es importante ver los valores de  $\rho$  a estas longitudes de onda. Para esto McConnochie y colaboradores aplicaron el modelo de combinación lineal (expresión 3) a cada una de estas bandas, observando que en la banda de 1.5  $\mu\text{m}$ , la fracción del área en sombras que está cubierta por escarcha de agua fue en todos los casos menor a 7.1 %, mientras que la banda de 2.0  $\mu\text{m}$  no proporcionó información sobre la presencia de cubierta de agua congelada en ninguna de las 5 regiones (tabla 3.8).

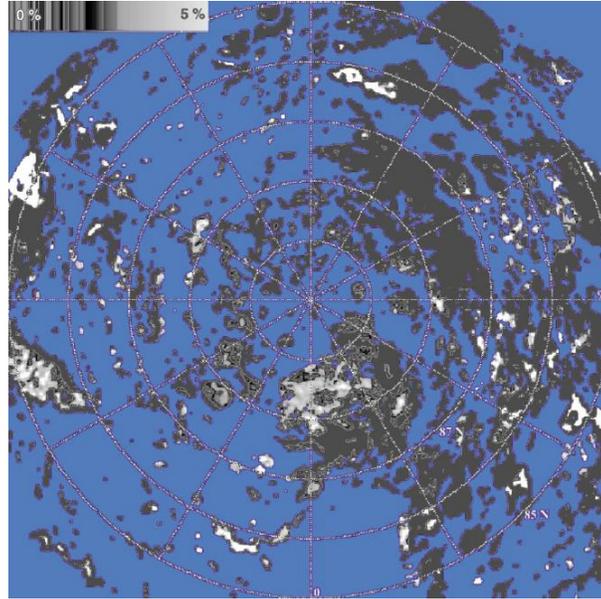
**Tabla.3.8.**-Resultados del modelo de combinación lineal aplicado a las banda de 1.5 y 2.0  $\mu\text{m}$  (datos normalizados a 1.1  $\mu\text{m}$ ) a las 5 regiones analizadas por McConnochie y colaboradores. La última columna muestra el porcentaje estimado de la cobertura de agua congelada encontrada en cada una de las regiones. Los valores entre paréntesis son los intervalos de confianza calculados a  $3\sigma$  a partir de la media.

Muestra de referencia		
Región	Filtro ( $\mu\text{m}$ )	Hielo a 77 °K (Clark et al. 1993)
1:87.8 N, 45 O	1.5	4.4 (2.4-12.0)
	2.0	0.0
2:89.1 N, 101 E	1.5	3.0 (0.0-12.0)
	2.0	0.0
3:89.1 N, 28 O	1.5	1.4 (0.0-8.3)
	2.0	0.0
4:88.1 N, 102 O	1.5	7.1 (3.1-22.2)
	2.0	0.0 (0.0-2.2)
5:87.9 N, 120 O	1.5	6.9 (4.3-26.1)
	2.0	0.0



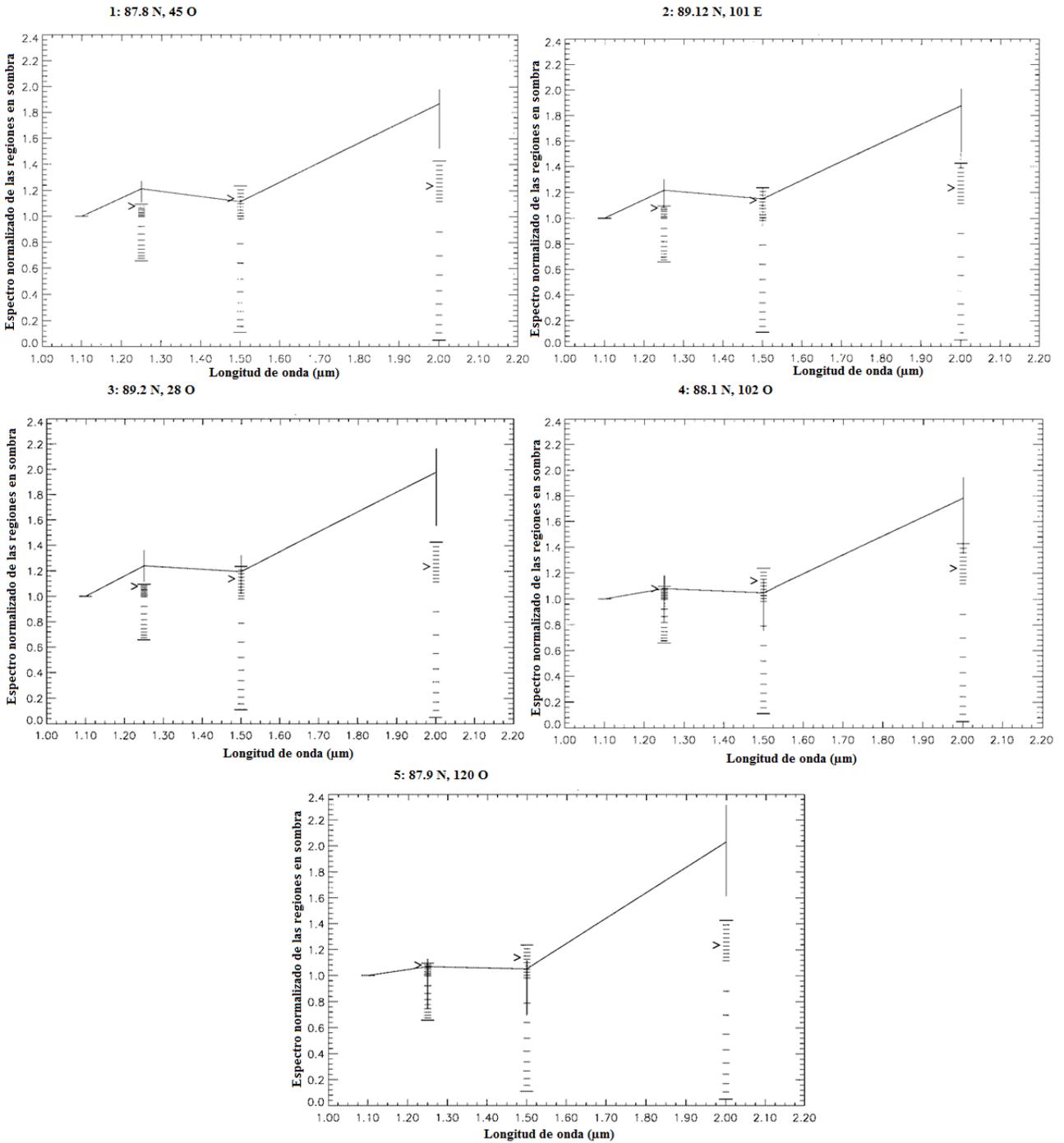
**Figura.3.16.**-Imagen NIR en la banda 1.1  $\mu\text{m}$  del Polo Norte lunar ubicando las 5 regiones estudiadas.

McConnochie y colaboradores elaboraron un mosaico donde mostraron la cobertura mínima de escarcha de agua utilizando imágenes cociente  $1.5\mu\text{m} / 1.1\mu\text{m}$  y el modelo de combinación lineal de la ecuación (2) (fig.3.17). En este mosaico, las zonas más brillantes indican la cobertura de agua congelada que se esperaría encontrar en la zona de sombra con valores de 5% o mayores, las zonas oscuras indican una cobertura de 0% y las zonas de color azul indican las zonas que presentaron iluminación directa o bien datos no válidos.



**Figura.3.17.-**Mosaico normalizado donde se muestra la mínima cobertura de agua Congelada. Los datos provenientes de la cámara NIR a  $1.5 \mu\text{m}$ .

La reflectancia proveniente de las 5 regiones en sombra, a longitudes de onda a  $1.25$ ,  $1.5$  y  $2.0 \mu\text{m}$  normalizadas respecto a la banda  $1.1 \mu\text{m}$  se observa en la figura 3.18. En dicha figura las rayitas horizontales representan los valores de lado izquierdo de la ecuación (3) es decir el valor normalizado de la reflectancia proveniente de la región sombreada para diferentes concentraciones de agua escarchada. Las marcas horizontales más gruesas representan la fracción mínima y máxima de la cobertura de escarcha: 0% arriba y 100% abajo. Las rayitas horizontales representan intervalos de 1% (cuando están muy juntas) y de 10 % (cuando están muy separadas). Los símbolos “ > ” indican las reflectancias normalizadas esperadas provenientes de regiones sin hielo compuestas únicamente de suelo inmaduro de las tierras altas. En la figura 3.18 se puede notar que la posición donde están estos símbolos prácticamente es indistinguible de los resultados obtenidos para el suelo maduro con bajo contenido de escarcha. Las líneas unen puntos observados. McConnochie y colaboradores llegan a la conclusión de que solamente en la región 1 se encuentran evidencias de cobertura de agua escarchada (de entre 2.4 y 21 %, si se consideran también los resultados de los modelos de combinación lineal utilizando hielo a  $55^\circ\text{K}$ ), aunque no pueden concluir que esto represente una detección positiva de agua en la Luna ya que la banda a  $2\mu\text{m}$  no muestra evidencia de agua escarchada. En las regiones 2 y 3, las reflectancias a  $1.5 \mu\text{m}$  son consistentes con el suelo ordinario de las tierras altas lunares. Finalmente no consideran las regiones 4 y 5 pues en esencia tiene dudas de que estén en sombra permanente durante todo el ciclo lunar (McConnochie et al., 2002).



**Figura.3.18.-** Espectros normalizados (1.25, 1.5 y 2.0  $\mu\text{m}$ ) de las cinco regiones en sombra analizadas en busca de agua congelada.

El experimento de radar biestático de CLEMENTINE fue diseñado para medir las propiedades de dispersión de la superficie lunar. Este radar estudió grandes áreas de los Polos lunares permitiendo capturar las características topográficas. Sin embargo, al analizar los datos del radar biestático se observaron anomalías en los radios de polarización en la región Shackleton que sugirieron la presencia de depósitos de agua congelada mezclada con regolita u otros materiales (Vasavada et al., 1998).

Al ser analizado este comportamiento se encontró que las anomalías en la polarización se debieron a la presencia de ruido en los datos y no por la existencia de agua congelada. Esos resultados levantaron una gran

controversia, ya que la conclusión general de este trabajo fue que las trampas frías de los polos lunares estaban vacías (Vasavada et al., 1998). Por lo que en el Polo Sur Lunar no podría haber algún registro de agua.

Más adelante con ayuda de los datos obtenidos en la misión Lunar Prospector analizaremos este resultado.

### **3.3 LUNAR PROSPECTOR**

#### **3.3.1 Espectrómetro de Neutrones (NS)**

El espectrómetro de neutrones en la misión Lunar Prospector ayudó al estudio de la abundancia de Hidrógeno en los polos Norte y Sur de la Luna, especialmente en cráteres que se encuentran en sombra permanente.

La fuente más importante de neutrones es la interacción de los rayos cósmicos galácticos (iones de alta energía provenientes de la galaxia) y de los rayos cósmicos solares (en especial protones) con los núcleos del material de las superficies planetarias. Cuando los rayos cósmicos penetran la superficie de un planeta o satélite (sin atmósfera), empiezan a perder energía debido a varios mecanismos. El más importante de estos mecanismos son las cascadas intranucleares, las cuales transforman a los rayos cósmicos y a los núcleos de los elementos con los que interactuaron en muchos nucleones secundarios, mesones y núcleos residuales. Estas partículas secundarias siguen perdiendo energía ya sea porque interactúan a su vez con otro núcleo, por decaimiento o por colisiones Coulombianas. Finalmente, los neutrones van a dominar a la población de partículas secundarias con energías menores a 100 MeV. Las cascadas intranucleares producen neutrones mediante dos mecanismos: a) interacciones directas y colisiones capaces de desintegrar el núcleo y b) evaporación de neutrones provenientes de núcleos residuales excitados. Cada uno de estos mecanismos produce neutrones con espectros de energía característicos. El primer mecanismo produce neutrones con un espectro de energía continuo cuyo límite superior es la energía del rayo cósmico incidente, mientras que segundo produce un espectro de energía Maxwelliano con una energía promedio del orden de 1 MeV.

Una vez producidos, los neutrones interactúan elástica e inelásticamente con el material de los alrededores, esto cambia su espectro de energías. En particular, resultan dos poblaciones de neutrones con energías menores a 10 keV cuyos espectros de energía dependen de las propiedades del material de los alrededores (porque fue con el que interactuaron para finalmente quedarse con las energías que tienen). Estas dos poblaciones son los neutrones epitérmicos y los neutrones térmicos. Los neutrones epitérmicos son aquellos cuyas energías,  $E$ , son tales que:  $10 T_n \leq E \leq 10 \text{ keV}$ . Los neutrones térmicos tienen energías menores a  $T_n$ , con  $T_n$  la temperatura del neutrón que suele ser mayor que la temperatura física del medio. Existe una tercera población de neutrones, los “rápidos” cuyas energías pueden ser del orden de varios cientos de kilovoltios (Pieters y Englert, 1993).

Elementos de baja masa como H, C y O son más eficientes en dispersar neutrones a energías más bajas que absorbiéndolos, por lo que el cociente de los flujos de neutrones térmicos a epitérmicos es un buen indicador de las abundancias de estos elementos en un planeta (Drake et al., 1988). En general los espectros de flujo de neutrones proporcionan una identificación única de especies químicas enriquecidas en Hidrógeno y una caracterización de su distribución espacial (Feldman et al., 1998).

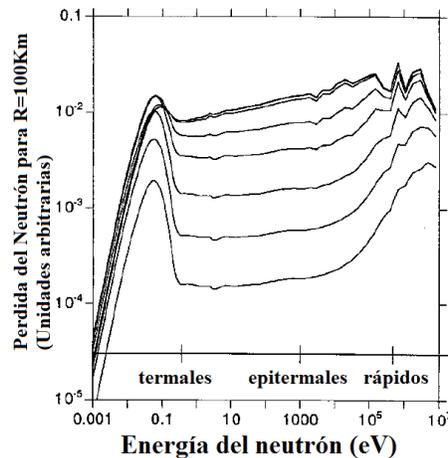
Existen cinco formas en que se puede encontrar hidrógeno: a) agua ligada químicamente en hidróxidos (OH, como en la goetita  $[\text{FeOOH}]$  y la montmorilonita  $[(\text{Al}, \text{Fe})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n \text{H}_2\text{O}]$ ), b) agua de hidratación como en la montmorilonita; c) agua absorbida ligada físicamente, d) agua líquida libre (salmuera); y e) hielo (Drake et al., 1988).

Feldman y colaboradores (1998) simularon espectros de aletargamiento de los neutrones para regolita de hierro anortosita considerando que ésta tenía ciertas cantidades de agua mezclada. Para esto utilizaron el

código ONEDAT (One-Dimensional, Diffusion-Accelerate, Neutral-Particle Transport) obteniendo los espectros de la figura 3.19.

Los neutrones rápidos transfieren energía a los núcleos en la regolita a una tasa casi constante durante colisiones de dispersión elástica. Este proceso disminuyen la energía de los neutrones convirtiéndolos en neutrones epitérmicos cuyo espectro de flujo es proporcional a  $E^{-1}$ , conforme la energía de estos neutrones se aproxima a la del movimiento térmico de los núcleos de la regolita, empiezan absorber energía con la misma rapidez que la pierden y desarrollan una distribución de velocidades Maxwelliana (fig.3.19) (Feldman et al., 1998).

La tasa de pérdida de energía de los neutrones rápidos está determinada principalmente por la abundancia de Hidrógeno, mientras que su tasa de absorción está determinada principalmente por las abundancias relativas de Fe, Ti, Gd y Sm. Como las tasas de producción y absorción son fijas, la intensidad del espectro del flujo de electrones a energías intermedias está determinada por la tasa con la que los neutrones rápidos pierden energía por colisiones y por la tasa con la que los neutrones epitérmicos pierden su energía. Mientras más Hidrógeno esté presente más rápida es la tasa de pérdida de energía lo que conduce a un flujo de neutrones epitérmicos, el flujo de neutrones rápidos también se reduce, pero en menor medida. Por lo tanto los depósitos de Hidrógeno pueden reconocerse por la reducción local de los flujos de neutrones epitérmicos y rápidos. Las magnitudes relativas de estos flujos dan información sobre el tamaño, la abundancia de Hidrógeno y/o la estratigrafía del depósito (Feldman et al., 2000).



**Figura.3.19.**-Simulación del espectro de aletargamiento de energía de los neutrones para la regolita en las tierras altas para diferentes valores de porcentaje en peso de agua. Las diferentes curvas representan diferentes valores de por ciento en peso de agua, de arriba abajo: 0, 0.01, 0.1, 1, 3, 10, 30 y 100% respectivamente .R es la altitud de la nave espacial. El aletargamiento es el flujo de neutrones en función de intervalos de energía logarítmicos, en otras palabras  $L(E) = E \cdot F(E)$  donde E es la energía del neutrón y F(E) es el flujo de neutrones (Feldman W. et. al., 2011).

Las tasas de conteo de neutrones epitérmicos y rápidos (Epi\_conteos y Rápi\_conteos, respectivamente) en función de la fracción en peso de agua, w, en la regolita lunar, pueden ser obtenidas mediante las expresiones:

$$\text{Epi\_conteos}(w) = \frac{\text{Epiconteos}(0)}{[1+(61 \cdot w)]} \quad (4)$$

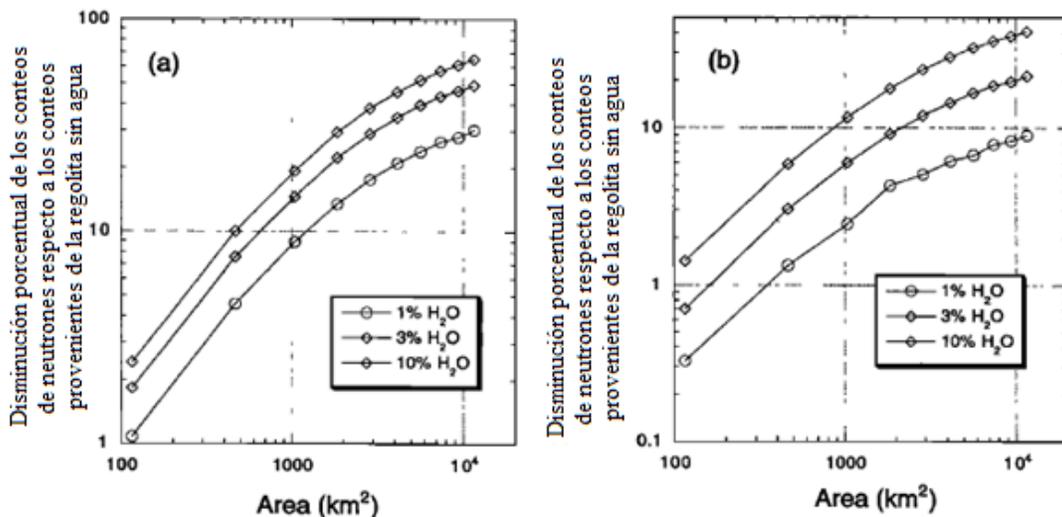
$$\text{Rápi\_conteos}(w) = \frac{\text{Rápiconteos}(0)}{[1+(12 \cdot w)]} \quad (5)$$

Para el flujo de neutrones epitérmicos se observó que éstos también eran sensibles a otros elementos además del Hidrógeno, para tratar de eliminar esta “contaminación” se substrajo una pequeña fracción del flujo de neutrones térmicos del flujo de neutrones epitérmicos. La expresión que se obtuvo fue normalizada con el flujo de neutrones rápidos y se eliminó el ruido estático ocasionado por la reducción del flujo de neutrones térmicos. La siguiente expresión permite una mejor detección de Hidrógeno que de otros elementos utilizando el flujo de neutrones epitérmicos:

$$\text{Epitérmicos}^* = (\text{Epi\_conteos} - (0.07 \cdot \text{térmico})) \quad (6)$$

Para detectar Hidrógeno en la superficie lunar se realizaron estudios cuantitativos tomando en cuenta tres de las principales características de los depósitos de Hidrógeno que pueden afectar a la detección de neutrones desde órbita: el área, la fracción en peso y la profundidad a la que está el depósito de hidrógeno (agua). Estos estudios se realizaron dentro de cráteres en sombra permanente cerca de los polos lunares. Para evaluar la forma en que el área, la fracción en peso de agua y la profundidad de los depósitos afectan el flujo de neutrones, Feldman y colaboradores (2000) hicieron una serie de simulaciones, considerando la corrección en el conteo de neutrones epitérmicos (ec.6).

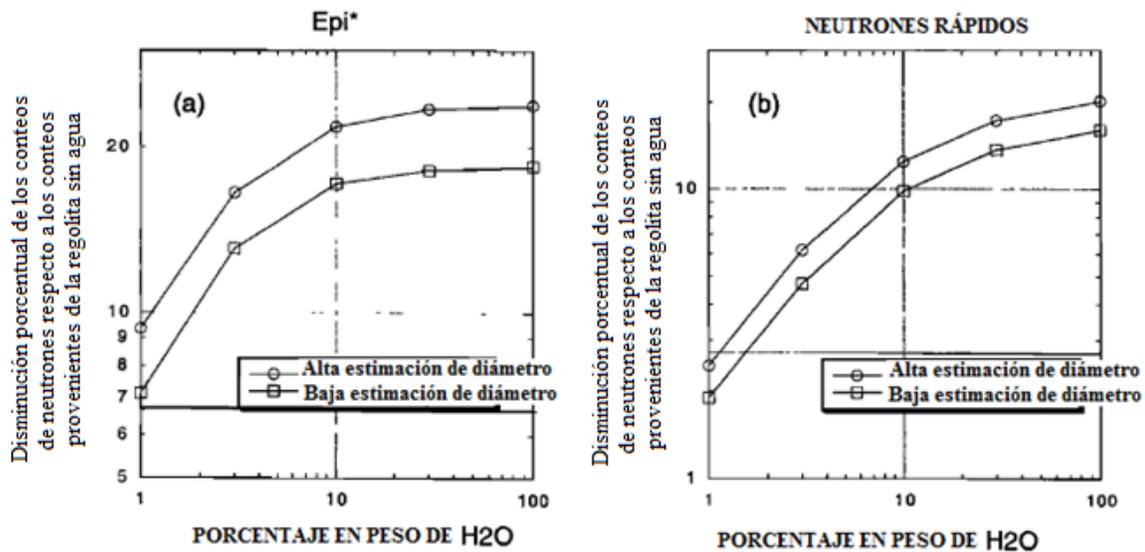
Para ver como se modifica la tasa de conteo de neutrones dependiendo del área de observación, Feldman y colaboradores calcularon en cuanto se reducía la tasa de conteo de neutrones provenientes de los cráteres en sombra en relación con los conteos en áreas aledañas a las que supusieron libres de agua (fig.3.20). Ellos encuentran que la disminución porcentual de neutrones proveniente de los cráteres respecto a las áreas aledañas: (1) es mayor en los neutrones epitérmicos, (2) aumenta con el aumento de agua y (3) aumenta más rápidamente para los neutrones rápidos que para los epitérmicos en función del porcentaje en peso de agua (Feldman et al., 2000). La evidencia de la existencia de depósitos de agua es muy sensible al área asumida. Este efecto aumenta en 1.5 órdenes de magnitud para áreas entre  $10^2$  y  $10^4$   $\text{km}^2$ , por lo que Feldman y colaboradores adoptaron un área equivalente al área estimada de las regiones en sombra permanente cerca del polo sur de la Luna. Para esto, ellos se dieron cuenta que las zonas en sombra permanente del polo sur estaban dominadas, en cuanto a área, por 5 cráteres de impacto, por lo que hicieron un par de estimaciones de su área (tabla 3.9).



**Figura.3.20.-** Simulación del porcentaje de decrecimiento en (a) neutrones epitérmicos y (b) neutrones rápidos para varias áreas circulares (100 a 10000  $\text{km}^2$ ) con una mezcla de regolita y  $\text{H}_2\text{O}$  (1%, 3%, 10 %) que son rodeadas por regolita sin agua.

**Tabla.3.9.-**Estimaciones de las áreas de 5 cráteres en sombra permanente que fueron analizados en busca de agua congelada.

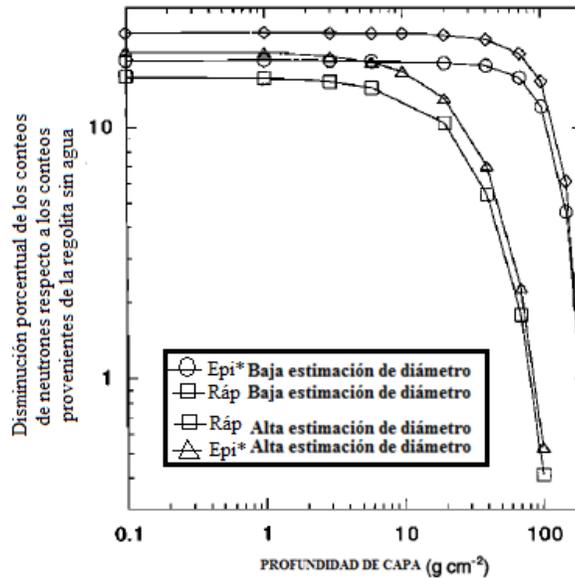
CRÁTER	UBICACIÓN		ESTIMACIÓN ALTA		ESTIMACIÓN BAJA	
	LATITUD	LONGITUD	DIAMETRO (Km)	AREA (Km <sup>2</sup> )	DIAMETRO (Km)	AREA (Km <sup>2</sup> )
Fauistini	87.3° S	77° E	31.1	760	26.9	568
Sin nombre	88.1 °S	45° E	35.4	984	30.7	740
Sin nombre	87.5°S	356°E	32.1	809	27.8	607
Shackleton	89.7°S	110°E	17.0	227		
Sin nombre	88.5°S	273°E	22.6	401		
Cabeus	84.5°S	322°E	.....	.....		



**Figura 3.21.-** Simulación de la disminución porcentual de neutrones (a) epitérmicos y (b) rápidos en función del porcentaje en peso de agua en 5 cráteres en sombra permanente en el polo sur lunar. Las dos curvas mostradas en cada grafica muestran dicha disminución porcentual considerando las estimaciones alta y baja de los 5 cráteres de la tabla 3.9.

Feldman y colaboradores (2000), estimaron la disminución porcentual de neutrones provenientes de los 5 cráteres en sombra listados en la tabla 3.9 respecto de los neutrones provenientes de la regolita sin agua, considerando las dos estimaciones que hicieron para el área de dichos cráteres (fig.3.21). Ellos encuentran que la disminución porcentual en la señal detectada aumenta con el aumento de la concentración de agua tanto en los neutrones epitérmicos como en los rápidos, aunque el efecto es mayor en los neutrones epitérmicos y aumenta con la disminución de la altitud de la nave espacial.

Por último, Feldman y colaboradores realizaron una simulación de la disminución porcentual de los neutrones rápidos y epitérmicos en función del grosor de la capa de regolita, con 0.1 % H<sub>2</sub>O, que cubre los depósitos de Hidrógeno asociados al H<sub>2</sub>O. El resultado de la simulación mostró que la presencia de Hidrógeno es mucho menos evidente cuando el agua está enterrada a una mayor profundidad y que esta característica se acentúa más en los neutrones rápidos que en los epitérmicos (fig.3.22).



**Figura.3.22.**-Simulaciones de la disminución porcentual en las tasas de conteos de neutrones rápidos y epitérmicos en función de la profundidad a la que está la capa con agua. Las curvas muestran promedios de los tres cráteres más grandes listados en la tabla 3.9 (Feldman W. et al. 2011).

En la figura 3.23 se muestra un mapa de las tasas de conteo de neutrones epitérmicos (Epitérmicos\*) a una resolución espacial equivalente a un cuadrado de  $2^\circ \times 2^\circ$  en el ecuador. Los datos fueron obtenidos del espectrómetro de neutrones de Lunar Prospector. En el mapa se puede observar que las tasas de conteo más bajas (colores magenta y azul oscuro) se presentan en ambos polos, otras tasas bajas aparecen salteadas y distribuidas aleatoriamente en toda Luna. Esto también se puede ver de forma gráfica en la figura 3.24 donde se muestran los promedios de las tasas de conteo de neutrones epitérmicos y rápidos de 12 bandas de  $2^\circ$  de ancho separadas entre sí una longitud de  $15^\circ$ . Las líneas verticales trazadas en cada punto de longitud representan la desviación estándar de los conteos a esa latitud para las doce bandas. En la figura 3.24 se puede ver que la curva correspondiente a los neutrones epitérmicos presenta dos depresiones significativas una en cada polo. La curva correspondiente a los neutrones rápidos muestra una ligera depresión en el polo Sur, pero ninguna en el Norte. Cuando se comparan estos resultados con las tasas de conteos de neutrones obtenidos a latitudes mayores se observar que las depresiones en las curvas en los polos, para los neutrones epitérmicos, siguen apareciendo aunque en el Sur la depresión es ligeramente menor. Sin embargo, en el caso de los neutrones rápidos, la ligera depresión en el Sur desaparece cuando los datos se toman a una mayor altitud, mientras que en el Norte incluso aparece un pico en vez de una depresión (fig.3.25).

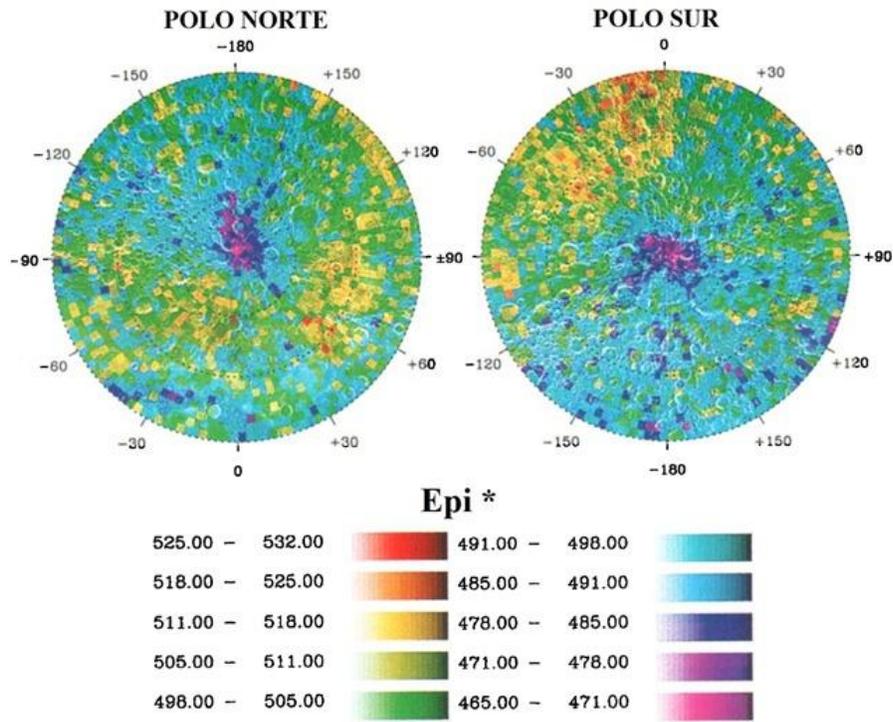


Figura.3.23.-Mapa de tasas de conteo de neutrones Epitérmicos\* con una resolución espacial de 2°x 2° en el ecuador. Los datos están sobre puestos a un mapa topográfico de la Luna.

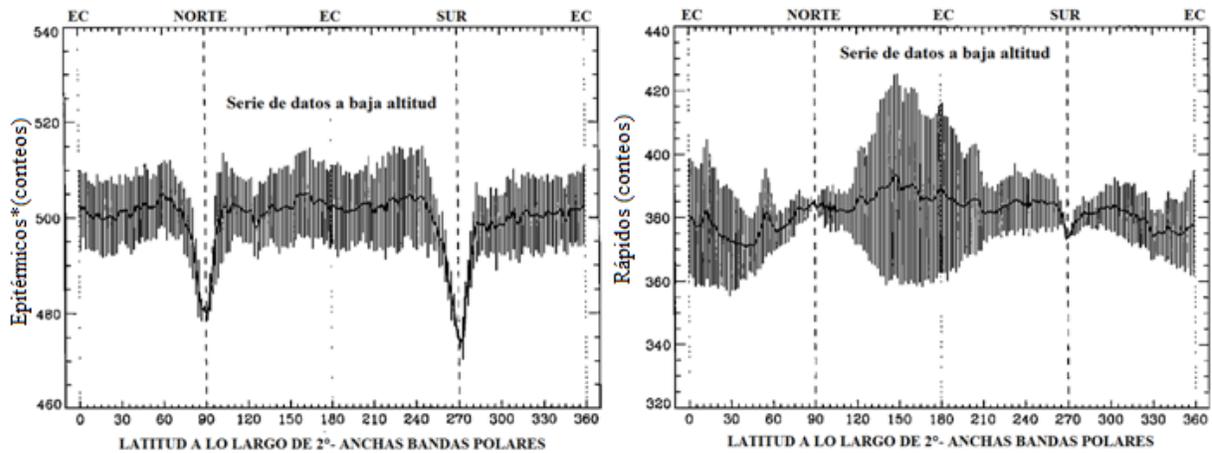
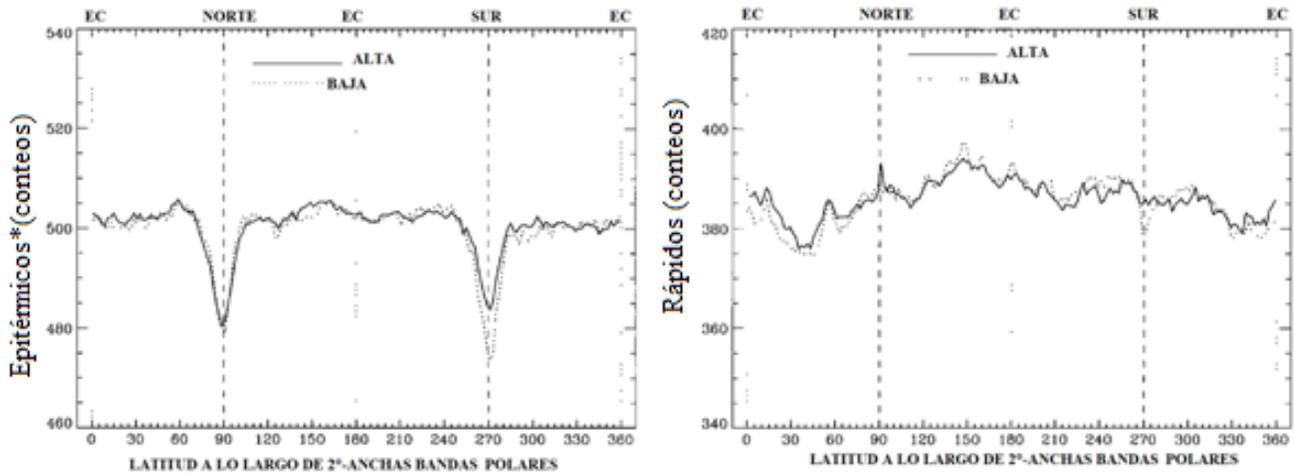


Figura.2.24.- Tasas de conteo de neutrones epitérmicos (derecha) y rápidos(izquierda) tomados a una altitud de 30 ° y promediados sobre 12 bandas de ancho 2° que pasan por los polos. Las líneas verticales representan la desviación estándar de los conteos para las 12 diferentes bandas (Feldman W. et al. 2000).

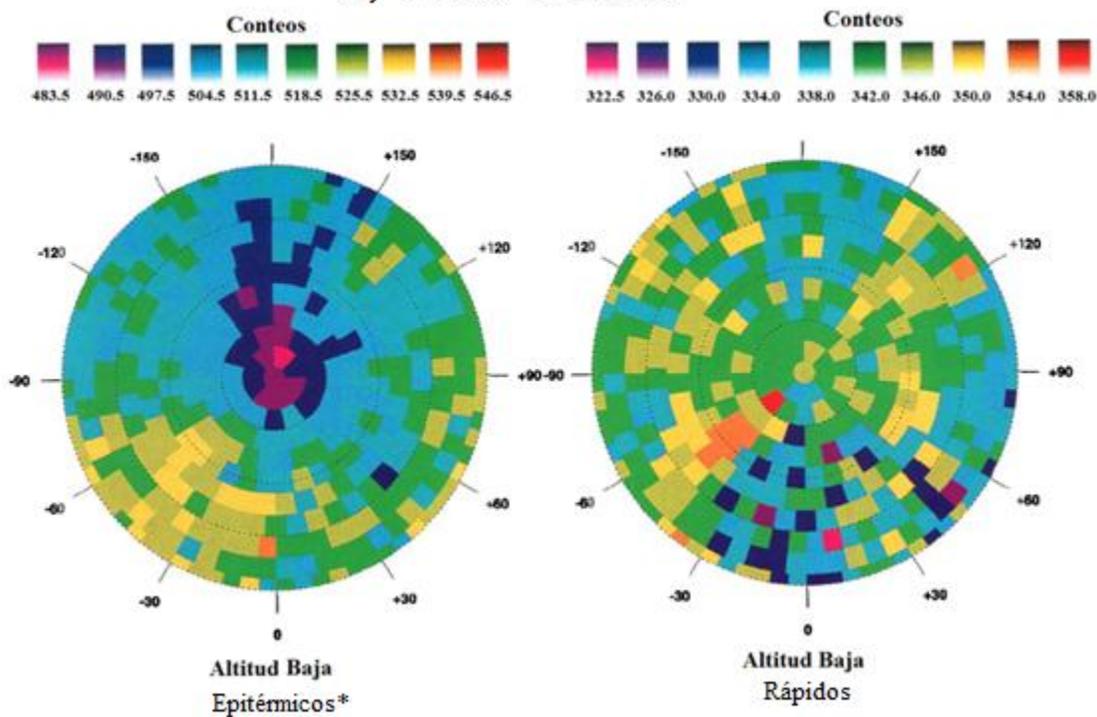


**Figura.3.25.**-Tasas de Conteo de neutrones epitérmicos (derecha) y rápidos (izquierda) a altas ( $100 \pm 20$  Km) y bajas ( $30 \pm 15$  Km) altitudes (Feldman W. et al. 2000).

Mapas de código de colores para las tasas de conteos de neutrones epitérmicos y rápidos muestran que los valores menores en el conteo de neutrones epitérmicos se encuentran sobre tres cráteres colineales en sombra permanente cerca del polo Sur identificados por Margot (1999). Una depresión parecida se encuentra sobre el cráter Cabeus y grandes áreas del polo Sur indicando una abundancia significativa de Hidrógeno en estas zonas (fig.3.26). Las tasas de conteos de neutrones rápidos también tienen valores bajos en la región de los tres cráteres colineales mencionados anteriormente. Es de notar que cuando se tienen valores bajos en los conteos de los neutrones rápidos no suelen haber también valores bajos en los conteos de los neutrones epitérmicos. Esto podría deberse a variaciones en la composición (Feldman et al., 2000).

La tabla 3.10 muestra el porcentaje de decrecimiento en los conteos de neutrones epitérmicos y rápidos a dos diferentes altitudes (30 km y 100 km) calculados para tres regiones en la Luna: el polo Sur y 3 cráteres en sombra permanente. La tabla 3.11 muestra la mejor estimación hecha por Feldman y colaboradores de las abundancias de Hidrógeno cerca de los polos lunares. En la tabla 3.10 es de notar que el porcentaje de agua calculado de sus simulaciones para dos de las regiones consideradas fue de  $1.9 \pm 0.6$  y de  $1.3 \pm 0.5$  y consideran un promedio de  $1.5 \pm 0.8$  % en peso de agua.

### a) POLO NORTE



### b) POLO SUR

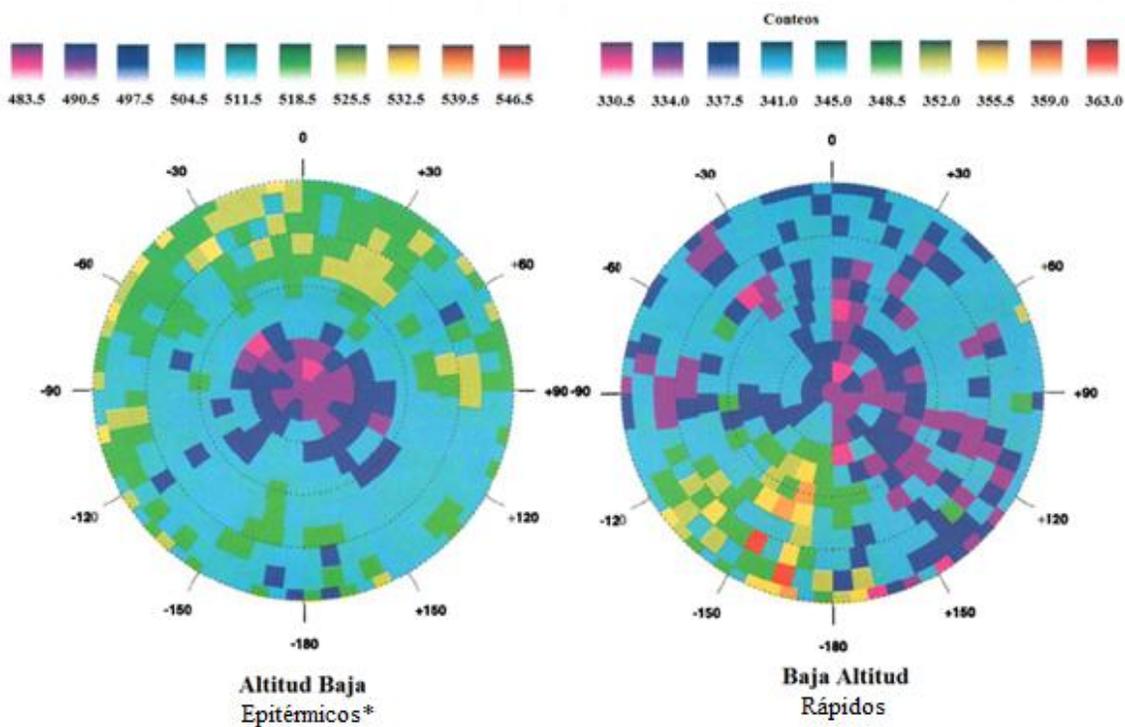


Figura.3.26.-Mapa de código de colores que indica las tasas de conteo de neutrones epitérmicos (izquierda) y rápidos (derecha). (a) Latitudes mayores a 70°, (b) latitudes menores a -70°.

La tabla 3.10 muestra el porcentaje de decrecimiento en los conteos de neutrones epitérmicos y rápidos a dos diferentes altitudes (30 km y 100 km) calculados para tres regiones en la Luna: el polo Sur y 3 cráteres en sombra permanente. La tabla 3.11 muestra la mejor estimación hecha por Feldman y colaboradores de las abundancias de Hidrógeno cerca de los polos lunares. En la tabla 3.10 es de notar que el porcentaje de agua calculado de sus simulaciones para dos de las regiones consideradas fue de  $1.9 \pm 0.6$  y de  $1.3 \pm 0.5$  y consideran un promedio de  $1.5 \pm 0.8$  % en peso de agua.

**Tabla.3.10.**-Parámetros medidos y modelados para el exceso de Hidrógeno cerca de los polos lunares.

### LOCALIZACIÓN (latitud, longitud)

PARAMETROS	(90 °S)	(88.1 °S,45°E)	(84.5°S,38°O)	(88°N,150°E)
Porcentaje de decrecimiento en Epi*,h=30km	4.8	6.1	6.0	5.4
Porcentaje de decrecimiento en Epi*,h=100km	3.3	3.5	3.5	4.2
Porcentaje de decrecimiento en Rápidos, h=30km	2.4	3.0	<1	<1
Porcentaje de decrecimiento en Rápidos, h=100km	<1	<1	<1	<1
Promedio ppm de H(epi*), h=30 km	87	111	109	98
Porcentaje de H <sub>2</sub> O desde las simulaciones ,h=30 km	$1.9 \pm 0.6$	$1.3 \pm 0.5$	.....	1.0

Los depósitos del agua en la Luna pudieron tener su origen en impactos de cometas y meteoroides o bien por acumulación de agua provenientes de las partículas de polvo interplanetario. Se ha estimado que de 10 a  $10^{11}$  toneladas métricas de agua pudieron de esta manera. La estimación proveniente de los datos de neutrones muestra que en la Luna posiblemente hay del orden de  $2.05 \times 10^9$  toneladas métricas de agua por lo que el agua debió haber escapado de la Luna por procesos de transporte a los polos, sublimación, bombardeo de micrometeoritos, irradiación de la línea Lyman  $\alpha$  y por dispersión producida por partículas energéticas (Feldman et al., 2000).

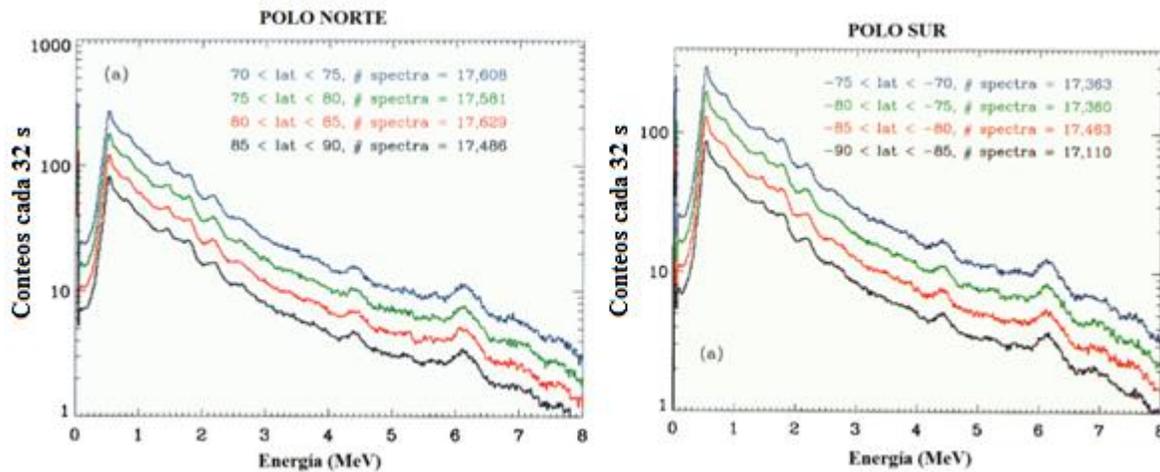
**Tabla.3.7.-**Resumen de las mejores estimaciones de los análisis de abundancia de Hidrogeno cerca de los Polos lunares (Feldman W. et al. 2000).

LOCALIZACIÓN	AREA (km <sup>2</sup> )	CONCENTRACIONES DE MASA (Tonelada métrica = 1x10 <sup>6</sup> g )
Hacia los Polos de -75°	6.47x 10 <sup>5</sup>	1.29x10 <sup>8</sup>
Hacia los Polos de +75°	6.47x 10 <sup>5</sup>	0.99x10 <sup>8</sup>
Sombra permanente hacia los Polos de -87.5°	2250	1.5x10 <sup>7</sup>
Sombra permanente cerca del polo Sur (limite muy superior)	4000	2.67 x10 <sup>7</sup>
Sombra permanente hacia los Polos de +87.5°	1030	6.87x10 <sup>6</sup>
Contenido de realzamientos de H de terreno no en sombra en el Sur	7.35x10 <sup>5</sup>	9.86 x10 <sup>7</sup>
Contenido de realzamientos de H de terreno no en sombra en el Norte	4.15x10 <sup>5</sup>	5.54 x10 <sup>7</sup>
Implantación de H por el viento Solar a 50 ppm, hacia los polos de -75°	6.47x10 <sup>5</sup>	1.29 x10 <sup>8</sup>
Implantación de H por el viento Solar a 50 ppm, hacia los polos de +75°	6.47x10 <sup>5</sup>	1.29x10 <sup>8</sup>
Equivalente de agua en sombra permanente hacia los polos de -87.5°	2250	1.35 x10 <sup>8</sup>
Equivalente de agua en sombra permanente cerca del polo Sur	4000	2.40 x10 <sup>8</sup>
Equivalente de agua en sombra permanente hacia los polos de +87.5°	1030	0.62 x10 <sup>8</sup>

Feldman y colaboradores concluyen que no se obtiene información significativa de la presencia de Hidrógeno a partir de los datos de rayos gamma ni de los conteos de neutrones rápidos; solo se tienen información significativa de los conteos de neutrones epitérmicos. La ecuación (4) predice una abundancia relativa de Hidrógeno en el polo Norte respecto a los valores de las regiones ecuatoriales, de 98 ppm en peso Hidrógeno o una abundancia efectiva de agua de ~880 ppm, por otro lado la ecuación (5) predice una disminución en el porcentaje de la tasa de conteos de neutrones rápidos del 1% cuando se tiene un depósito de agua a una concentración de 880 ppm. Esta última cantidad está en el límite de detección de los conteos por lo que explica porque los neutrones rápidos no son un buen indicador de la presencia de Hidrógeno. Resumiendo, todas las observaciones de neutrones cerca del polo Sur son consistentes con fracciones de masa de agua de

1.5 %  $\pm$  0.8 % contenida en la regolita de los cráteres en sombra permanente y al parecer estos depósitos de agua no pueden estar a mas profundidad de  $\sim 10 \text{ g/cm}^2$ . Todos los datos de neutrones por si solos no pueden discriminar entre Hidrógeno y hielo de agua, pero si pueden apoyar la existencia de depósitos de Hidrógeno.

Los rayos gamma son otra forma de detectar Hidrógeno sobre la superficie lunar. Este captura neutrones térmicos para formar deuterio, en el proceso se emite rayos gamma de 2.22 MeV, por lo que el espectro se verá realzado a esta longitud de onda (fig.3.27). Apartir de los datos del espectrómetro de rayos gamma de Lunar Prospector, Feldman y colaboradores estimaron que el porcentaje en peso de hielo de agua en zonas de sombra permanente podría ser de entre 3.4 y 1.9% en las áreas sombreadas del Sur y de 10.4 % en las áreas sombreadas del Norte. Sin embargo, la señal a 2.22 MeV no mostró un aumento apreciable en ninguno de los dos polos, por lo que su estimación no tiene un significancia estadística (fig.3.27).



**Fig.3.27.**-Espectros de rayos gamma para diferentes latitudes lunares obtenidos desde una altitud  $100 \pm 20 \text{ km}$ . Los espectros se encuentran corridos para evitar su superposición y poder verlos. Nótese que a 2.22 MeV no hay un aumento considerable en la señal.

Como comentario final es importante comentar que los datos de neutrones de Lunar Prospector proporcionana un mejor análisis del contenido de Hidrógeno en la Luna debido a que este elemento puede ser detectado sin importar a que otros elementos está asociado ni su pureza.

### 3.3.2 Magnetómetro (MAG)

Los resultados de este experimento podrían dar información sobre la procedencia del Hidrógeno depositado sobre la superficie lunar. Para este análisis, los autores se concentraron en 6 cráteres de impacto en sombra permanente en el polo sur lunar, por ser éstos considerados como trampas frías (ver tabla 3.8 y fig. 3.28) (Schaler et al., 2007).

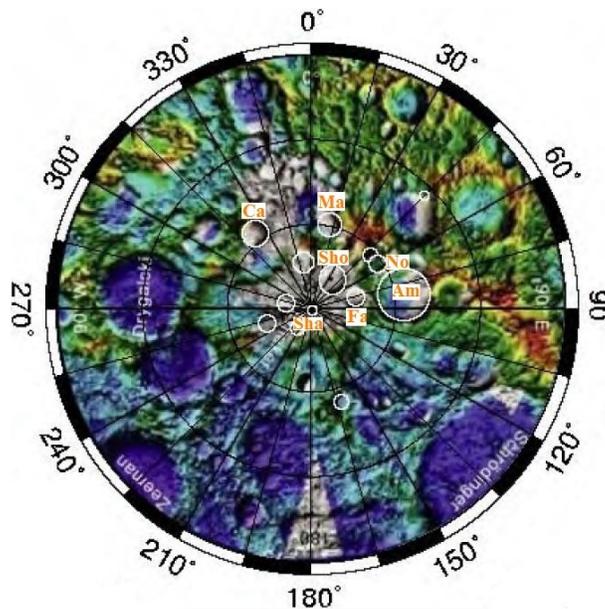
Un problema importante a resolver sobre la presencia de agua en la Luna es su origen. Los campos magnéticos lunares pueden alejar las partículas del viento solar y evitar la implantación de Hidrógeno, de hecho se ha observado una correlación positiva entre la presencia de relativamente grandes abundancias de Hidrógeno y un campo magnético fuerte, lo que sugiere que el Hidrógeno en esas zonas no es Hidrógeno implantado por el viento solar.

Como se sabe, la Luna no posee un campo magnético global por lo que el campo magnético que Schaler y colaboradores midieron fue el campo magnético remanente en las rocas superficiales debido a un antiguo

campo magnético en los periodos tempranos de la historia lunar. Después de quitar las contribuciones de campos magnéticos externos, Schaler y colaboradores obtienen campos magnéticos relativamente fuertes que producen mini-magnetosferas las cuales evitan la implantación de Hidrógeno del viento solar en tiempos de Sol quieto (fig.3.29(a)). Dichas mini-magnetosferas tienen una influencia hasta una altitud de 33 km.

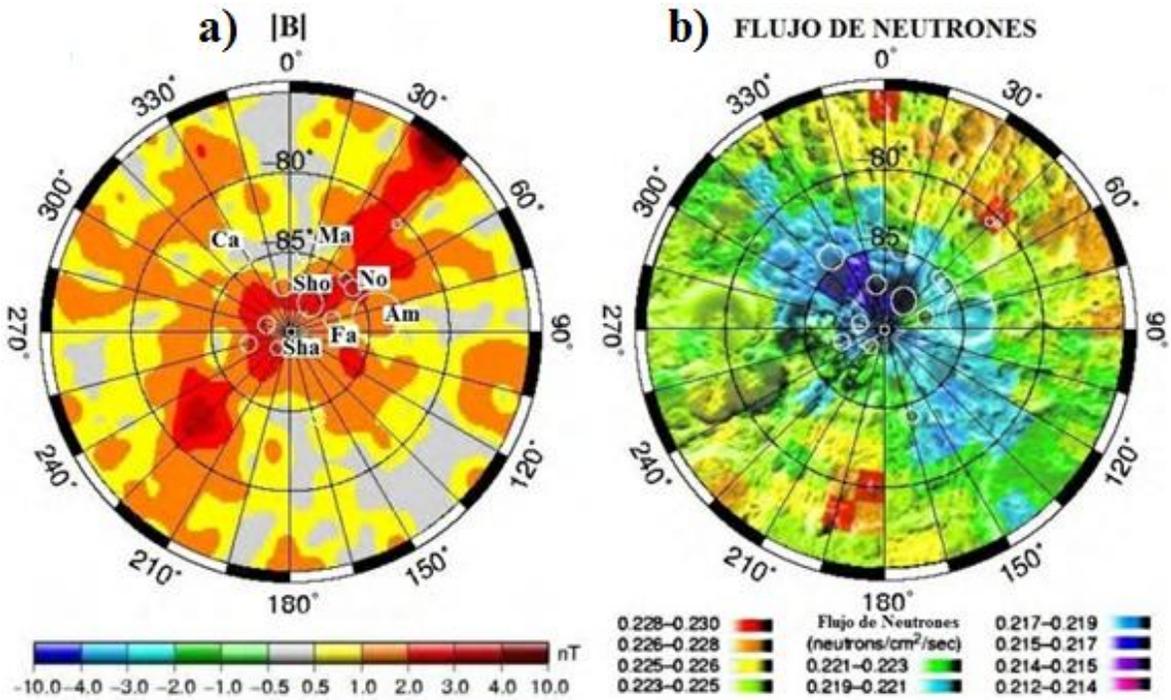
**Tabla.3.8.**-Cráteres en sombra permanente donde se midió el campo magnético remanente.

Nombre del Cráter	Latitud (°)	Longitud (°)
Amundsen	84.3	85.6
Cabeus	84.9	35.5
Faustini	87.3	77.0
Malapert	84.9	12.9
Nobile	85.2	53.5
Shackleton	89.9	0.0
Shoemaker	88.1	44.9



**Figura 3.28.**-Topografía del polo sur lunar de 75° S a 90° S. Los círculos blancos ubican los cráteres en sombra.

La intensidad del campo magnético remanente se comparó con el flujo de neutrones (fig.3.29(b)), encontrándose una fuerte correlación entre ambas variables: regiones de campo magnético intenso estaban relacionadas con regiones de bajo flujo de neutrones. En particular este resultado puede ayudar a refinar la localización de depósitos de hielo de agua en los polos lunares.



**Fig.3.29.-**Mapas de (a) intensidad de campo magnético y (b) flujo de neutrones, para un área de entre 75°S y 90°S.

De los resultados anteriores se puede decir que el Hidrógeno detectado en los cráteres en sombra permanente del polo Sur esta menos contaminado por partículas del viento solar que otras regiones. Los lugares donde una fuerte intensidad de campo magnético coincide con un bajo flujo de neutrones en trampas frías es probable que exista hielo de agua.

### 3.4 CHANDRAYAAN-1

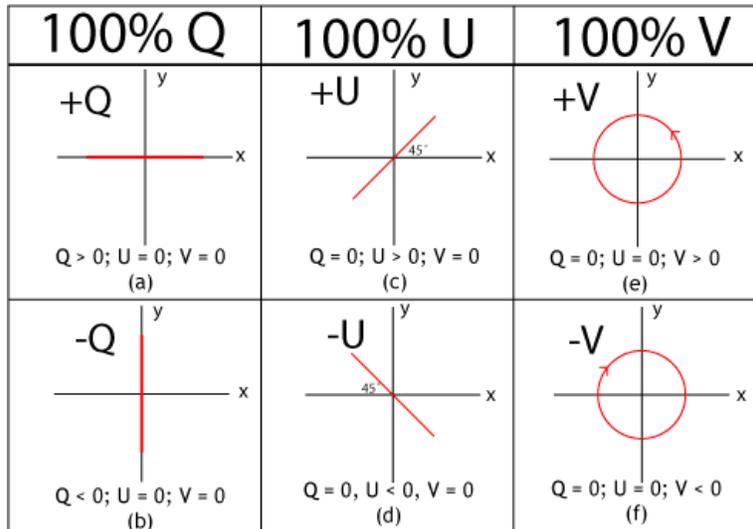
#### 3.4.1 Mini-radar de apertura sintética (Mini-SAR)

La polarización circular también es una propiedad de suma importancia para la detección de agua congelada. Generalmente, se envía a la superficie que se quiere analizar una señal de radar polarizada circularmente y después se reciben las componentes horizontal y vertical de dicha señal. El cociente de polarización circular definido como el cociente de la polarización circular en el mismo sentido de la señal enviada entre la polarización en sentido opuesto ha resultado ser una característica potencialmente útil para detectar hielo de agua. Los depósitos de hielo, normalmente un medio donde no se pierde la señal de radar, exhibe valores altos del cociente de polarización circular, los cuales se han atribuido a dispersión volumétrica provenientes de inhomogeneidades internas (Thomson et al., 2010).

El mini-radar de apertura sintética fue diseñado para detectar depósitos de agua congelada en los cráteres en sombra permanente, cercanos a ambos polos Lunares. Las medidas obtenidas por este radar ayudaron a diferenciar entre agua congelada y silicatos en los cráteres en sombra permanente. El experimento con el mini-SAR se enfocó en una región de entre 80° y 90° de latitud Norte, con el propósito de determinar los cocientes de polarización circular (CPC o  $\mu_c$ ). Para la captura de datos por el Mini-SAR se utilizó una banda-S de frecuencia a  $2.380 \times 10^9$  Hz y longitud de onda de  $12.6 \times 10^{-2}$  m. En este experimento se hizo incidir un haz con polarización circular a  $33.5^\circ$  sobre la superficie objetivo con una resolución de  $\sim 75$  m/pixel y se

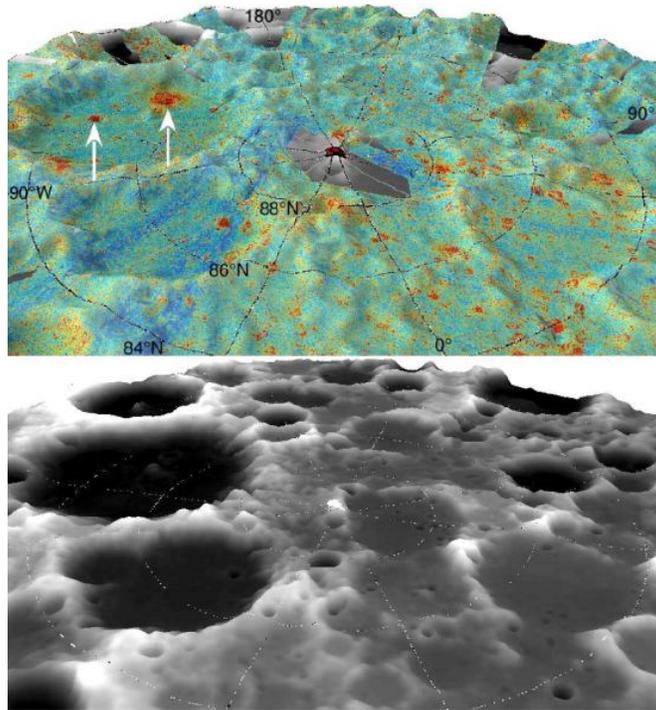
captaron las componentes horizontal y vertical. Para obtener el mapa de RPC se usaron los cuatro parámetros de Stokes para un campo retrodispersivo.

Los parámetros de Stokes (I, Q, U, V) proporcionan una descripción del estado de polarización donde cada parámetro corresponde a la suma o diferencia de intensidades del haz. Esto proporciona información sobre el grado de polarización (no polarización, polarización parcial y completa polarización) de la señal proveniente de la zona analizada (fig.3.30).



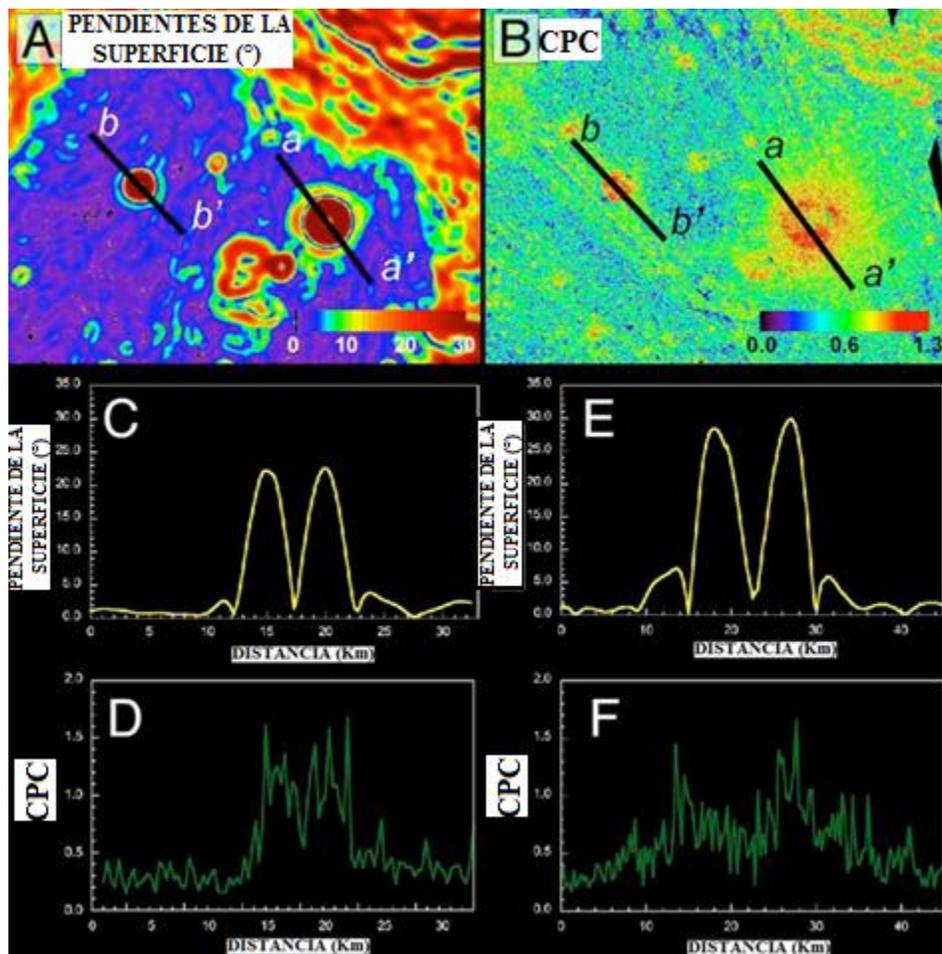
**Figura 3.30.** Parámetros de Stokes para el caso más general (elíptico). La primera columna muestra los parámetros de Stokes para una onda no polarizada. La segunda columna muestra los parámetros para una onda parcialmente polarizada. La tercera columna muestra los parámetros para una onda polarizada.

Con los resultados de los cálculos del cociente de polarización circular se elaboró un mapa donde se aprecian zonas con valores relativamente altos de CPR (zonas anaranjadas y rojizas de la figura 3.31) delimitadas por cráteres pequeños que a su vez están dentro o entre cráteres más grandes, por lo que estas zonas podrían albergar depósitos de agua congelada (Thomson, 2010).



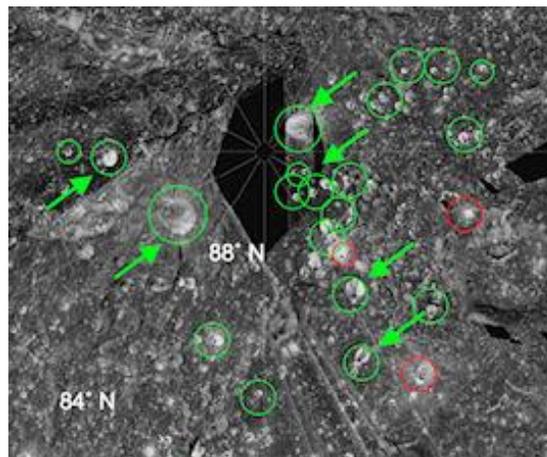
**Figura 3.31.** Perspectiva del mapa de CPC del polo Norte. Los colores rojo y naranja indican valores relativamente altos del cociente de polarización circular. Las flechas blancas indican la posición de los cráteres de la figura 3.32 (Imagen superior). En la imagen inferior se muestra la misma zona que en la imagen superior sólo que en ella únicamente hay información topográfica.

Thomson y colaboradores (2010) notaron que los cráteres donde se detectaban valores relativamente mayores en el cociente de polarización circular podían clasificarse en dos poblaciones: una de cráteres jóvenes caracterizada por tener eyectas e interiores brillantes al radar y otra población de cráteres más degradados. Cada una de estas poblaciones está representada, respectivamente, por los cráteres a través de los que están trazadas las líneas a-a' y b-b' de la figura 3.32. Como la señal de radar puede ser alta debido tanto a la topografía del lugar como a la presencia de agua, después de estudiar ambas poblaciones, los autores llegaron a la conclusión de que los valores altos en el CPC en la población joven se debían a las rocas en su entorno, es decir, al eyecta emplazado, mientras que los valores de CPC en la segunda población eran más atribuibles a la presencia de hielo de agua.



**Figura 3.32.-**Cráteres sobre el piso de Rozhdestvensky (85°N ,175°E). (A)Datos topográficos de las pendientes de la superficie.(B) Mosaico de los valores de CPC del Mini-SAR.(C-D) Perfiles de inclinación (línea amarilla) y de CPC (línea verde) trazados a lo largo de la línea b-b'. (D-F) Perfiles de inclinación (línea amarilla) y de CPC (línea verde) trazados a lo largo de la línea a-a'.

Recientemente se realizó un estudio sobre los datos obtenidos por el Mini-SAR donde se detectaron 40 cráteres en el polo Norte, cada uno de ellos con un diámetro aproximado de entre 2 y 15 km, con indicios de depósitos de agua congelada en su interior. En conjunto, estos cráteres podrían albergar ~ 600 millones de toneladas métricas de agua (fig. 3. 33). (Keeter, 2010).

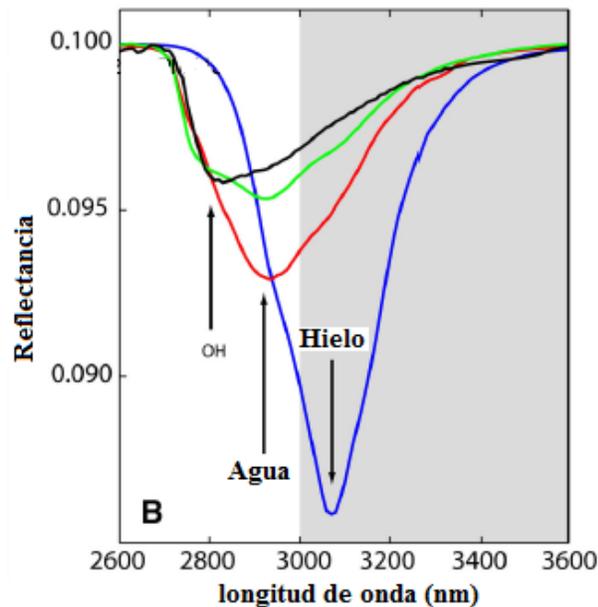


**Figura 3.33.-**Mapa del polo norte donde los círculos de color verde señalan los cráteres que han presentado indicios de agua congelada.

### 3.2.2 Mapeo de la Mineralogía Lunar (M<sup>3</sup>)

Durante la misión de la nave espacial Chandrayaan-1 se utilizó el espectrómetro M<sup>3</sup> (Mapeo de la Mineralogía Lunar) que mapeó la superficie lunar en busca de OH y H<sub>2</sub>O sobre la superficie lunar. El espectrómetro M<sup>3</sup> midió longitudes de onda en el NIR pues éstas proporcionan información valiosa sobre las absorciones debidas al H<sub>2</sub>O y al OH. También se obtuvieron imágenes en longitudes de onda en el visible para la detección de la composición mineralógica de la superficie lunar.

Para analizar el espectro que se obtendría de los datos recolectados por M<sup>3</sup> se elaboró un modelo de reflectancia espectral en el NIR donde se muestran las absorciones características del agua y del hidroxilo (fig.5.2) (Pieters.et al., 2009). El modelo mencionado presenta una fuerte dependencia con el estado físico del agua: capa delgada de agua (línea roja) y hielo (línea azul). Ambos espectros son fácilmente distinguibles de los espectros de la anortita (línea verde) y de vidrio lunar (línea negra). Como se observa en la figura 3.34, tanto el agua líquida como el hielo de agua tienen una fuerte absorción cerca de 3 μm por lo que se suele evaluar la región espectral alrededor de esta longitud de onda para buscar evidencias de agua. La figura 3.35 muestra también la zona de absorción del agua que empieza a 2.7 μm. Curvas de reflectancia obtenidas a distintas latitudes muestran que la característica de absorción a 3 μm se observa a latitudes altas y frías y que desaparece gradualmente hacia latitudes medias, indicando nuevamente que las evidencias de agua se concentran en las regiones polares (fig. 3.36).



**Figura 3.34.** Modelo de reflectancia espectral en el NIR para el H<sub>2</sub>O y el OH para la superficie lunar

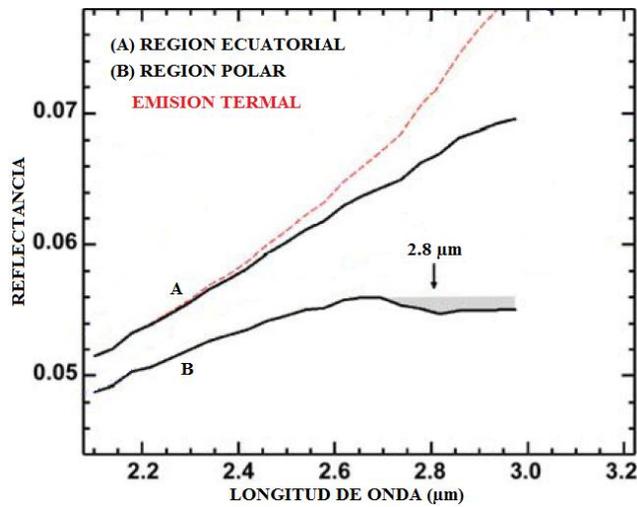


Figura 3.35.-Espectro de la superficie lunar obtenido por M<sup>3</sup>( Clark et al., 2010).

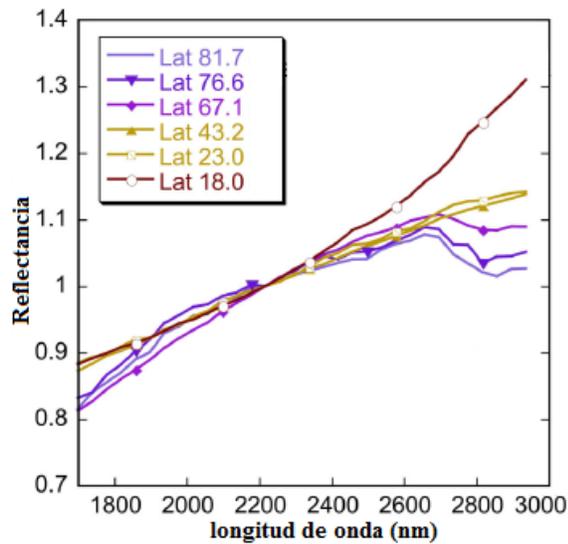
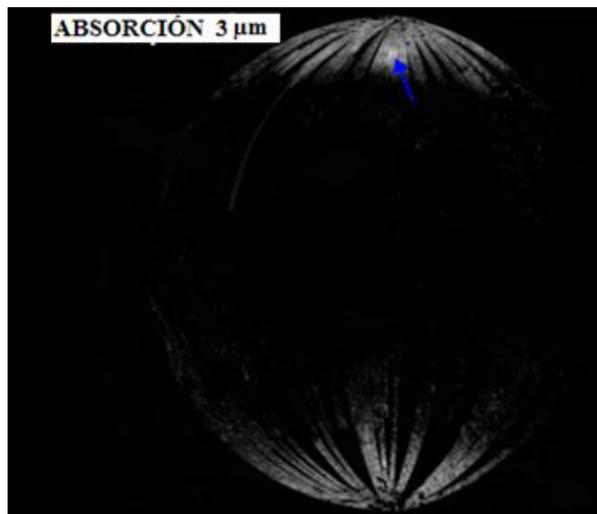


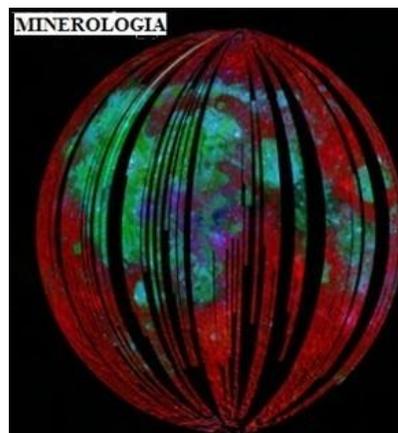
Figura 3.36.Espectros obtenido por M<sup>3</sup>para diferentes latitudes de la superficie lunar

Con los datos obtenidos de M<sup>3</sup>, se elaboró un mapa de la intensidad de absorción a 3  $\mu\text{m}$  (fig. 3.37). En él se puede observar nuevamente, que la absorción a 3  $\mu\text{m}$  es muy notoria en los polos y se desvanece hacia el ecuador. Cerca del Ecuador, donde la temperatura es mayor a 250-300 °K, existe una componente de radiación térmica importante a longitudes de onda mayores a 2000 nm. De hecho, esta componente puede representar hasta el 30 % de la señal recibida a 3  $\mu\text{m}$  y puede ocultar la presencia de características de absorción débiles en las cercanías de esta longitud de onda (Pieters et al., 2009).



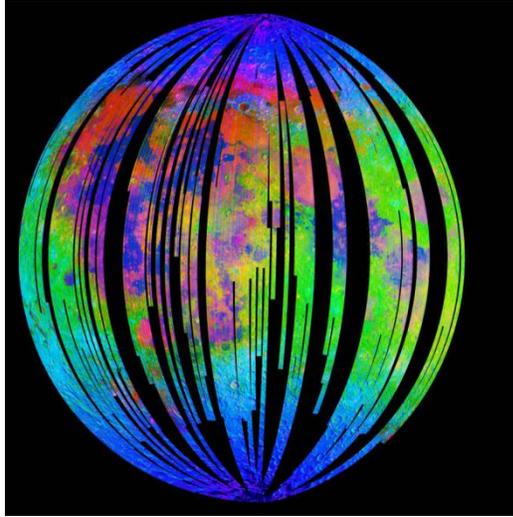
**Figura 3.37.** Las partes brillantes representan lugares donde hay una gran absorción a longitudes de onda de 3  $\mu\text{m}$ . El cráter Goldschmidt, señalado con una flecha azul, es particularmente brillante (Pieters et al., 2009).

Con los datos espectrales obtenidos a longitudes de onda del visible y hasta 2600 nm, se realizó un estudio de los minerales sobre la superficie lunar. Aunque no es posible determinar la mineralogía con precisión, si se pueden mostrar algunas familias minerales. En la figura 3.38, por ejemplo, las zonas rojas representan los feldespatos de las tierras altas los cuales tienen pocos minerales máficos, mientras que los basaltos de los mares tienen coloraciones azules, cian y verdes que indican la presencia y diversidad de minerales máficos (Pieters et al., 2009).



**Figura.3.38.**-Distribución de minerales en la cara visible de la Luna (Pieters et al., 2009).

En 2010, Pieters y colaboradores consiguieron remover la componente térmica que enmascaraba la absorción cerca de 3  $\mu\text{m}$  (fig. 3.39). En el nuevo mapa, lograron ver que el  $\text{H}_2\text{O}$  y el OH se encuentran en un área mayor que la que habían obtenido anteriormente (Pieters et al., 2010).



**Figura 3.39.** Mapa de la mineralogía lunar sin la componente térmica.. Rojo = banda de absorción a 2  $\mu\text{m}$  del piroxeno, Verde= reflectancia aparente a 2.4  $\mu\text{m}$ , Azul = absorción debida a agua e hidroxilo donde la mezcla de colores: azul claro = verde + azul, magenta = azul + rojo, y rosa= azul+verde+rojo también indica una pequeña presencia de agua e hidroxilo. Amarillo y naranja = verde + rojo. Por lo tanto, todos los colores que estén “compuestos” con azul indican la presencia de la absorción debida al agua o al hidroxilo. (Clark et al., 2010)

### 3.5 SATÉLITE LUNAR DE PERCEPCIÓN Y OBSERVACIÓN DEL CRATER (LCROSS)

#### 3.3.1 Espectrómetros NIR y UV/Vis

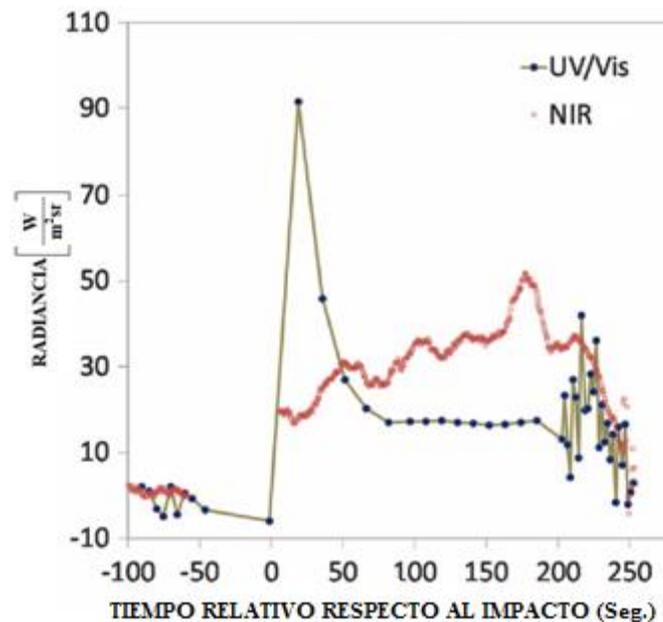
Como se mencionó anteriormente, las evidencias sobre la presencia de agua congelada suelen provenir de cráteres en sombra permanente cerca de los polos; por lo que la misión Lunar Crater Observation and Sensing Satellite (LCROSS) fue diseñada para probar, de manera directa, la presencia de agua en uno de estos cráteres. El 9 de Octubre del 2009 el cohete Centauro, que propulsaba las naves LRO y LCROSS a la Luna, fue impactado dentro de un cráter en sombra permanente poco tiempo después de que se separara de la nave LRO. Para seleccionar el sitio de impacto adecuado a los objetivos de estudio se tomaron una serie de criterios, pero los dos más importantes fueron:

- Que tuviera la altitud adecuada para que la eyecta estuviera iluminada por la luz solar al momento del impacto.
- Que en misiones previas hubiera evidencias de un alto contenido de hidrógeno en la zona.

El mejor sitio de impacto que cumplía con los criterios fue el cráter Cabeus localizado cerca del polo Sur. Ahí, las temperaturas están por debajo de los 50 °K por lo que es considerado una trampa fría que alberga volátiles en su interior (Colaprete et al., 2010).

La idea del experimento del LCROSS, era que al impactar en el cráter Cabeus el agua en la zona se evaporaría. Durante el experimento se analizaron la eyecta de escombros y el vapor en búsqueda de cualquier especie de Hidrógeno, principalmente el asociado al  $\text{H}_2\text{O}$ . Para estos estudios fue utilizado un espectrómetro en el infrarrojo cercano pues, como se ha mencionado anteriormente, en estas longitudes de onda existen líneas de absorción características del agua presentes en el NIR son atribuidas a la presencia de hielo y vapor de agua. También fue utilizado un espectrómetro UV/Vis ya que algunas emisiones en el UV se

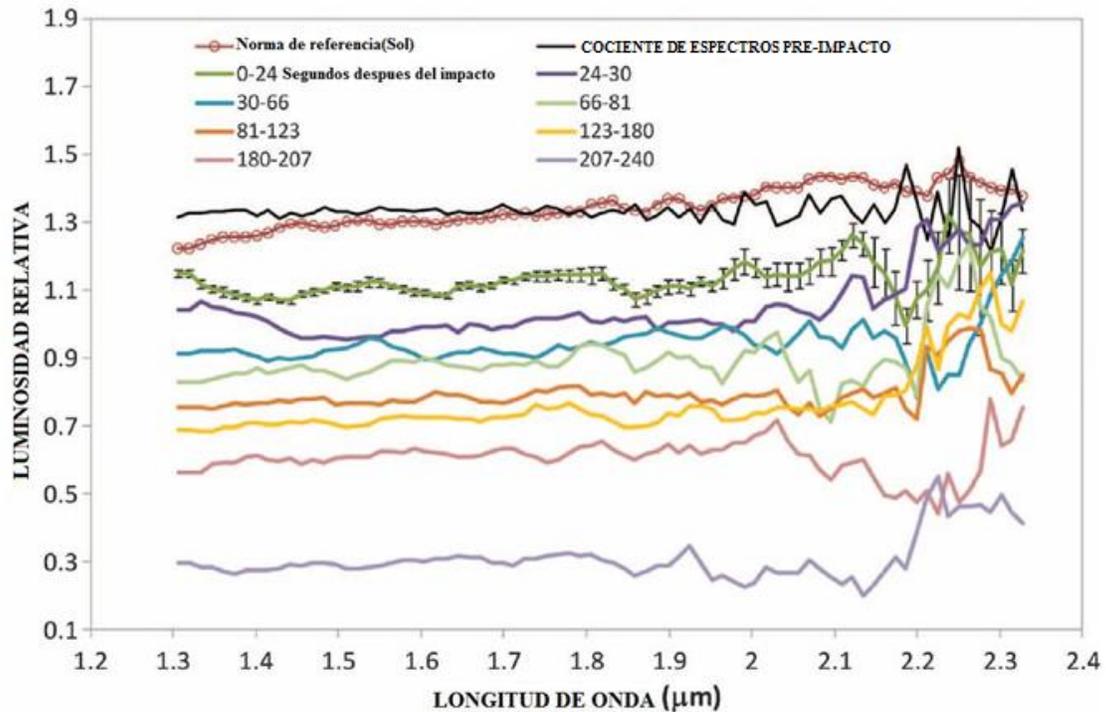
atribuyen a la presencia de Hidroxilo (Colaprete et al., 2010). Inmediatamente después del impacto del cohete Centauro con el cráter Cabeus, se observó una nube de vapor caliente a una temperatura de 1000°K que emergió del interior del cráter seguido por una eyecta con diferentes ángulos de inclinación respecto a la superficie; ambos espectrómetros (UV y NIR) midieron una temperatura de la eyecta entre de ~300 a 1,000 °K. Un segundo después del impacto los escombros de la eyecta alcanzaron la altura suficiente para ser iluminados por la luz solar. Esto permitió obtener un espectro en el NIR donde se observa un pico significativo en la luminosidad que disminuye en forma continua para después presentar otro aumento a los 223 segundos (fig.-3.40). El espectro en UV/Vis presentó un aumento súbito en la radiancia segundos después del impacto, ésta continuó aumentando durante los siguientes 180 segundos para después disminuir. La baja radiancia inicial total en el infrarrojo cercano puede atribuirse a dos factores: primero, la nube de eyecta no dispersa eficientemente la luz infrarroja, lo que implica la existencia de granos más pequeños que unas cuantas micras, y segundo, la existencia de concentraciones altas de polvo capaces de absorber en el NIR. Después del impacto, disminuyó la abundancia de las partículas que absorben en el NIR al mismo tiempo que la nube de vapor se expandía y salía del campo de visión del instrumento (Colaprete, et al., 2010).



**Figura 3.40.**-Radiancia de la nube de eyecta medida por los espectrómetros en el NIR y en el UV/Vis. Para que las curvas se distingan, los valores de la radiancia en el NIR fueron multiplicados por 5.

Primero se verá el comportamiento del espectro obtenido en el NIR para determinar las concentraciones de agua e Hidroxilo encontradas durante el evento de impacto sobre el cráter Cabeus. Para esto, Colaprete y colaboradores (2010) obtuvieron una serie de espectros de reflectancia integrados sobre distintos intervalos de tiempo (fig. 3.41). Cada uno de estos espectros se comparó con un espectro de referencia obtenido 30 minutos antes del impacto. Lo que se observa es que los espectros varían significativamente con el tiempo. Los tiempos de integración fueron seleccionados de acuerdo a los intervalos de tiempo en los cuales la radiancia de la nube de eyecta tiene cambios significativos (periodos de tiempo entre picos y valles en la figura 3.40). Estos periodos de tiempo están regulados probablemente por dos factores: a cambios en el campo de visión del instrumento y a cambios en la morfología de la nube de vapor y de la eyecta (los detritos se mueven hacia

zonas donde son iluminados por la luz solar y los volátiles se siguen sublimando de los granos de eyecta y de



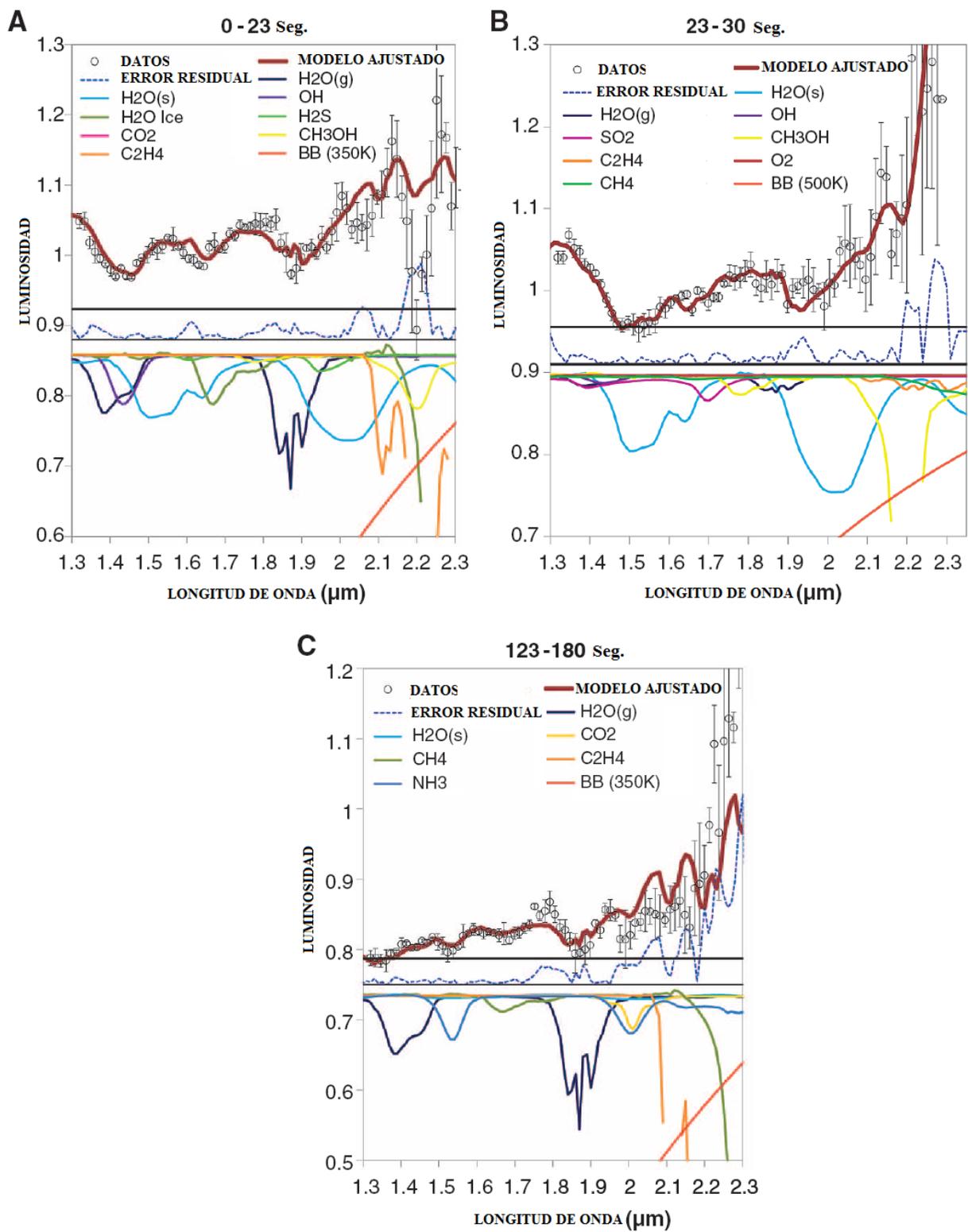
las superficies calientes dentro y alrededor del cráter).

**Figura 3.41.** Espectros de reflectancia en el NIR normalizados respecto a un espectro de referencia formado por el promedio de 180 espectros tomados 30 minutos antes del impacto. La curva etiquetada como “cociente de espectros” es el cociente formado por el promedio de los primeros 90 espectros (de los 180 tomados a los 30 minutos antes del impacto) entre el promedio de los últimos 90 espectros.

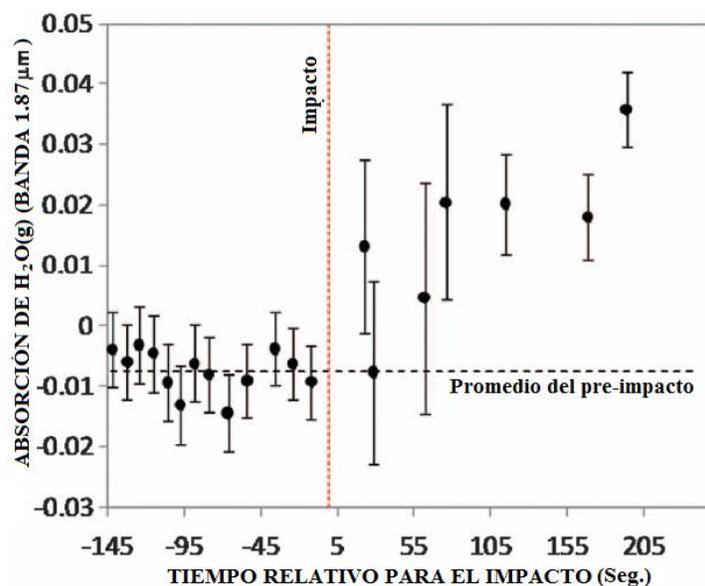
De la figura 3.41 se puede observar que, en los espectros obtenidos entre 0 y 30 segundos, hay una señal clara en el NIR proveniente de la dispersión de la luz solar a longitudes de onda menores a 1.5 µm. Para longitudes de onda mayores, el continuo está compuesto por una combinación de la dispersión débil proveniente de los detritos de la eyecta y la superficie y la emisión proveniente del cráter caliente. En los espectros tomados después de 30 segundos dominan las bandas de absorción del gas (Colaprete, 2010). Para determinar la existencia y abundancias de agua e hidroxilo, Colaprete y colaboradores hicieron un modelo de mezclado lineal (fig. 3.42). La idea es reproducir los datos observados como una combinación lineal de los espectros de compuestos patrón. En la figura 3.42-A hay evidencias claras de la absorción por hidroxilo y agua (en vapor y posiblemente ligada a minerales) asociados a la pluma de vapor inicial. Entre los 23 y los 30 segundos después del impacto la nube de eyecta adquirió su brillo máximo. En este intervalo la gran absorción a 1.5 µm y 2 µm confirman que al menos algo del agua eyectada desde Cabeus estaba en forma de hielo y no sólo formando por los granos de silicatos (fig. 3.42-B). Después de un minuto, la absorción a 1.87 µm indica la presencia de vapor de agua (fig. 3.42-C-). Basados en estos datos, Colaprete y su equipo determinaron que el vapor de agua total captado por el instrumento al tiempo de la observación fue de  $\sim 5.1 (\pm 1.4) \times 10^{19}$  moléculas  $m^{-2}$  o bien de  $53 \pm 3$  kg, mientras que para el hielo de agua encontraron una masa de  $16 \pm 2$  kg.

La información de la figura 3.40 sugiere que después del impacto hubo una liberación de vapor que incluía OH y agua así como pequeñas cantidades de eyecta rico en hielo los cuales pasaron por el campo de visión del instrumento (< 20 s). Después de esto, se observaron granos de hielo de agua que continuaron

sublimándose durante los 4 minutos que duró la observación y posiblemente después, debido a la superficie caliente en y en los alrededores del cráter. Esto se apoya en el aumento consistente en la absorción a  $1.86 \mu\text{m}$ , característica del vapor de agua, después del impacto (fig. 3.43).



**Figura 3.42.**-(A a C) Modelo ajustado para la reflectancia del espectro NIR para tres diferentes periodos de tiempo después del impacto.



**Figura 3.43.**-Aumento temporal de la absorción a 1.87  $\mu\text{m}$ , característica el vapor de agua.

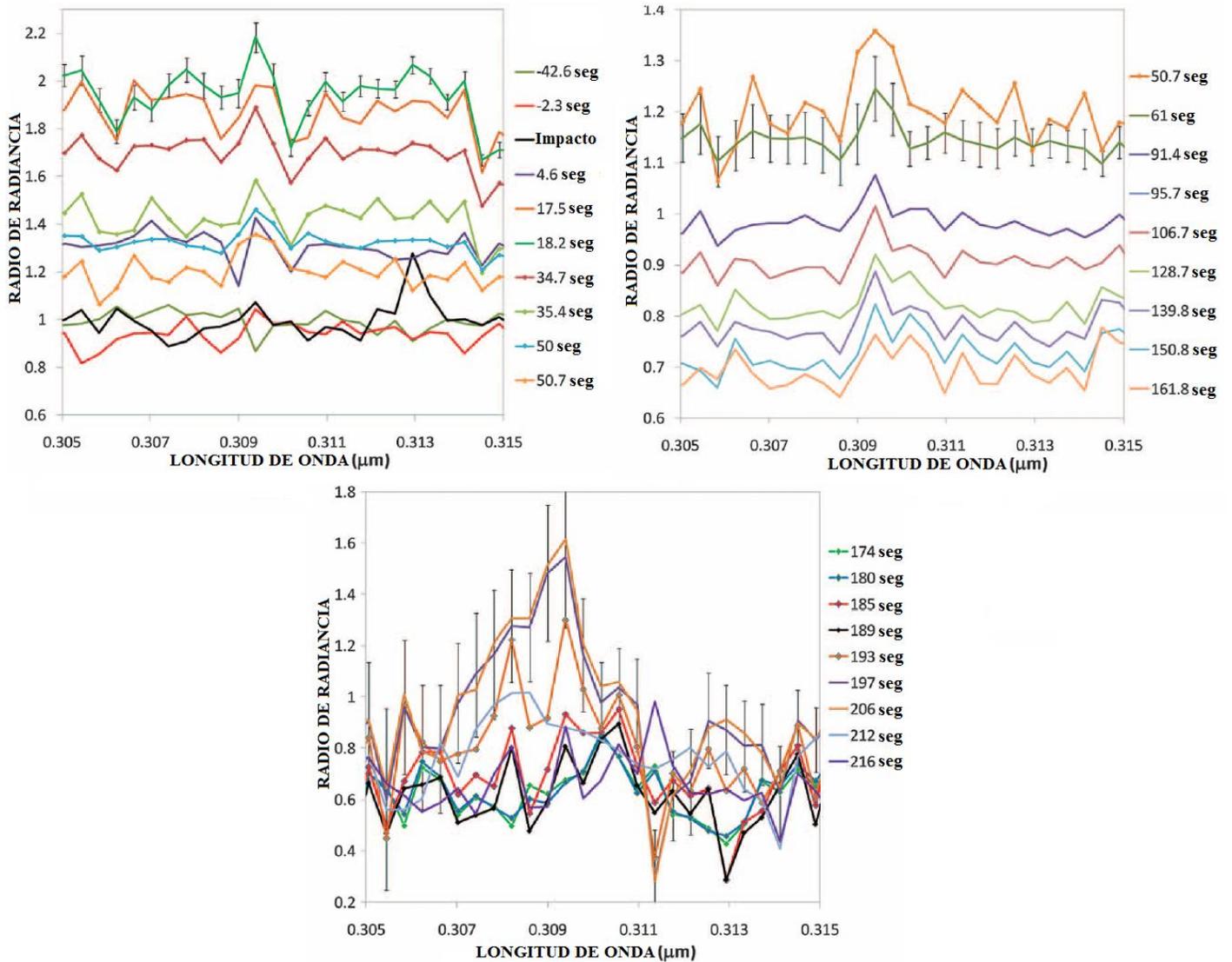
A partir de las características de absorción encontradas en los tres periodos de tiempo mostrados en la figura 3.42 y utilizando un modelo numérico, se calculó la abundancia de agua y polvo (Tabla.-3.5).

**Tabla.3.9.**-Resumen de la cantidad total de vapor de agua, hielo y polvo de eyecta detectadas. Los valores mostrados son valores promedio.

MASA DE AGUA (kg)				
Tiempo(s)	Gas	Hielo	Polvo de masa(kg)	Agua total (%)
0-23	$82.4 \pm 25$	$58.5 \pm 8.2$	$3148 \pm 787$	$4.5 \pm 1.4$
23-30	$24.5 \pm 8.1$	$131 \pm 8.3$	$2434 \pm 609$	$6.4 \pm 1.7$
123-180	$52.5 \pm 2.6$	$15.8 \pm 2.2$	$942.5 \pm 236$	$7.2 \pm 1.9$
Promedio	$53 \pm 15$	$68 \pm 10$	$2175 \pm 544$	$5.6 \pm 2.9$

Otra fuente de evidencia de agua es la emisión asociada al radical Hidroxilo ya que éste puede ser producto de la fotodisociación del vapor de agua o bien puede ser liberado a través de la superficie de los granos (un proceso opuesto a la absorción). El OH emite alrededor de 0.308-0.310  $\mu\text{m}$  por excitación asociada a la fotodisociación o por dispersión fluorescente. Para analizar la emisión alrededor del intervalo anterior, Colaprete y colaboradores calcularon el cociente de las reflectancias obtenidas a distintos tiempos posteriores al impacto entre una reflectancia de referencia obtenida como el promedio de los últimos 4 espectros en el UV/Vis anteriores al impacto. Sus resultados se observan en la figura 3.43, donde se ve que antes del impacto (3 curvas inferiores de la primera gráfica) no hay emisión de OH. La intensidad de la emisión aumenta hasta un máximo alrededor de los 30 s posteriores al impacto. Este escenario es consistente tanto con OH producido por fotodisociación en una nube de vapor de agua en expansión como con fluorescencia de OH liberado durante el impacto

En las figuras 3.40 y 3.43 se observa que la emisión debida al OH presenta un máximo a los 180 s después del impacto, debido probablemente a la fotodisociación del agua. Utilizando la intensidad de la línea de emisión medida a ese tiempo, los autores calcularon el número de moléculas de OH en una columna de  $1 \text{ m}^2$  de base, obteniendo un valor de  $8.0 \times 10^{-3} \text{ W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1} \text{ str}^{-1}$  o  $2.2 \times 10^{16}$  moléculas  $\text{m}^{-2}$  que corresponden a  $23 \pm 11 \text{ kg}$  de vapor de agua. Este valor es consistente con el valor obtenido del análisis de los datos en el cercano infrarrojo.



**Figura 3.43.**-Espectro en UV/Vis para diferentes tiempos antes y después del impacto del cohete Centauro con el cráter Cabeus.

Los resultados observados anteriormente, dan la pauta para pensar en que existe una buena posibilidad de encontrar más depósitos de agua congelada dentro del cráter Cabeus, pues las zonas alrededor del impacto poseen una morfología similar y también se encuentran en sombra permanente. Por otro lado, algunos de los elementos volátiles encontrados en el espectro NIR (fig.-3.42) son abundantes en cuerpos provenientes del

espacio, tales como cometas y micrometeoroides, por lo que éstos podían ser una fuente posible del agua en el cráter Cabeus (Colaprete et al., 2010).

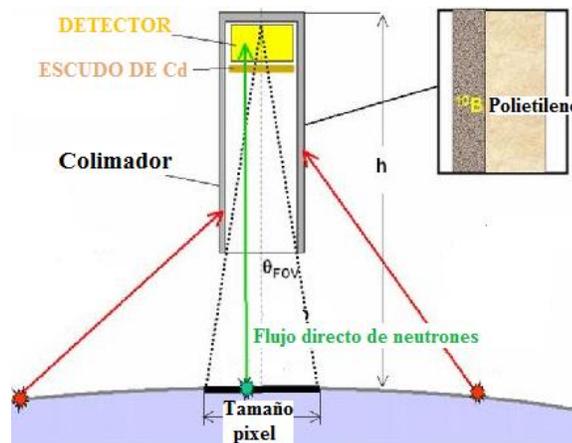
### 3.6 LUNAR RECONNAISSANCE ORBITER (LRO)

#### 3.4.1 Exploración Lunar con el Detector de Neutrones (LEND)

Este experimento fue desarrollado para mejorar las mediciones de concentración de Hidrógeno sobre la superficie lunar realizadas por el Espectrómetro de Neutrones de Lunar Prospector, a partir del cual se obtuvo una estimación de  $1.5 \% \pm 0.8\%$  en peso de  $H_2O$  en las zonas de sombras permanentes en el polo Sur. Esta estimación proporcionó evidencias sobre la existencia de  $H_2O$  en los polos lunares (Pieters et al., 2009).

El experimento de exploración lunar con el detector de neutrones (LEND- Lunar Exploración Neutrón Detector-, por sus siglas en inglés) tuvo como objetivo estimar concentraciones de Hidrógeno en regiones en sombra permanente cerca del polo Sur donde las temperaturas son muy bajas. Cabe mencionar que los datos sobre el flujo de neutrones en el polo Sur recolectados por LEND fueron utilizados para seleccionar el mejor sitio para el impacto del LCROSS sobre la superficie lunar.

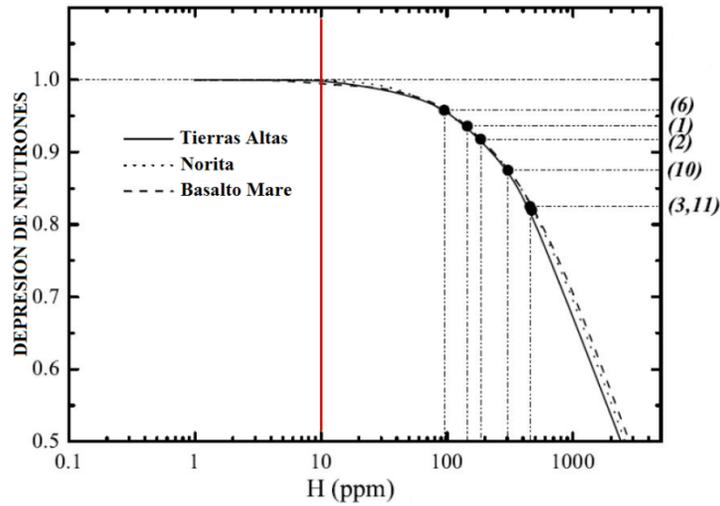
Los detector del LEND está compuesto por un colimador que proporciona un mejor campo de visión (FVO-field of view) que corresponde a una resolución de  $\sim 10$  km a 50 Km de altitud sobre la superficie lunar (fig.3.44). Ese detector monitorea la energía espectral de los neutrones que emiten bajas (térmicos), medias (epitérmicos) y altas (rápidos) energías desde la superficie Lunar. Sin embargo, el conteo de neutrones utilizado por LEND para el análisis de depósitos de Hidrógeno fue el de los epitérmicos ya que en estudios anteriores (Espectrómetro de Neutrones de Lunar Prospector) estos mostraron una mayor sensibilidad a la detección de depósitos de Hidrógeno en el polo Sur (Mitrofanov et al., 2010).



**Figura 3.44-**Detector de neutrones epitérmicos de LEND. El colimador contiene materiales que absorben los neutrones: el  $^{10}B$  y el polietileno discriminan las emisiones de la superficie que provienen de regiones más allá del campo de visión.

Para asociar los conteos de neutrones epitérmicos con abundancia de Hidrógeno, se realizó una normalización respecto a los conteos provenientes de sitios con contenidos de Hidrógeno conocidos. De acuerdo con los datos obtenidos por Lunar Prospector, las concentraciones mínimas de Hidrógeno en toda la superficie lunar están entre 10 y 50 ppm. Valores similares se obtienen del análisis del suelo lunar traído a la Tierra por los astronautas de la misión Apollo. Dicho lo anterior, Mitrofanov y colaboradores (2010) tomaron como valor de referencia para la regolita lunar una abundancia de 10 ppm y definieron la variable adimensional “ $\xi$ ” (suppression en inglés) y que aquí llamaremos “disminución” como  $\xi = -\Delta r / r_0$ , donde  $\Delta r$  es la diferencia de los conteos de neutrones entre la región patrón localizada en una banda de latitud entre  $60^\circ$  y  $70^\circ$  Sur y la

región de interés,  $r_0=1.9$  conteos por segundo (cps). Las regiones analizadas se centraron en cráteres del polo Sur, en particular en el cráter Cabeus pues el piso de este cráter se encuentra en sombra permanente y por tanto había una buena posibilidad de encontrar hielo de agua (Tabla.-3.10).



**Figura 3.45.**-Simulación numérica de la disminución de neutrones epitérmicos para tres diferentes composiciones de regolita (tierras altas, basaltos de los mares y norita) asociada a la cantidad de Hidrógeno. Los valores entre paréntesis 1,2,3 y 6 corresponden a posibles lugares de impacto de LCROSS. 10 y 11 corresponden a la región de disminución de neutrones del cráter Cabeus.

**Tabla.3.10.**-Cráteres estudiados del Polo Sur junto con regiones específicas del cráter Cabeus (Región en Sombra Permanente= **RSP** y Región de Disminución de Neutrones =**RDN**).

NOMBRE DE LA REGIÓN	AREA (Km <sup>2</sup> )	(LATITUD, LONGITUD)
1.-RSP Faustini	635	(-87.2,89)
2.-RSP Shoemaker	1048	(-88.5,50)
3.-RSP Cabeus	243	(-85.6,308.9)
4.-RSP Cabeus B1	342	(-81.9,305.3)
5.-RSP Cabeus -2	121	(-83.9,338.9)
6.-RSP Haworth	973	(-87.4,355)
7.-RSP Malapert F1	264	(-82.3,12)
8.-RSP Malapert-2	77	(-84.3,1)
9.-RSP Cabeus	59	(-84.54,316.99)
10.-RDN para Cabeus	718	
11.-Parte central de RDN para Cabeus	76	

**Tabla.-3.11.** Resultados obtenidos de la detección de neutrones sobre las regiones en sombra permanente donde el parámetro  $\xi$  detectar las zonas con una disminución en el conteo de neutrones.

<b>REGIONES EN SOMBRA PERMANENTE</b>	<b>CONTEOS POR SEGUNDO (cps)</b>	<b>PARAMETRO DE DISMINUCIÓN (<math>\xi = 1 - \Delta r/r_0</math>)</b>
1.- (SP_A)	4.974	0.936±0.027
2.- (SP_B)	4.940	0.918±0.011
3.- (SP_C)	4.765	0.825±0.047
4.- (SP_CB)	5.080	No significativo
5.- (SP_CC)	5.001	No significativo
6.- (SP-D)	5.016	0.958±0.014
7.- (SP_F)	5.044	No significativo
8.- (SP_G)	5.386	No significativo
9.- (SP_CA)	5.007	No significativo
10.-RDN para Cabeus	4.862	0.875±0.023
11.-Parte central de RDN para Cabeus	4.758	0.82±0.07

Los resultados de Mitrofanov y colaboradores (2010) muestran que no de todos los cráteres en sombra permanente (4, 5, 7, 8 y 9) se detecta una disminución apreciable del conteo de neutrones (ver tabla 3.11).

Utilizando datos recabados por el LEND del 30 de Junio al 20 de Noviembre de 2009, McClanahan y colaboradores hicieron un mapa de conteos de neutrones epitérmicos del polo Sur lunar (fig. 46). En este mapa podemos observar que existe una disminución apreciable en el conteo de neutrones, por tanto una mayor concentración de Hidrógeno, en la región de sombra permanente donde se encuentra el cráter Cabeus. En la figura 3.47 se muestra el detalle de esta zona, donde las líneas rojas representan la zona donde se realizaron los conteos de neutrones epitérmicos en el cráter Cabeus y que presentaron una mayor disminución en el conteo de neutrones que en otras zonas. McClanahan y su equipo también elaboraron un mapa de temperaturas en este cráter basados en los datos del experimento de radiometría lunar (fig. 3.48), en él se nota que las menores temperaturas se obtienen de regiones donde los conteos de neutrones son también bajos.

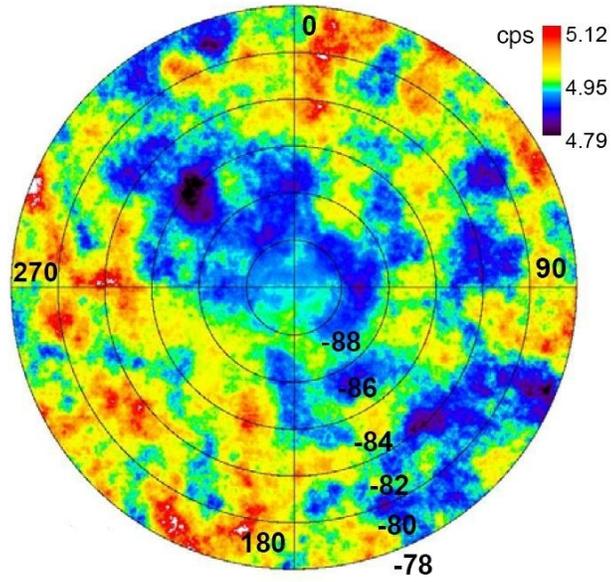


Figura 3.46.- Mapa de conteo de neutrones (McClanahan et al., 2010).

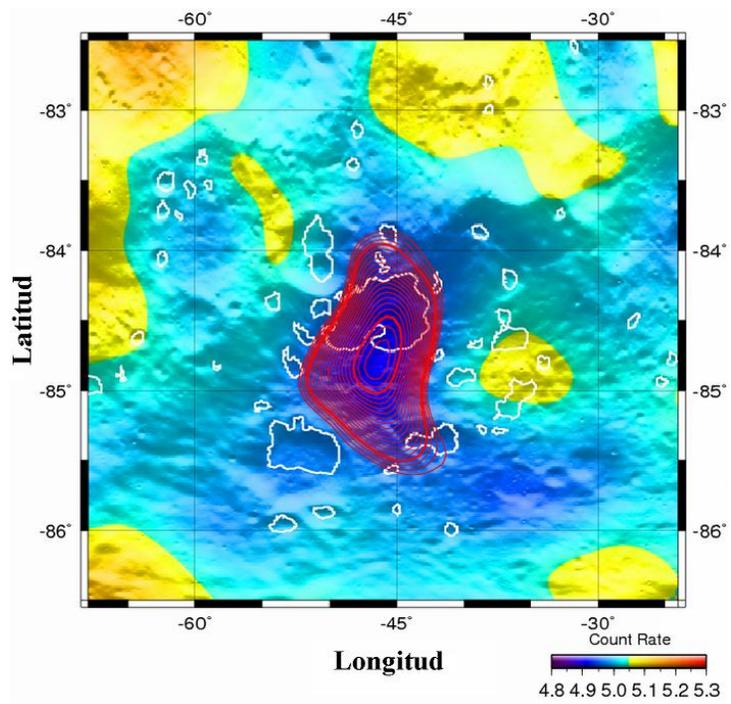
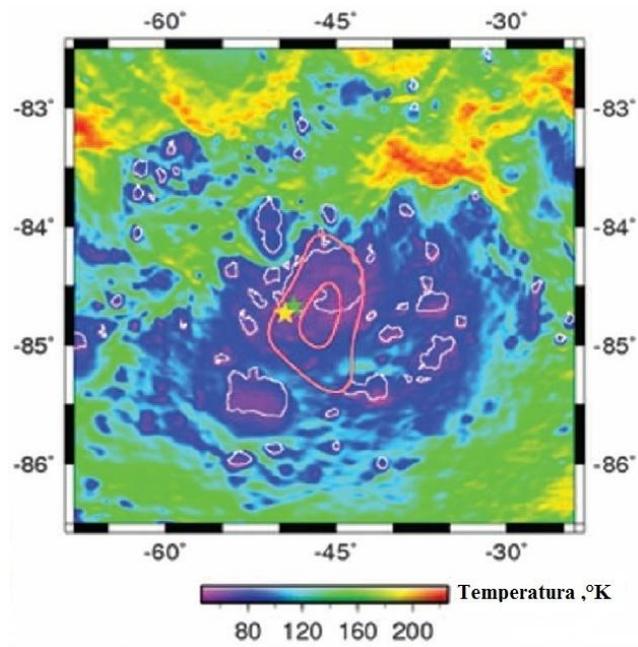


Figura 3.47.-Disminución del conteo de neutrones epitérmicos en el cráter Cabeus.



**Figura 3.48.**-Mapa elaborado en base a los datos del radiómetro bordo del LRO. Las estrellas verde y amarilla representan los sitios de impacto del LCROSS.

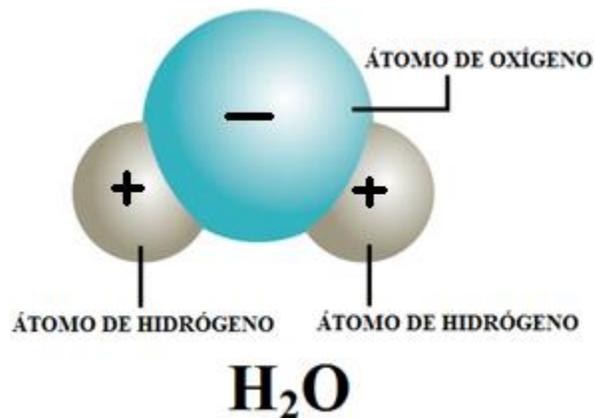
# CAPITULO 4

## TIEMPO DE PERMANENCIA DE AGUA EN LA LUNA

### 4.1 Agua sobre la superficie lunar

Los primeros elementos formados después de la gran explosión fueron los elementos ligeros hidrógeno y helio, además de cantidades menores de litio y berilio. En el Universo, el hidrógeno tiene una abundancia del 90%, el helio de 8 % y el resto de los elementos constituyen el 2% restante. En particular, el Hidrógeno y el Helio son muy abundantes en el Sol y en otras estrellas.

El átomo de Hidrógeno (**H**) está formado por un solo protón en su núcleo en torno al cual gira un electrón. Al combinarse con otros elementos forma moléculas. Si dos átomos de Hidrógeno se mezclan con uno de oxígeno la reacción produce la molécula de agua ( $H_2O$ ) (fig.4.1). Al agua la podemos encontrar en tres fases diferentes: líquida, sólida (hielo) y gaseosa (vapor) dependiendo de la presión y temperatura a la que sea sometida.



**Figura 4.1.-** Esquema de la molécula de agua.

El Helio es un gas noble, tiene en su núcleo dos protones y su única capa electrónica se encuentra saturada con dos electrones razón por la cual no se combina con otros elementos ni consigo mismo por lo que es uno de los llamados gases inertes.

Los 10 elementos más abundantes en el Universo (tabla 4.1) son ordenados en base al elemento más abundante (Hidrógeno).

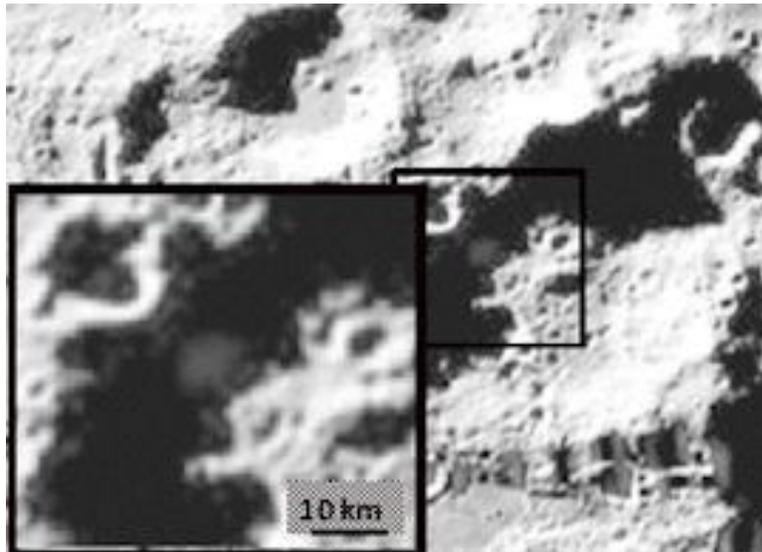
El Hidrógeno es un gas muy ligero y se escapa con facilidad de cuerpos sin atmósfera, por tanto se puede detecta Hidrógeno, sobre alguna superficie planetaria sin atmósfera solo si éste está formando compuestos con otros elementos. El tercer elemento más abundante en el Universo es el oxígeno (tabla.4.1) por eso hay una gran probabilidad de que éste se combine con el Hidrogeno para formar moléculas de agua. De acuerdo a los análisis realizados por la misiones espaciales sobre la existencia de agua sobre la superficie lunar se ha encontrado que hay una gran posibilidad de encontrarla en un estado sólido (hielo) (Helbert et al., 2009).

**Tabla4.1.**-Elementos más abundantes en el Universo (<http://www.lenntech.es/tabla-peiodica/abundancia.htm>).

#	Elemento	Numero atómico	Numero de átomos del elemento relativo al hidrógeno
1	Hidrógeno	1	1
2	Helio	2	$8.5 \times 10^{-2}$
3	Oxígeno	8	$4.6 \times 10^{-4}$
4	Carbono	6	$2.5 \times 10^{-4}$
5	Neón	10	$6.9 \times 10^{-4}$
6	Nitrógeno	7	$6.0 \times 10^{-5}$
7	Magnesio	12	$3.4 \times 10^{-5}$
8	Silicio	14	$3.2 \times 10^{-5}$
9	Hierro	26	$2.8 \times 10^{-5}$
10	Aluminio	13	$2.3 \times 10^{-6}$

Hasta hace poco Marte jugó un papel destacado en la búsqueda de agua en otros cuerpos planetarios ya que era el único planeta donde se había encontrado una clara evidencia de que había corrido agua líquida sobre su superficie. Pero hoy en día, y tras las observaciones hechas por distintas misiones espaciales en distintos cuerpos de nuestro sistema solar, se ha comprobado que no es el único cuerpo planetario con rastros de agua en su superficie. La Luna es uno de esos cuerpos que se pensaba que no tenían agua, pero en los últimos años se han encontrado evidencias sobre la existencia de cantidades significativas de agua en ambos polos lunares (Helbert et al., 2009).

Como se mencionó en el capítulo anterior, los datos obtenidos por LCROSS provienen principalmente del cráter Cabeus que es un cráter en sombra permanente cerca del polo Sur lunar. Al ser bombardeado por el cohete Centauro, se observó una fumarola de vapor de agua proveniente del cráter, evidencia de la existencia de depósitos de agua congelada en su interior (fig.4.2). Colaprete investigador de la misión LCROSS piensa que el cráter posee dos capas distintas de suelo que contienen agua y otros compuestos ([http://ciencia.nasa.gov/headlines/y2009/13nov\\_lcrossresults](http://ciencia.nasa.gov/headlines/y2009/13nov_lcrossresults)). La primera capa contiene agua y oxidrilo (OH) enlazados con otros minerales de la eyecta del cráter que fueron observados después del impacto. La segunda capa contiene mucho más agua congelada y otros compuestos que incluyen bióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), metanol (CH<sub>3</sub>OH) y la molécula orgánica diacetileno (H<sub>2</sub>C<sub>4</sub>). Esta capa tiene una profundidad de 0.5 metros y probablemente es más antigua que el agua congelada que se encuentra sobre la superficie (fig.4.3).



**Figura 4.2.-** Columna de vapor rico en agua que se levanta desde el cráter Cabeus luego del impacto del cohete Centauro sobre el piso del cráter. Este experimento se llevó a cabo el 9 de octubre de 2009.



**Figura 4.3-** En color azul falso se muestra una delgada capa de minerales ricos en agua (Chandrayaan-1/Topógrafo de Mineralogía Lunar).

Después de los análisis en el cráter Cabeus el equipo del M<sup>3</sup> analizó las zonas iluminadas de la Luna encontrando también moléculas de agua y oxidrilo en diversas áreas de la superficie, aunque los rastros de agua son más evidentes latitudes altas de la Luna. Las regiones de la Luna que se encuentran permanentemente en sombras, son trampas frías que conservan y reúnen materiales a través de miles de millones de años (Colaprete, 2009).

Hoy en día no se ha demostrado del todo el origen de los depósitos de agua congelada dentro de los cráteres en sombra permanente cerca de los polos lunares. Las fuentes más probables son cometas y la actividad magmática lunar.

#### 4.1.2 Estabilidad del agua y del hielo en superficies planetarias

El diagrama de la figura 4.4 muestra las distintas fases del agua dependiendo de la temperatura y de la presión a las que esté sometida. Si la molécula de agua tiene una presión y una temperatura dada, ésta presentara una única fase (sólida, líquida o gaseosa) excepto en las siguientes zonas:

- Punto triple: Los estados sólido, líquido y gaseoso coexisten.
- Punto crítico: Densidad del líquido y del vapor son iguales.
- Los pares de presión y temperatura que corresponden a una transición de fase entre:
  - \* Dos fases sólidas: Cambio en la estructura.
  - \* Entre una fase sólida y una fase líquida: fusión – solidificación.
  - \* Entre una fase sólida y una fase vapor (gas): sublimación - deposición (o sublimación inversa)
  - \* Entre una fase líquida y una fase vapor: vaporización - condensación (o licuefacción).

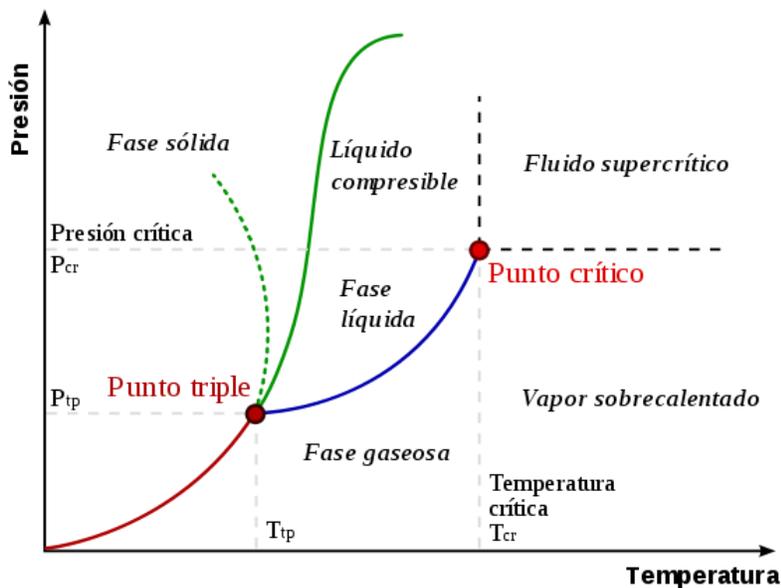
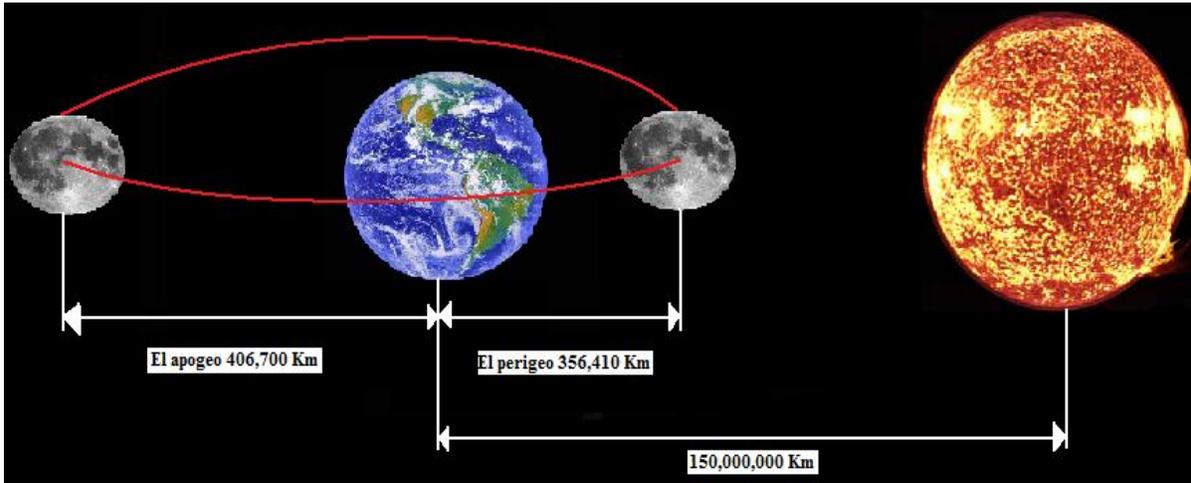


Figura 4.4- Diagrama de fases del agua.

De acuerdo al diagrama de fases, en general el agua líquida podría existir sobre o debajo de una superficie planetaria si la presión y la temperatura están entre el punto de fusión (sólido-líquido) del hielo y el punto de ebullición del agua líquida (líquido-gas). Hasta el momento, el único planeta en el que se sabe con certeza que existe agua líquida es la Tierra, en la Luna y otros planetas del Sistema Solar el agua se ha encontrado en el estado sólido (hielo). En nuestro Sistema Solar es importante la distancia a la que se encuentren los planetas del Sol ya que es una condición para que exista agua líquida sobre una superficie planetaria (Helbert et al., 2009). En el análisis siguiente consideramos que las temperaturas extremas de la Luna son de 100 °K durante la noche y 400 °K durante el día.

Se estima que en nuestro Sistema Solar la distancia al Sol a la cual el agua puede ser estable en estado líquido está entre 0.95 y 1.37 UA .La Luna se encuentra dentro de este intervalo de distancias pero debido a que es un cuerpo sin atmósfera, el agua solo puede ser estable en una fase sólida (hielo) dentro de las regiones de sombras permanentes pues solo ahí la temperatura es lo suficientemente baja y constante como para permitir que el agua permanezca estable.



**Figura 4.5.-** Distancias de la Tierra a la Luna (apogeo, perigeo) y distancia de la Tierra al Sol.

Considerando que la Luna es un cuerpo sin atmósfera la estabilidad del hielo está determinada por la sublimación. La ecuación estándar para la sublimación del hielo o agua en el vacío está dada por:

$$S = P_{\text{sat},i}(T) \left[ \frac{M_w}{2\pi RT} \right]^{1/2} \quad 1$$

donde S es el flujo de masa ( Kg m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>) y P<sub>SAT</sub> es la presión de saturación en hPa para una superficie con hielo a temperatura T en ° K . M<sub>w</sub> es el peso molecular del agua y R es la constante universal de los gases (Helbert et al., 2009).

Podemos observar que la ecuación de sublimación tiene una dependencia con la temperatura. Si se toman temperaturas bajas, la presión de saturación será menor, por lo que el agua o hielo no se sublimarán tan rápido conservándolos por más tiempo sobre o debajo de la superficie lunar, por ese motivo es más probable encontrar agua en cráteres en sombras permanentes.

La ecuación para la presión de saturación fue obtenida empíricamente y es aplicable a planetas con y sin atmósfera (Helbert et al., 2009). Esta ecuación es válida para temperaturas entre 110 °K y 273 °K :

$$P_{SAT} = 0.01 \exp \left( 9.550426 - \frac{5723.265}{T} + 3.3068 \ln T - 0.00728332 \right) \quad 2$$

Aplicando la ecuación (2) a la Luna, dentro del intervalo de validez en temperaturas, se tiene que :

$$P_{SAT}(273)=12.46 \text{ hPa} \quad P_{SAT}(110)= 1.98 \times 10^{-14} \text{ hPa}$$

Dadas las presiones anteriores la sublimación para las mismas temperaturas está dada por la ec. (1) :

$$S_{(110)} = 4.51 \times 10^{-29} \frac{\text{Kg}}{\text{m}^2 \text{s}}$$

$$S_{(273)} = 1.80 \times 10^{-14} \frac{\text{Kg}}{\text{m}^2 \text{s}}$$

considerando

$$M_w = 2.99 \times 10^{-26} \text{ Kg} \quad R = 8.31 \frac{\text{Pa m}^3}{\text{mol K}}$$

La temperatura y la presión del lugar donde se encuentre la molécula de agua son muy importantes ya que eso nos garantiza su estabilidad. En los párrafos siguientes evaluaremos la posibilidad de que el agua se encuentre en estado sólido sobre la superficie de la Luna dentro de los cráteres de impacto con fondos en sombra permanente, para esto vamos a calcular el tiempo que tardaría cierto reservorio de agua en un cráter en sublimarse.

Lo que se quiere es determinar el cambio de masa con el tiempo, debido a la sublimación. De la definición de densidad se tiene que:

$$m = \rho v \quad 3$$

entonces

$$\frac{dm}{dt} = \rho \frac{dv}{dt} \quad 4$$

Por otro lado el flujo de masa va estar dado por:

$$S = \frac{1}{A} \frac{dm}{dt} \quad 5$$

Donde A es el área a través de la cual se lleva a cabo la sublimación (área de contacto entre la capa de hielo y el espacio sobre la superficie lunar). Sustituyendo la ecuación (4) en (5) tenemos:

$$S = \frac{\rho}{A} \frac{dv}{dt} \quad 6$$

si  $v = Ah$

$$\frac{dv}{dt} = A \frac{dh}{dt} + h \frac{dA}{dt}$$

si consideramos un cilindro, el área de exposición del reservorio del hielo con el espacio es :

$$S = \rho \frac{dh}{dt} \quad 7$$

Integrando se obtiene el tiempo en que se sublima el agua congelada:

$$t = \rho \frac{h}{S} \quad 8$$

donde  $\rho = 1 \times 10^3 \frac{Kg}{m^3}$  y  $h$  es el espesor de la capa de hielo.

Usando el resultado  $S_{(110)}$  con  $h = 1m, 5m$  y  $10m$  obtenemos:

$$t (h = 1m) = 2.44 \times 10^{20} \text{ años}$$

$$t (h = 5m) = 1.22 \times 10^{21} \text{ años}$$

$$t (h = 10m) = 2.44 \times 10^{21} \text{ años}$$

Para  $S_{(273)}$  tenemos:

$$t (h=1m) = 2.46 \times 10^5 \text{ años}$$

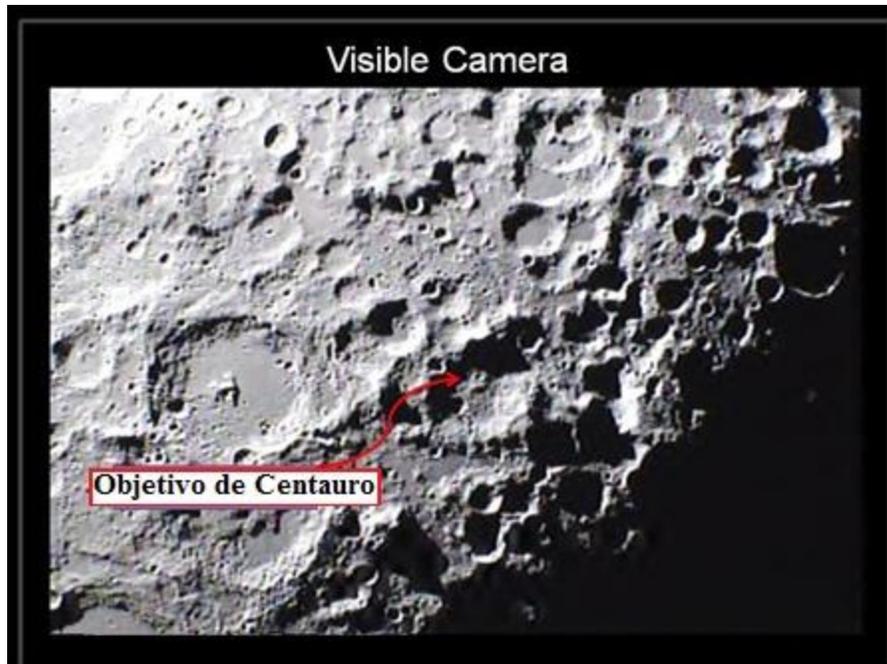
$$t (h=5m) = 1.23 \times 10^6 \text{ años}$$

$$t (h=10m) = 2.46 \times 10^6 \text{ años}$$

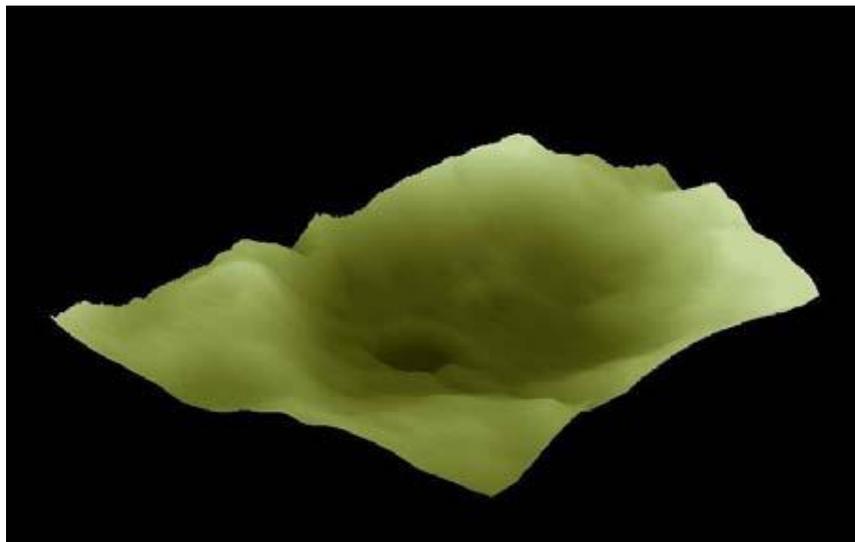
Como se esperaba, una capa de menor espesor se sublima en menor tiempo que una de espesor mayor. De los resultados anteriores se observa que si la temperatura de las trampas frías es de  $110^\circ K$  una capa de hielo de  $1m$  de espesor puede sobrevivir en la Luna un tiempo mayor al tiempo de formación del Sistema Solar. Con estos resultados podemos decir que hay una gran posibilidad de que exista hielo en la superficie lunar o cerca de ésta en lugares con temperaturas permanentes tan bajas como  $110^\circ K$ .

Aplicaremos lo anterior a una zona específica de la Luna: el cráter Cabeus. El cráter Cabeus es un cráter de impacto que con el tiempo se ha ido modificando por impactos posteriores. El borde está erosionado y desigual, con crestas prominentes en los extremos norte y sur. Un pequeño cráter se encuentra en el borde noreste y hay un cráter un poco más grande en el piso interior, cerca del borde oeste-suroeste (fig.4.6 y 4.7).

En 1998 se encontraron en los Polos lunares unas regiones con exceso de hidrógeno detectadas mediante el espectrómetro de neutrones del Explorador Lunar (LALT a bordo de la nave espacial japonesa KAGUYA). Estos excesos fueron encontrados en los cráteres de impacto, uno de ellos es Cabeus. En Cabeus se registró 129 ppm donde el contenido medio de hidrógeno en el suelo de la Luna es igual a 50 ppm, por lo tanto este cráter fue considerado como una posible "trampa fría" para volátiles sobre la Luna.



**Figura.4.6.-** Cráter Cabeus ubicado a 100 km del polo sur de la Luna (Coordenadas 84.9°S 35.5°W , diámetro 98km, profundidad ~ 4Km y ángulo de las paredes:10-15° )



**Figura 4.7.-** Modelo del Cráter Cabeus en 3D.

Kozlova y Lazarev (2010) hicieron un mapa de iluminación para el cráter Cabeus usando los datos de KAGUYA (fig.4.8). La parte principal del cráter es iluminada durante el 25 % del día Lunar. Las paredes interiores del cráter son iluminadas por la luz solar directa durante más del 30 % del día Lunar. El área en sombra permanente del cráter está situada en la parte oeste del cráter y coincide con el pequeño cráter de impacto en el fondo de Cabeus. El tiempo durante el cual esta área es iluminada por la luz solar es ligeramente menor al 15% del día Lunar.

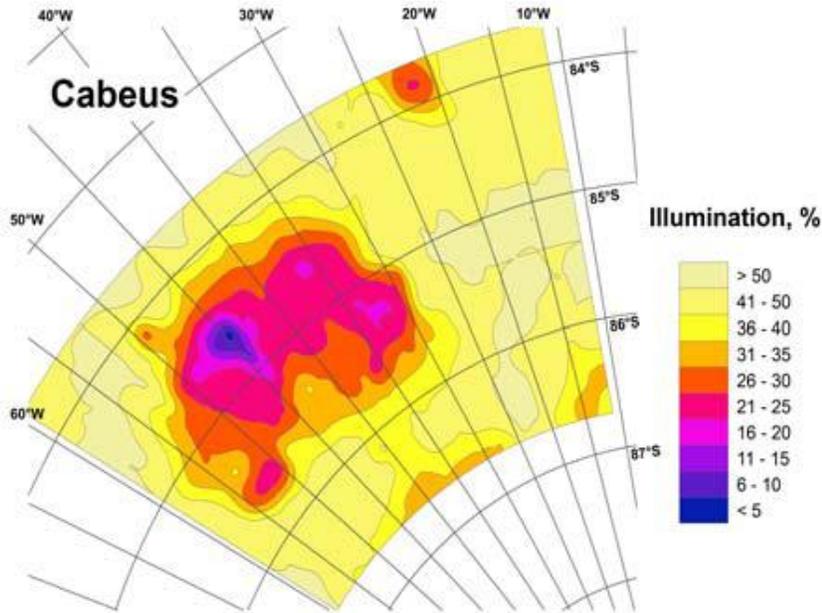


Figura 4.8.- Iluminación en el cráter Cabeus.

Con los datos topográficos de KAGUYA los investigadores hicieron una estimación de las temperaturas en el cráter Cabeus. Podemos observar (fig.4.9) que en la parte norte del cráter hay un área grande donde las temperaturas medias no exceden los 110 °K (zona azul) y en la parte sur van de 110 °K a 150 °K que son temperaturas ideales para que se conserve agua en estado sólido como se mostró anteriormente, y que la regolita permite que las variaciones de temperatura sean mínimas conservando los volátiles.

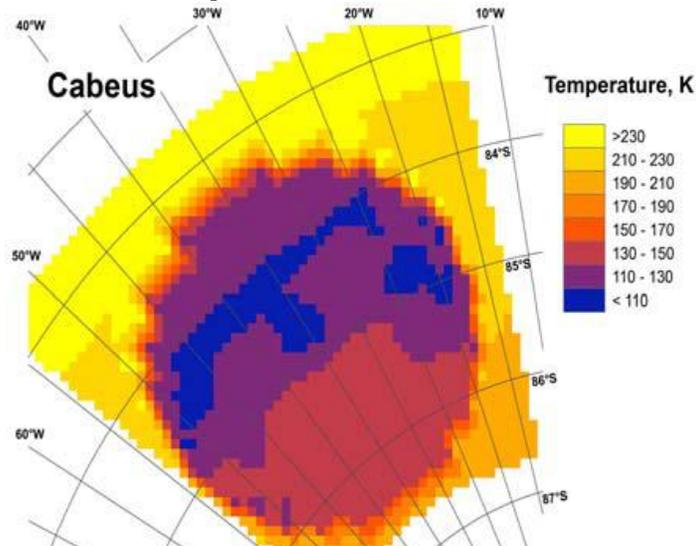


Figura 4.9.- Distribución de temperaturas en el cráter Cabeus.

Ya teniendo las temperaturas superficiales en el interior del cráter Cabeus podemos aplicar las ecuaciones que usamos anteriormente para mostrar que en el cráter existen las condiciones para que exista hielo. Los resultados de nuestros cálculos se pueden observar en las tablas 4.2 y 4.3.

**Tabla.4.2.-** Presión de saturación y sublimación para cada intervalo de Temperaturas en el cráter Cabeus.

Temperatura [°K]	P <sub>SAT</sub> (T) [ hPa ]	S(T) [ $\frac{Kg}{m^2s}$ ]
110	$1.98 \times 10^{-12}$	$4.53 \times 10^{-27}$
120	$2.02 \times 10^{-10}$	$4.42 \times 10^{-25}$
140	$3.07 \times 10^{-7}$	$6.20 \times 10^{-22}$
160	$7.91 \times 10^{-5}$	$1.49 \times 10^{-19}$
180	$6.21 \times 10^{-3}$	$1.10 \times 10^{-17}$
200	$2.11 \times 10^{-1}$	$3.58 \times 10^{-16}$
220	3.91	$6.31 \times 10^{-15}$
230	14.04	$2.21 \times 10^{-14}$
273	1246.63	$1.80 \times 10^{-12}$

**Tabla.4.3.-** Tiempo de sublimación para una temperatura dada de dependiendo del espesor de la capa de hielo en el cráter Cabeus.

t Sublimación (años)				
Temperaturas	1 km	2 km	3 km	4 km
110	$6.98 \times 10^{24}$	$1.39 \times 10^{25}$	$2.09 \times 10^{25}$	$2.79 \times 10^{25}$
120	$7.16 \times 10^{22}$	$1.43 \times 10^{23}$	$2.14 \times 10^{23}$	$2.86 \times 10^{23}$
140	$5.10 \times 10^{19}$	$1.02 \times 10^{20}$	$1.53 \times 10^{20}$	$2.04 \times 10^{20}$
160	$2.11 \times 10^{17}$	$4.23 \times 10^{17}$	$6.35 \times 10^{17}$	$8.47 \times 10^{17}$
180	$2.86 \times 10^{15}$	$5.72 \times 10^{15}$	$8.58 \times 10^{15}$	$1.14 \times 10^{16}$
200	$8.85 \times 10^{13}$	$1.77 \times 10^{14}$	$2.65 \times 10^{14}$	$3.54 \times 10^{14}$
220	$5.02 \times 10^{12}$	$1.00 \times 10^{13}$	$1.50 \times 10^{13}$	$2.00 \times 10^{13}$
230	$1.43 \times 10^{12}$	$2.86 \times 10^{12}$	$4.29 \times 10^{12}$	$5.72 \times 10^{12}$
273	$1.75 \times 10^{10}$	$3.51 \times 10^{10}$	$5.26 \times 10^{10}$	$7.02 \times 10^{10}$

Mientras menor sea la temperatura de la región y mientras mayor sea el espesor de la capa de hielo, la sublimación será menor y por tanto el tiempo que tarda en evaporarse la capa de hielo será mayor. La regolita no permite que haya mucha variación en la temperatura por tanto hay gran posibilidad de que exista hielo en estas zonas. Un punto interesante de la tabla 4.3, es que en todos los casos el tiempo que tardaría en evaporarse un reservorio de hielo de agua en la zona de sombra permanente del cráter Cabeus es mayor que la edad del Sistema Solar.

## 4.2 MAPAS DE LA DISTRIBUCIÓN DE AGUA EN LA LUNA

Se realizaron dos mapas donde se muestra una vista topográfica del los polos Sur y Norte donde se localizaron las zonas que posiblemente contengan depósitos de agua de acuerdo a los estudios realizados por los diferentes grupos encargados de analizar los datos de las misiones lunares descritas en este trabajo de investigación (capítulo 3).

En la figura 4.10 podemos observar los diferentes lugares de aterrizaje de la misión Apollo (11, 12, 14, 15 y 17) de donde se obtuvieron diferentes muestras las cuales fueron analizadas en busca de agua. La mejor estimación de la abundancia de agua en cada sitio de aterrizaje de la misión Apollo es: 800 a 1700 ppm (Apollo 11), 800 a 6050 ppm (Apollo 12), 500 a 1200 ppm (Apollo 14), 30 a 70 ppm (Apollo 15) y 900 a 1100 ppm (Apollo 17). Por lo que los análisis realizados a las diferentes muestras de la misión Apollo nos dan una posibilidad de encontrar depósitos de agua en las zonas marcadas sobre la superficie lunar (tabla 4.4 y fig. 4.10).

En la figura 4.11 se marcaron las zonas que mostraron presencia de agua en los análisis realizados a los datos obtenidos por las misiones Clementine, Lunar Prospector y Chandrayaan-1 sobre el polo Norte lunar (latitudes mayores a 78 °N) donde se muestra la topografía del lugar (4.11.A). Como podemos observar, la zona marcada de color naranja son tres cráteres en sombra permanente que mostraron una abundancia de agua congelada de 15, 27 y 38 % por peso molecular de agua (capítulo 3.2). En la misión Lunar Prospector se encontró una presencia mínima de agua, por medio de análisis con el espectrómetro de neutrones, del 1% en peso molecular, marcado de color rosa en la figura 4.11.C.

En cuanto a Chandrayaan-1, se analizaron los datos obtenidos por dos de los experimentos montados en esta nave cuyo objetivo era encontrar rastros de agua sobre la superficie lunar (Mini-SAR y M<sup>3</sup>). En los análisis realizados por el Mini-SAR se encontraron dos cráteres en sombra permanente dentro del cráter Rozndestvenskiy con posibilidades de tener depósitos de agua en su interior, esto se marcó de color amarillo (fig.4.11.C). Sin embargo, estudios más recientes mostraron que había alrededor de 40 cráteres en sombra permanente cerca del polo Norte con rastros de agua congelada con una estimación de 600 millones de toneladas métricas de agua distribuidas en ellos (color amarillo, fig.4.11.B), que concordaron con los estudios realizados con el M<sup>3</sup>. Como se vio en el capítulo anterior, el M<sup>3</sup> señala que amplias zonas en la Luna contienen agua. En la figura 4.11.C la zona delimitada por las líneas de color azul señala las áreas donde se encontró rastros de agua. Es de notar, que los 40 cráteres mencionados se encuentran dentro de esta zona.

Por último, el mapa realizado para el polo Sur (78 a 90 °S) muestra los resultados de los análisis realizados por las misiones Lunar Prospector, Chandrayaan-1, LCROSS y LRO (fig. 4.12). Los resultados del análisis de los datos del espectrómetro de neutrones obtenidos por Lunar Prospector permitieron estimar un promedio de abundancia de agua en el polo sur de 1.5 % en peso molecular en el área delimitada por las líneas de color rosa. El cráter Shoemaker presentó evidencias de depósitos de agua, encontrándose concentración de 1.3 % en peso molecular (marcado con un punto rosa) (tabla 4.4 y fig. 4.12). Para el caso de Chandrayaan-1, sólo se determinaron las zonas que presentaron firmas espectrales características del agua en el espectro en el cercano infrarrojo sin determinar abundancias. Estas zonas están delimitadas por las líneas de color azul (achurado azul) en las figura 4.11 y 4.12.

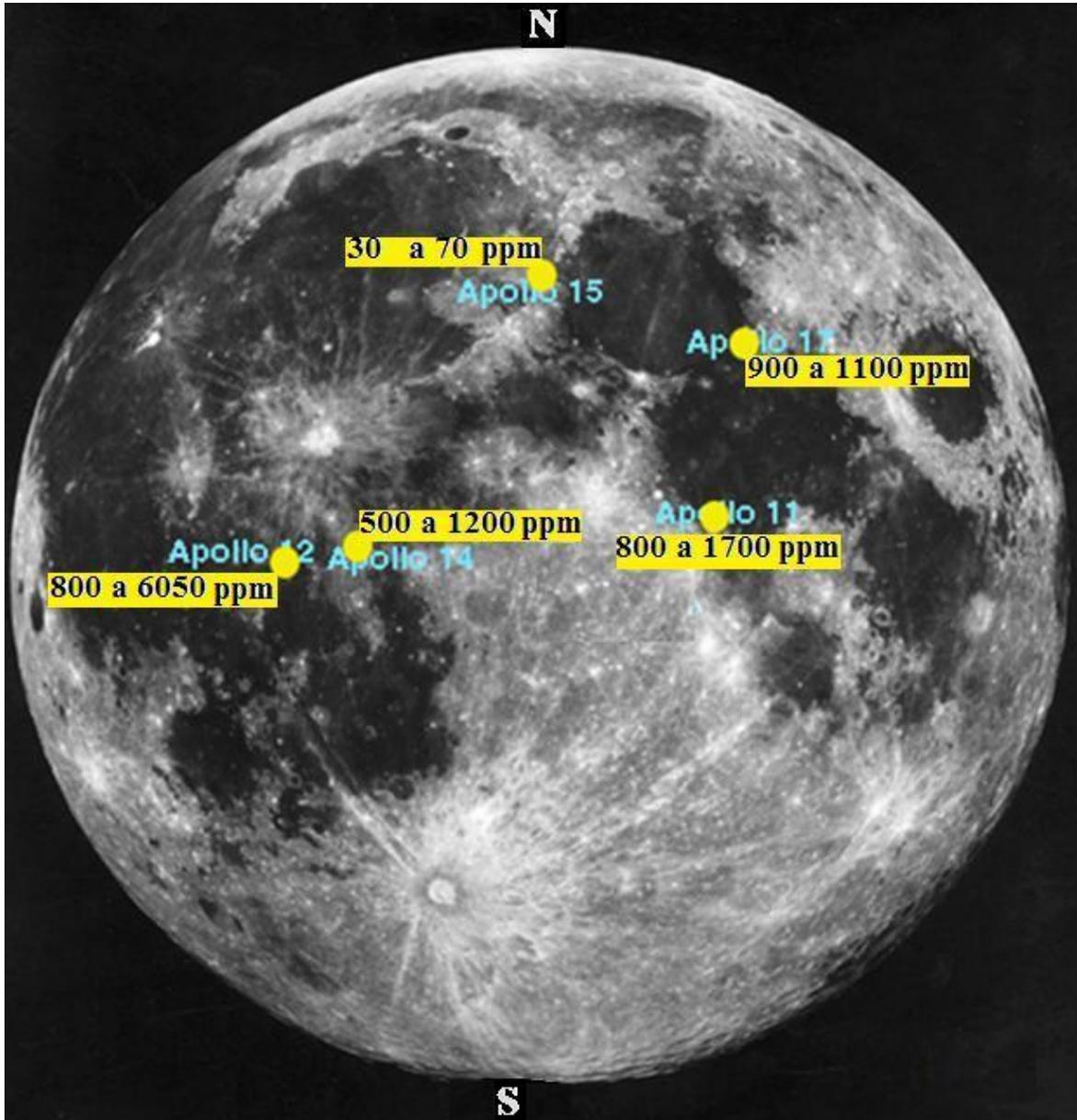
De los resultados obtenidos de la misión LCROSS se tiene que la zona de impacto del cohete Centauro presentó un aproximado de abundancia de agua del 5.6 % en peso molecular (color naranja) (tabla 4.4 y fig.4.12).

Por último, la misión LRO analizó los crateres Cabeus, Shoemaker, Faustini y Haworth, que se encuentran en sombra permanente, debido a su gran posibilidad de albergar depósitos de agua congelada. Al analizar los datos obtenidos se encontró que para Cabeus tenía un porcentaje de 0.87, 1.2 y 1.6% de abundancia de agua

por peso molecular (tabla 4.4 y fig. 4.12), los distintos valores corresponden a las distintas áreas consideradas. La abundancia de agua en Shoemaker fue de 0.32%, en Faustini de 0.24% y en Haworth de 0.13% en peso molecular (color morado). Por lo que podemos observar, la zona Sur de la Luna mostró más abundancia de agua que la parte Norte. La siguiente tabla muestra un promedio de las abundancias encontradas por cada una de las misiones espaciales.

**Tabla.4.4.-** Intervalos de concentraciones de agua encontrados de los análisis de los datos proporcionados por las diferentes misiones espaciales.

MISIONES ESPACIALES	CONCENTRACIONES DE AGUA (%)	CONCENTRACIONES DE AGUA (ppm)
Apollo	0.003 a 0.6050	30 a 6050
Clementine	15 a 38	150000 a 380000
Lunar Prospector	1 a 1.5	10000 a 15000
LCROSS	5.6	56000
LRO	0.13	1300



**Figura 4.10.-** Abundancias de agua encontradas en los análisis de las muestras Apollo provenientes de diferentes sitios de aterrizaje lunar.

**Figura 4.11 .-MAPA DE LA DISTRIBUCIÓN DE AGUA DE LAS MISIONES  
LUNARES EN EL POLO NORTE**

**Figura 4.12.-MAPA DE LA DISTRIBUCIÓN DE AGUA DE LAS MISIONES  
LUNARES EN EL POLO SUR**

### 4.3 VALORACIÓN DE LAS TEORIAS SOBRE LA EXISTENCIA DEL AGUA EN LA LUNA

Las teorías que han sido plateadas sobre el origen del agua en la Luna durante los análisis de las distintas misiones lunares son: (a) impactos con cuerpos pequeños (asteroides y cometas) y (b) actividad magmática lunar. De los análisis llevados a cabo por las distintas misiones, hay evidencias de que los cometas han jugado un papel importante en el papel de la existencia del agua en la Luna, pero no se puede descartar del todo el origen de ésta.

Los impactos por cometas suelen liberar grandes cantidades de energía que suelen evaporar una gran parte del agua que poseen. Sin embargo, el material que sobrevive al impacto posee aún volátiles en su interior, esencialmente dentro de la estructura cristalina de sus minerales. Este material se emplaza junto con el material que está siendo excavado del blanco y, en particular, puede caer dentro de una trampa fría donde conserva sus volátiles.

Los procesos de origen lunar se dieron durante la historia temprana de la Luna, cuando ésta era un océano de magma. En este escenario, parte de los volátiles del manto se perdieron (desgasificación) y parte de ellos, en particular el agua, pudo haber sobrevivido dentro de la estructura cristalina de los minerales que se estaban formando. Parte de esta agua también sobrevivió en inclusiones fluidas dentro de olivino.

Las zonas donde se detectaron las mayores concentraciones de agua congelada sobre la superficie lunar fueron los cráteres en sombra permanente cerca de ambos polos. Algunos de estos cráteres fueron identificados por Margot y colaboradores (1999) como trampas frías que, debido a que están en sombras permanentemente se encuentran a muy bajas temperaturas, impiden que los depósitos de agua congelada se pierdan, albergándolos hasta por miles de millones de años.

Epstein y Taylor analizaron muestras de la misión Apollo con el propósito de determinar concentraciones de Hidrógeno y a su vez relacionarlo con las concentraciones de agua. Ellos encontraron que las concentraciones de Hidrógeno en las muestras eran demasiado altas y lo atribuyeron a implantación de partículas del viento solar, aunque no descartaron la posibilidad de que esto se debía a contaminación terrestre debido a los aparatos experimentales usados durante el análisis, o debido al contacto entre los astronautas y las muestras. Estudios posteriores hechos por Saal y colaboradores, mostraron que las cuentas de vidrio volcánico mostraban una disminución en las abundancias de volátiles del centro a su superficie por lo que propusieron que los volátiles se fueron perdiendo debido a procesos de desgasificación por difusión, con esto, ellos estaban planteando que los volátiles eran de origen lunar. Por otro lado, Greenwood y colaboradores encontraron altas concentraciones de Deuterio en las muestras lunares, esto pudo deberse al escape de Hidrógeno durante la formación de la Luna o bien a un enriquecimiento de Deuterio debido a agua proveniente de impactos con cometas. Por último, el análisis realizado por Hauri y colaboradores mostró que las inclusiones fluidas que fueron analizadas presentaron una abundancia de agua muy superior a pasados estudios. Esto se debió a que midieron directamente la composición del magma lunar primario por lo que no tenían el problema de desgasificación. En este caso, ellos mostraron que el agua era de origen magmático.

En la misión Clementine, por medio del análisis de imágenes en el cercano infrarrojo, notaron que la firma característica del agua se hacía presente en cráteres cerca del polo Norte.

En la misión Lunar Prospector se encontró que las mayores tasas de disminución de neutrones se localizaban cerca de los polos lunares, principalmente en aquellos cráteres que se encuentran en sombra permanente. Tal disminución en el conteo de neutrones era asociada a la presencia de Hidrógeno en la molécula de agua. Feldman y colaboradores platearon que dichas concentraciones de agua se debían a impactos de cometas y meteoroides, así como a partículas provenientes del medio interplanetario.

Los estudios realizados con el magnetómetro en el polo Sur revelaron que algunos de los cráteres que se encuentran en sombra permanente presentaban una intensidad de campo magnético alto en comparación con los alrededores. Durante un Sol quieto, estos campos magnéticos van a evitar el emplazamiento de Hidrógeno proveniente del viento solar, mientras que en periodos de Sol activo este escudo no es suficiente para evitar la llegada de las partículas del viento solar a la superficie donde se encuentra el material magnetizado. Dicho lo anterior, es claro que en zonas de campo magnético relativamente intenso, la concentración de hidrógeno va a ser menor que la concentración de Hidrógeno en zonas que no están protegidas por estos campos. Esto proporciona un límite inferior a la concentración de Hidrógeno proveniente del viento solar.

En la misión Chandrayaan-1, por medio del mini-SAR, se encontró que los cráteres más degradados cerca del polo Norte presentaban valores altos en los cocientes de polarización circular que indicaban la presencia de depósitos de agua (Thomson et al., 2010). Más tarde, Keeter confirmó la existencia de depósitos de agua congelada en 40 cráteres del polo Norte utilizando datos del Mini-SAR. Sin embargo, no tenemos conocimiento si estos cráteres se encuentran en sombra permanente o no, por lo que no podemos decir algo sobre el tiempo de permanencia del agua en dichos cráteres. De los resultados del Mini-SAR no se puede decir algo sobre la fuente del agua. De igual forma, para el M<sup>3</sup>, por medio de las bandas características de absorción del agua en el cercano infrarrojo, se encontró que las zonas con una mayor absorción eran cerca de ambos polos (Pieters et al., 2009). Uno de los cráteres del polo Norte presentó una alta absorción característica de la firma espectral del agua, dando como resultado la posibilidad de existencia de depósitos de agua congelada en su interior. En ese trabajo, los autores no se ocupan en encontrar el origen del agua.

En la misión LCROSS, al analizar en el cercano infrarrojo y en el UV/Vis la eyecta y la fumarola de vapor que se originaron del impacto del cohete Centauro en el cráter Cabeus, se encontró que dicho cráter identificado por Margot como trampa fría era un buen candidato a albergar grandes depósitos de agua congelada. En este caso, se propuso que el agua en el cráter se debía a impactos por cometas o micrometeoroides que ha sobrevivido en la trampa fría debido a que los procesos de pérdida son muy bajos.

Por último, en la misión LRO se utilizó un detector de neutrones para monitorear algunos cráteres en sombra permanente lo cual ayudó a elegir la zona de impacto del cohete Centauro en el polo Sur. De los cráteres analizados, el cráter Cabeus fue el que presentó un flujo de neutrones menor que el de los otros cráteres analizados.

En resumen, en la mayoría de los trabajos realizados sobre la detección de agua en la Luna y medición de sus abundancias no se hace una discusión sobre el origen de este compuesto. En unos pocos trabajos se apoya una u otra de las fuentes mencionadas. Lo cierto es que aun es necesario llevar a cabo más estudios para determinar el origen del agua lunar con cierto grado de confianza.

## 5. CONCLUSIÓN

Este estudio nos permitió conocer las posibles concentraciones de agua que pueden existir sobre la superficie lunar, las cuales fueron obtenidas de análisis realizados por distintos grupos de investigación, basados en datos recolectados por las misiones espaciales que estudiado nuestro satélite. Estos análisis mostraron evidencias de agua cerca de los polos lunares mientras que en el ecuador era mínima o nula. Dichos estudios revelaron que la mayor parte del agua se localizaba en cráteres en sombra permanente, que actuaban como trampas frías, albergando un gran número de depósitos de agua congelada a muy bajas temperaturas. Las concentraciones de agua que fueron derivadas de los datos de las misiones espaciales mencionadas en este trabajo fueron de 30 ppm a 56000 ppm. Con esto podemos concluir que existe agua congelada o formando parte de los minerales lunares en cráteres en sombra permanente cerca de ambos polos lunares.

Al observar los resultados anteriores quisimos analizar el tiempo de permanencia de dichos depósitos de agua dentro de estos cráteres en sombra permanente; por lo que seleccionamos un cráter identificado por Margot y colaboradores como una trampa fría y que por estudios de la misión LCROSS y LRO indicaba tener en su interior depósitos de agua congelada. Para esto, estimamos el tiempo de sublimación suponiendo diferentes grosores del depósito de agua y distintas temperaturas. En todos los casos considerados se encontró que el tiempo de sublimación de dichos depósitos es del orden de la edad del sistema solar, por lo que llegamos a la conclusión que dicho cráter podría poseer en su interior depósitos de agua congelada.

Por último estudiamos la procedencia de estos depósitos de agua congelada analizando las teorías propuestas por los diferentes grupos de investigación. Notamos que los análisis que se han hecho al respecto favorecen ligeramente la hipótesis cometaria sobre el origen del agua en la Luna aunque aún es necesario hacer más estudios al respecto para poder dar una respuesta concluyente pues el estudio de las inclusiones fluidas es una evidencia importante que apoya el origen magmático (lunar) del agua.

Para finalizar, diremos que aunque la propuesta del origen cometario del agua en la Luna se basa en las concentraciones de deuterio, en realidad no se ha mostrado en detalle el mecanismo de emplazamiento por lo que éste sería un buen tema para un trabajo futuro.

## BIBLIOGRAFÍA

- Colaprete, A., Schultz, P., Heldmann, J., Wooden, D., Shirley, M., Ennico, K., Hermalyn, B., Marshall, W., Ricco, A., Elphic, R. C., Goldstein, D., Summy, D., Bart, G. D., Asphaug, E., Korycansky, D., Landis, D., y Sollitt, L., 2010. Detection of water in the LCROSS ejecta plume. *Science*, Vol. 330, pp. 463-468.
- Clark, R., Pieters, C. M., Green, R. O., Boardman, J., Buratti, B. J., Head, J. W., Isaacson, P. J., Livo, K. E., McCord, T. B., Nettles, J. W., Petro, N. E., Sunshine, J. M. y Taylor, L. A., 2011. Water and Hydroxyl on the Moon as seen by the Moon mineralogy mapper (M<sup>3</sup>). *Lunar and Planetary Science Conference XLI*, No. 1533, pp. 2302.
- Drake, D. M. y Feldman, W. C., 1988. Martian neutron leakage spectra. *Journal of geophysical research*, Vol. 93, No. B6, pp. 6353-6368.
- Epstein, S. and Taylor, H., 1973. The isotopic composition and concentration of water, hydrogen and carbon in some Apollo 15 and 16 soils and in the Apollo 17 orange soil. *Proceedings of the Fourth Lunar Science Conference*, Vol. 2, pp. 1559-1575.
- Feldman, W. C., Maurice, S., Binder, A. B., Barraclough, B. L., Elphic, R. C. y Lawrence, D. J., 1998. Fluxes of fast and epithermal neutrons from lunar prospector: evidence for water ice at the lunar poles. *Science*, Vol. 281, pp. 1496-1500.
- Feldman, W. C., Lawrence, D. J., Elphic, R. C., Barraclough, B. L., Maurice, S., Genetay, I. y Binder, A. B., 2000. Polar hydrogen deposits on the Moon. *J. Geophys. Res.*, Vol. 105, No. E2, pp. 4175-4195.
- Gaffey, J., McFadden, L. A., Nash, D. y Pieters, C. M., 1993. Ultraviolet, visible, and Near-Infrared reflectance spectroscopy: laboratory spectra of geologic materials. C. M. Pieters y P. J. Englert (eds.), *Remote geochemical analysis elemental and mineralogical composition*. Nueva York, Cambridge University press, pp. 51-53.
- Greenwood, J. P., Itoh S., Sakamoto, N., Warren P., Taylor L. y Yurimoto, H., 2010. Hydrogen isotope ratios in lunar rocks indicate delivery of cometary water to the Moon". *Nature Geoscience*, Vol. 4, pp. 79-82.
- Greenwood, J. P., Itoh, S., Sakamoto, Taylor, L. A., Warren, P. H. y Yurimoto, H., 2010. Water in Apollo rock samples and the D/H of lunar apatite. *Lunar and Planetary Science Conference XLI*, No. 1533, pp. 2439.
- Gillis, J. J. y Lucey P. G., 2004. Clementine 2.7  $\mu\text{m}$  data: mapping the mare and searching for water. *Lunar and Planetary Science Conference XXXV*, No. 2158.
- Hauri, E. H., Weinreich, T., Saal A. E., Rutherford M. C. y Van Omar, J. A., 2011. "High Pre-Eruptive Water Contents Preserved in Lunar Melt Inclusions". *Science* Vol. 333, pp. 213-215.
- Helbert, J., Hauber, E. y Reiss, D., 2009. Water on the terrestrial planets. T. Spohn (ed.), *Planets and moons*, Vol. 10 de *Treatise on the geophysics* (ed. gen. G. Schubert). Países Bajos, Elsevier, pp. 371-420.
- Kozlova, E. A. y Lazarev, E. N., 2010. Cold Cabeus as possible cold trap for volatiles near south Pole of the Moon. *Lunar and Planetary Science Conference XLI*, Vol. 1533, pp. 1779.
- Kuskov, O. L. y Kronrod V. A., 2009. Geochemical constraints on the model of the composition and thermal conditions of the Moon according to seismic data. *Physics of the solid earth*, Vol. 45, No. 9, pp. 758.

Lognonné P. y Johnson C .Planetary Seismology. Planets and Moons. Tilman Spohn 1a. Ed, vol. 10.Treatise on Geophysics. Elseviere ,Spain, 69-91 pp.

McCubbin, M. F., Steele A., Hauri E. H., Nekvasil, H., Yamashita, S. y Hemley, R. J.,2010. Nominally hydrous magmatism on the Moon. PNAS, Vol. 107, pp. 11223-11228.

McConnochie, T. H., Buratti J. B., Hillier, K. J. y Tryka K. A., 2002. A search for water ice the Lunar Poles with Clementine Images. *Icarus*, Vol. 156, pp. 335-351.

McClanahan, T. P., Mitrofanov, I. G., Boynton, W. V., Sagdeev, R., Trombka, J. I., Starr, R. D., Evans, L. G., Litvak, M. L., Chin, G., Garvin, J., Sanin, A. B., Malakhov, A., Milikh, G. M., Harshman, K., Finch, M. J., y Nandikotkur, G., 2010. Correlation of lunar south polar epithermal neutron maps: lunar exploration neutron detector and lunar prospector neutron detector. Lunar and Planetary Science Conference XL, No. 1533, pp.1395.

Mitrofanov, I. G., Sanin, A. B., Boynton, W. V., Chin, G., Garvin, J. B., Golovin, D., Evans, L. G., Harshman, K., Kozyrev, A. S., Litvak, M. L., Malakhov, A., Mazarico, E., McClanahan, T., Milikh, G., Mokrousov, M., Nandikotkur, G., Neumann, G. A., Nuzhdin, I., Sagdeev, R., Shevchenko, V., Shvetsov, V., Smith, D. E., Starr, R., Tretyakov, V. I., Trombka, J., Usikov, D., Varenikov, A., Vostrukhin, A. y Zuber, M. T., 2010. Hydrogen mapping of the lunar south pole using the LRO neutron detector experiment LEND. *Science*, Vol. 330, pp.483-485.

Margot, J. L., Campbell D. B., Jurgens R. F. y Slade M. A., 1999.Topography of the lunar poles from radar interferometry: A survey of cold trap locations. *Science*, Vol. 284, pp.1658- 1660.

Pieters, C. M., Goswami, J. N., Clark, R. N., Annadurai, M., Boardman, J., Buratti, B., Combe, J.-P., Dyar, M. D., Green, R., Head, J. W., Hibbitts, C., Hicks, M., Isaacson, P., Klima, R., Kramer, G., Kumar, S., Livo, E., Lundeen, S., Malaret, E., McCord, T., Mustard, J., Nettles, J., Petro, N., Runyon, C., Staid, M., Sunshine, J., Taylor, L. A., Tompkins, S. y Varanasi, P., 2009.Character and spatial distribution of OH/ H<sub>2</sub>O on the surface of the Moon seen by M<sup>3</sup> on Chandrayaan-1.*Science*, Vol. 326 , pp. 568-572.

Schaler, E. W. y Purucker, M. E., 2007. Lunar south pole hydrogen and water ice deposits: constraints from lunar prospector magnetic field observations. Lunar and Planetary Science Conference XXXVIII, No. 1338, pp.1034.

Saal A. E., Hauri, E. H., LoCascio M., Van Omar, J. A Rutherford M. C. y Cooper, R. F., 2008. The Apollo 15 very low-Ti glasses, evidence for the presence of indigenous water in the Moon's interior. Lunar and Planetary Science Conference XXXIX, No. 1391, pp. 1711.

Saal A E., Hauri, E. H., Van Omar, J. A., Rutherford M. C. y Friedman, B., 2009. New estimates of the water content of the Moon from Apollo 15 picritic glasses. Lunar and Planetary Science Conference XL, No.2344.

Taylor H. y Epstein S. 1971. O<sup>18</sup>/O<sup>16</sup>, Si<sup>30</sup>/Si<sup>28</sup> and C<sup>13</sup>/C<sup>12</sup> ratios in lunar samples. Proceedings of the Lunar Science Conference, Vol. 2, pp. 1421-1441.

Taylor, H. P. y Epstein, S., 1973. The isotopic composition and concentration of water, hydrogen, and carbon in some Apollo 15 and 16 soils and in the Apollo 17 orange soil. Proceedings of the Lunar Science Conference, Vol. 4, pp. 1560-1575.

Thomson, B. J., Spudis, P. D., Bussey, D. B. J., Carter, L., Kirk, R. L., Neish, C., Patterson, G., Raney, R. K., Winters, H., Mini-Rf Team, 2010. Roughness and radar polarimetry of lunar polar craters: testing for ice deposits. Lunar and Planetary Science Conference XLI, No.1533, pp. 2176.

Vaniman, D., Reedy, R., Heiken, G., Olhoeft, G. y Mendell, W., 1993. Physical properties of the lunar surface. G. H. Heiken, D. T. Vaniman y B. M. French (eds), *Lunar Sourcebook a user's guide to the Moon*. EE.UU., Cambridge University press, pp.37-41, 108, 288, 516-517.

Vasavada, A. R., Paige, D. A. y Wood, S. E., 1999. Near-surface temperatures on Mercury and the Moon and the stability of polar ice deposits. *Icarus*, Vol. 141, pp. 179-193.

Watanabe, T., 1993. Effects of water and melt on seismic velocities and their application to characterization of seismic reflectors. *Geophys. Res. Letters*, Vol. 20, pp. 2933-2936.

Watson, K., Murray, B. C. y Brown, H., 1961. The behavior of volatiles on the lunar surface. *J. Geophys. Res.*, Vol. 66, pp. 3033-3045.

Dunbar, B., 2010. The Moon. Washington, National Aeronautics and Space Administration. <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/planets/moonpage.html> [Consulta : Abril 2, 2011].

Dunbar, B., 2010. Experiments APOLLO. Washington, National Aeronautics and Space Administration. <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/lunar/apollo.html> [Febrero 20, 2011].

Dunbar, B., 2010. Experiments Clementine. Washington, National Aeronautics and Space Administration. <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/experimentSearch.do?spacecraft=Clementine> [Marzo 1, 2011]

Dunbar, B., 2010. Experiments Lunar Prospector. Washington, National Aeronautics and Space Administration. <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/experimentSearch.do?spacecraft=Lunar%20Prospector> NASA [Marzo 9, 2011].

Dunbar, B., 2010. Experiment Chandrayaan. Washington, National Aeronautics and Space Administration. <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/experimentSearch.do?spacecraft=Chandrayaan%201%20Lunar%20Orbiter> [Marzo 18, 2011].

Dunbar, B., 2010. Experiment LCROSS. Washington, National Aeronautics and Space Administration. <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/experimentSearch.do?spacecraft=Lunar%20Crater%20Observation%20and%20Sensing%20Satellite%20> [Marzo 25, 2011].

Dunbar, B., 2010. LCROSS spacecraft. Washington, National Aeronautics and Space Administration [http://www.nasa.gov/mission\\_pages/LCROSS/spacecraft/Spacecraft1.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/LCROSS/spacecraft/Spacecraft1.html) [Marzo 26, 2011].

Dunbar, B., 2010. Experiments Lunar Reconnaissance Orbiter. Washington, National Aeronautics and Space Administration. <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/experimentSearch.do?spacecraft=Lunar%20Reconnaissance%20Orbiter%20> [Marzo 25, 2011].

Dunbar, B., 2010. Mission GRAIL. Washington, National Aeronautics and Space Administration. <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?id=GRAIL> [Marzo 31, 2011].

Dunbar, B., 2010. Mission LADEE. Washington, National Aeronautics and Space Administration.  
<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?id=LADEE> [Abril 2, 2011].

Keeter, B., 2010. Mini-RF, Exploring the lunar poles. NASA. [http://www.nasa.gov/mission\\_pages/Mini-RF/multimedia/feature\\_ice\\_like\\_deposits.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/Mini-RF/multimedia/feature_ice_like_deposits.html) [22 de noviembre de 2011].

LPI (Lunar and Planetary Institute),2011. Apollo 15 mission .  
[http://www.lpi.usra.edu/lunar/mission/apollo/apollo\\_15/experiments/ps/](http://www.lpi.usra.edu/lunar/mission/apollo/apollo_15/experiments/ps/) [14 Noviembre, 2011]