

CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DEL POLO SUR COMO EMPLAZAMIENTO DE LA PRIMERA BASE LUNAR SEMIPERMANENTE

Fernández Abellán, J.L.

Ingeniero de Minas
jlfabellan@telefonica.net

Abstract: The establishment of a semipermanent Moonbase in a relatively near future makes necessary to know the geologic, mineralogic, physical and chemical characteristics of our satellite, with the purpose of making a correct previous preparation of the processes to carry out in the lunar surface for the extraction of its more important resources. South Pole has been selected as the best location to establish the first semipermanent Moonbase, according to several engineering, geologic, economic and security criteria. Several processes for oxygen and certain metals, as iron and titanium extraction from ilmenite, as well as more important regolith volatiles, are presented here. Especially helium-3 could become an important power source of nuclear fusion reactors that could supply energy for humankind in the future.

Keywords: MOONBASE, REGOLITH, ILMENITE, HELIUM-3.

Resumen: El establecimiento de una base semipermanente en la Luna en un futuro relativamente próximo hace necesario conocer adecuadamente las características geológicas, mineralógicas, físicas y químicas de nuestro satélite, con el fin de realizar una correcta preparación previa de los procesos a llevar a cabo en la superficie lunar para la extracción de sus recursos más importantes. El polo sur es el emplazamiento elegido para establecer la primera base lunar semipermanente, según una serie de criterios de ingeniería, geológicos, económicos y de seguridad. Se presentan una serie de procesos para la extracción del oxígeno y de ciertos metales valiosos, como el hierro y el titanio, de la ilmenita, así como de los volátiles más importantes presentes en el regolito lunar, especialmente del helio-3, que podría convertirse en la fuente de energía de los reactores nucleares de fusión que serán la base del abastecimiento energético futuro.

Palabras clave: BASE LUNAR, REGOLITO, ILMENITA, HELIO-3.

Introducción

El regreso del ser humano a la Luna es inminente en un futuro a corto y medio plazo. Ello puede suponer el primer gran paso de la humanidad en la conquista de nuestro espacio cercano además de permitir aprovechar los innumerables recursos que puede proporcionar nuestro satélite. Aquí se van a describir brevemente los recursos que tiene la Luna, las razones para la selección del lugar ideal para el establecimiento de la primera base lunar habitada por seres humanos, además de algunos procesos para la extracción de los recursos lunares más importantes para el autoabastecimiento de la base lunar.

Interés geológico y mineralógico de la Luna

La Luna es el único cuerpo del sistema solar, aparte de la Tierra, del que se conoce su geología de forma adecuada y del que, gracias a las misiones espaciales del pasado, se han obtenido varias muestras de regiones diversas (en concreto, aproximadamente 382 kg que siguen siendo objeto de estudio útil en varios laboratorios del mundo para la comprensión acerca de la formación de la Luna y la de otros cuerpos rocosos del sistema solar).

Las rocas lunares se diferencian claramente de las terrestres principalmente por su carencia de agua. Sus litologías son diferentes para los “mares” y las “tierras” lunares, distinguiéndose:

- “Mares”: basaltos semejantes a los terrestres (aunque con mayores proporciones de olivino, piroxeno e ilmenita y menor en plagioclasa).
- “Tierras”: brechas o rocas complejas debidas a la craterización, principalmente compuestas de plagioclasa.

El estudio de las muestras obtenidas de la superficie lunar ha permitido determinar la composición mineralógica y química de la misma. Ello tiene gran importancia a la hora de establecer y diseñar los diferentes procesos de extracción de los recursos lunares. En el gráfico circular de la Figura 1 se muestra la composición media de los principales elementos que aparecen en el regolito lunar. Aparte de estos elementos, también se han encontrado trazas de otros elementos importantes como son el hidrógeno, el carbono, el nitrógeno, el fósforo, etc.

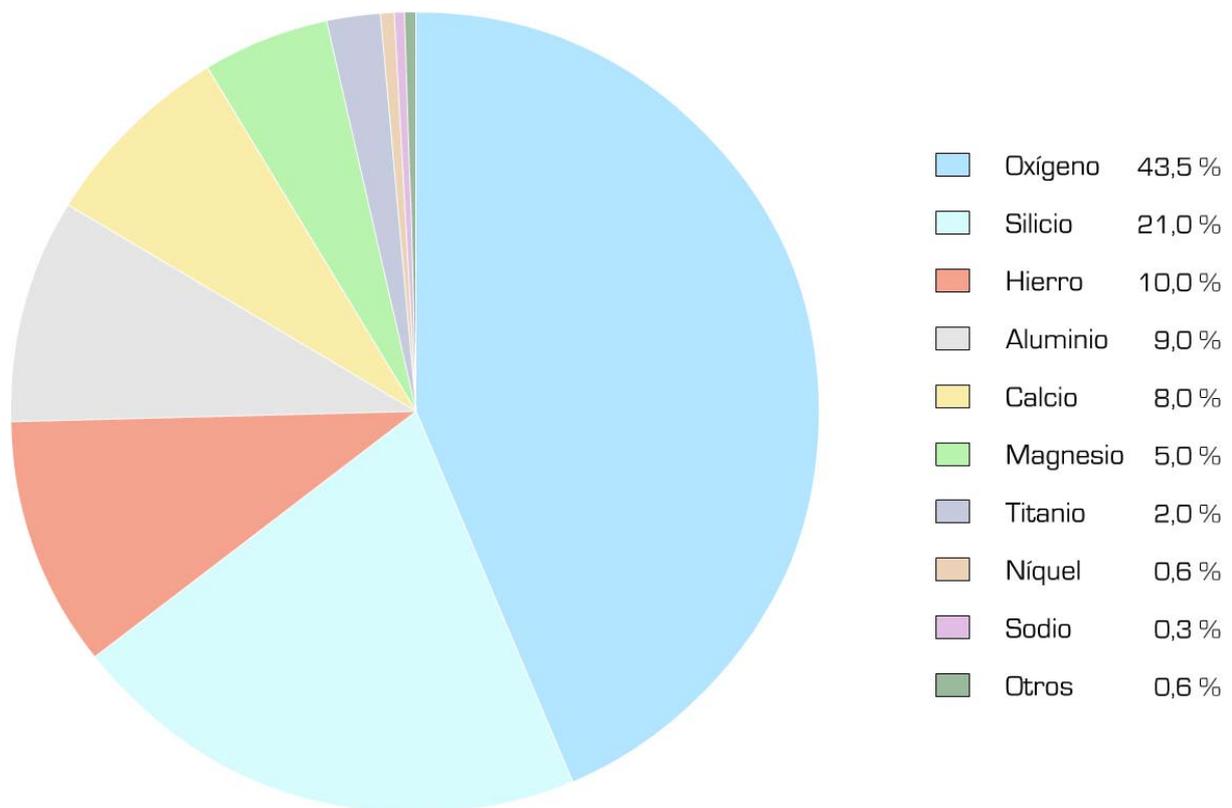


Figura 1: Composición química del regolito lunar.

Especialmente importantes son los elementos volátiles encontrados en el regolito lunar. Durante los 4 500 millones de años de historia de la Luna, el viento solar ha ido transportando una enorme cantidad de partículas de elementos volátiles hasta su superficie. Gran parte de estas partículas se han mantenido atrapadas en el suelo lunar sin que hayan penetrado excesivamente, con lo cual se podrían extraer con relativa facilidad. Los principales elementos volátiles que aparecen en estas partículas son el hidrógeno, el helio (en sus isótopos ^3He y ^4He), el carbono, el nitrógeno, el flúor, el azufre y el cloro. En la Figura 2 se muestran las composiciones de estos elementos volátiles que han sido determinadas a partir de las muestras obtenidas por las misiones “Apollo”.

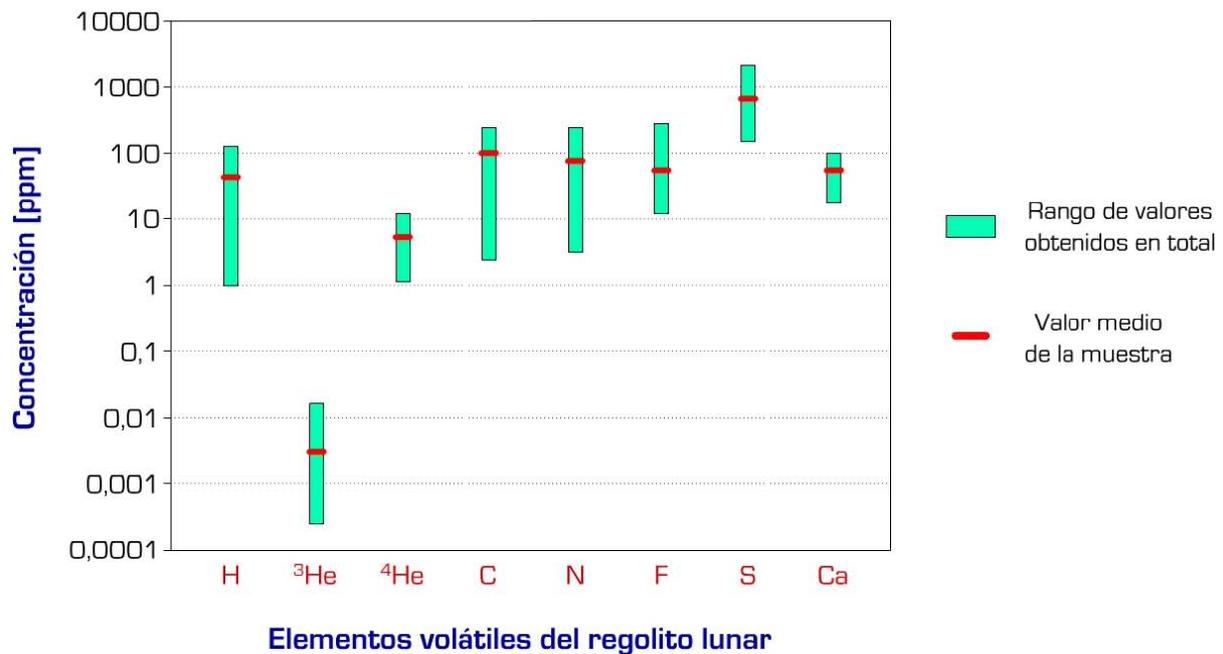


Figura 2: Composición de los volátiles del regolito lunar.

Es importante destacar la cantidad de ³He encontrada en las muestras lunares analizadas, ya que podría constituirse en el elemento combustible para las reacciones de fusión nuclear que se prevé puedan convertirse en la principal fuente de abastecimiento energético en el futuro, cuando se consiga el desarrollo de reactores de gran tamaño. El problema es que los recursos terrestres de ³He son muy limitados, por no decir que prácticamente inexistentes (unos pocos cientos de kilogramos, cuando la Tierra necesitaría varias toneladas al año), pero no así en la Luna, de ahí la importancia de su extracción.

En cuanto a la mineralogía lunar, no ha podido determinarse con precisión debido a que las muestras que se han obtenido del regolito (tanto de las misiones espaciales como de los meteoritos lunares encontrados en la Tierra) son muy escasas y están reducidas a una región concreta de la Luna, con lo que los resultados de su análisis mineralógico no pueden ser extrapolables al resto de la superficie lunar. Para su total determinación ya se han planteado diversas misiones espaciales con sondas no tripuladas, como la sonda europea “SMART-1” que se espera que aporte nuevos datos en este año 2005.

Criterios de selección del emplazamiento para la base lunar

Son muchos los criterios que se tuvieron en cuenta para seleccionar el polo sur de la Luna como emplazamiento para la primera base semipermanente habitada por seres humanos. Desde el punto de vista de las características geológicas y químicas de la superficie lunar, es más conveniente esta región por varias razones:

- Zona muy interesante geológicamente ya que existen topografías muy diversas, desde zonas montañosas y grandes cráteres de impacto a pequeñas llanuras.
- La existencia de grandes cráteres de impacto hace que sea una región potencialmente interesante desde el punto de vista mineralógico y químico, ya que los meteoritos aportan gran cantidad de elementos volátiles y otros compuestos explotables con relativa facilidad.

- Es bastante probable que en ciertos cráteres en sombra permanente del polo sur existan grandes cantidades de agua helada atrapada, lo cual implicaría un importante ahorro en los costes de desarrollo de la base lunar, al evitarse el envío de este material desde la Tierra (aparte de poder aprovecharse en los procesos de extracción de los principales recursos lunares). De momento lo que se conoce con certeza es una presencia anormalmente elevada de hidrógeno atrapado en estos cráteres que, en el caso de que no se encontrara realmente en forma de hielo, el descubrimiento sería igualmente importante ya que con este hidrógeno se podría obtener agua a partir del regolito lunar (que tiene un contenido en oxígeno superior al 40 % en peso). Esta cantidad viene reflejada en el mapa de los polos lunares de la Figura 3, obtenido a partir del bombardeo de neutrones epitermales sobre la superficie lunar que realizó la sonda espacial “Lunar Prospector”, ya que estos neutrones son muy sensibles a la absorción por hidrógeno.

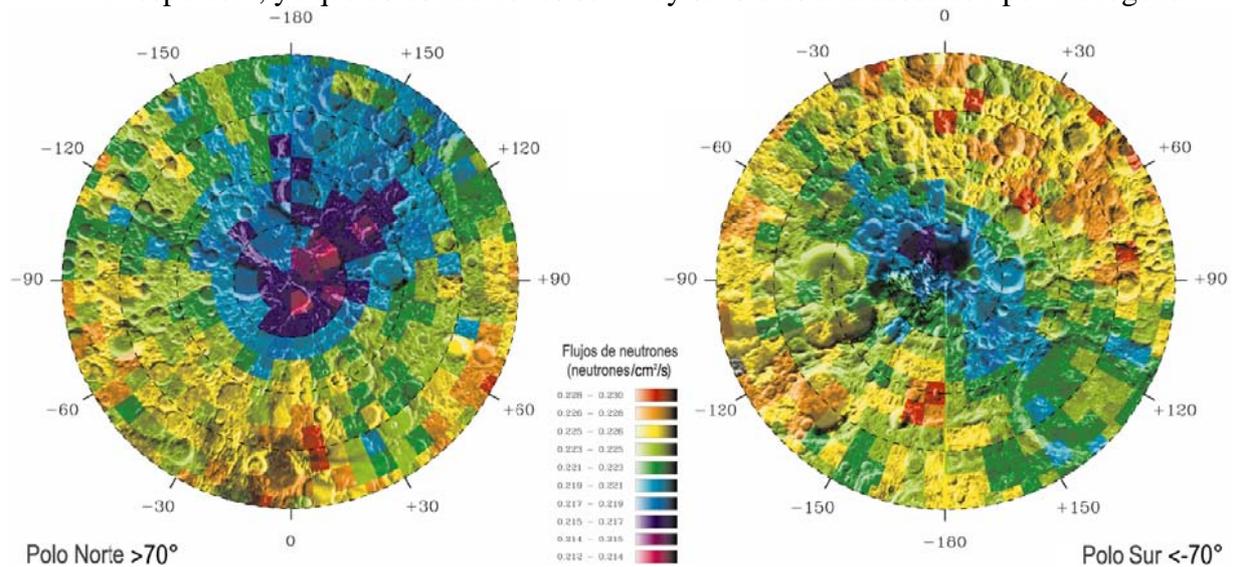


Figura 3: Mapas de neutrones epitermales en los polos de la Luna.

Aparte de estos criterios se han establecido otros que han sido decisivos a la hora de seleccionar el polo sur para situar la primera base lunar semipermanente. Entre ellos destacan el hecho de que en ciertas zonas elevadas del polo sur pueda existir iluminación solar durante todos los días del año (debido a las especiales características orbitales de nuestro satélite), y otros criterios, no menos importantes, como que es un lugar adecuado desde el punto de vista de la observación astronómica o que el impacto de las radiaciones de superficie y de las diferencias de temperaturas entre el día y la noche son menos pronunciadas que en el resto de regiones de la Luna.

Extracción de los elementos volátiles del regolito lunar

Se han estudiado teóricamente varias formas para poder extraer estos elementos volátiles, aunque hay dos que parecen más adecuadas que el resto:

- Calentamiento del suelo lunar en bruto para conseguir llegar al punto de fusión de los volátiles y separarlos.
- Clasificación de las partículas del suelo lunar por tamaños para separar después los volátiles de los finos del regolito.

En general, se pueden extraer fácilmente los volátiles por simple calentamiento del regolito lunar. Los intervalos de temperaturas que se deben alcanzar y los compuestos que se forman por cada elemento son los siguientes:

- Hidrógeno:** se separa en forma de H₂O o H₂ a temperaturas entre 700 °C y 800 °C, aunque parte del hidrógeno no se separará hasta que no se llegue o se supere el intervalo entre los 1 050 °C y 1 100 °C.
- Helio:** se separa en forma de ³He y ⁴He entre un 60 % y un 70 % a temperaturas mayores de 700 °C, y totalmente a temperaturas cercanas a 1 000 °C.
- Carbono:** se separa en forma de CO, CO₂ y CH₄ a temperaturas entre los 700 °C y 800 °C, pero sólo por encima de 1 200 °C se obtiene en una cantidad importante.
- Azufre:** se separa en forma de H₂S y SO₂ a temperaturas superiores a 700 °C.
- Flúor:** se separa en forma de HF a temperaturas superiores a 700 °C.
- Nitrógeno:** se separa en forma de N₂ y una pequeña fracción de NH₃ a temperaturas entre 950 °C y 1 000 °C aunque, al igual que con el carbono, sólo se obtiene una cantidad sustancial por encima de los 1 200 °C.
- Cloro:** se separa en forma de HCl a temperaturas superiores a 700 °C.

Por tanto, si se calentara el regolito algo por encima de los 700 °C, se obtendrían ciertas cantidades de elementos volátiles. Pero si se llegara a temperaturas más altas (superiores a 900 °C – 1 000 °C), aunque se podrían obtener mayores cantidades de volátiles, se correría el riesgo de que se formaran compuestos no deseados o de que se produjera la fusión del regolito.

Para poder extraer los elementos volátiles del suelo lunar, la NASA está estudiando un prototipo de una máquina móvil basada en la energía solar y que se encargaría de todas las operaciones necesarias.

Su funcionamiento consistiría en la extracción del regolito, al que calentaría para separar los elementos volátiles y volvería a depositar el material sobrante en el suelo lunar mediante unos conductos laterales. Para calentar el regolito, se aprovecharía la energía solar mediante un espejo que concentraría la radiación solar incidente directamente o reflejada por una serie de espejos situados en el entorno de la mina lunar. En la Figura 4 se pueden observar dos imágenes virtuales que ilustran cómo funcionaría este prototipo sobre la superficie lunar, y en la Tabla 1 se reflejan las cantidades de volátiles, por hora y año, que podrían obtenerse trabajando con este prototipo.

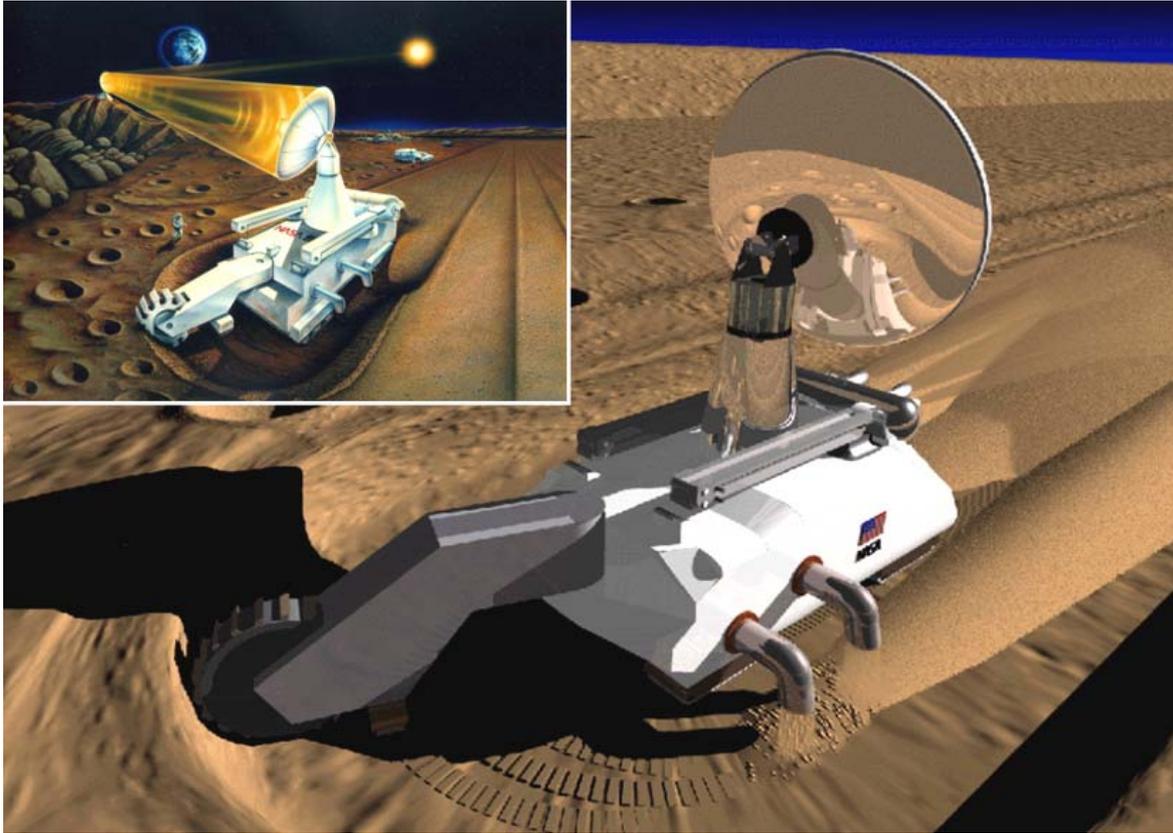


Figura 4: Prototipo para la extracción de volátiles por calentamiento del regolito.

Tabla 1: Cantidades de volátiles que se podrían obtener con el prototipo de extracción lunar.

Volátiles	Cantidad estimada obtenida	
	[g/h]	[t/año]
Nitrógeno (N₂)	2 224	8,767
Dióxido de carbono (CO₂)	6 672	26,301
Agua (H₂O)	12 788	50,410
Metano (CH₄)	6 116	24,109
Hidrógeno (H₂)	23 908	94,245
Helio (³He y ⁴He)	12 232	48,219

Extracción del oxígeno y de ciertos metales del regolito lunar

Con el fin de evitar que los costes del transporte desde la Tierra de materiales y compuestos necesarios para el desarrollo de la base lunar se hagan excesivamente elevados, será imprescindible la obtención de los mismos a partir de los propios recursos que nos pueda proporcionar la superficie de la Luna.

Una vez explotados los diferentes materiales que pueden proporcionar las minas lunares y, tras los procesos de preparación y separación previa de los mismos, se procedería a la extracción de

los elementos que nos puedan interesar para, posteriormente, ser almacenados o utilizados in situ para su transformación. Aunque son muchos los elementos naturales de la Luna que se pueden explotar, en la primera base lunar tan sólo se van a emplear procesos para la extracción de los más importantes y abundantes (como el oxígeno, el hierro y el titanio).

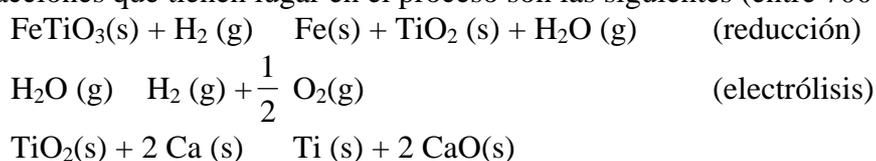
Para la extracción del oxígeno se han propuesto un total de 19 procesos, distribuidos en cuatro grandes grupos en función de las reacciones y la forma de extracción que tienen lugar:

- Procesos de interacción sólido/gas:
 - Reducción de la ilmenita con hidrógeno.
 - Reducción de la ilmenita con monóxido de carbono.
 - Reducción de la ilmenita con metano.
 - Reducción de cristales con hidrógeno.
 - Extracción con flúor.
 - Carbocloración.
 - Reducción con cloro (en reactor de plasma).
- Procesos de extracción en silicatos y óxidos fundidos:
 - Electrólisis de silicatos fundidos.
 - Electrólisis de silicatos fundidos con disolventes.
 - Electrólisis en disolución cáustica.
 - Reducción carbotérmica.
 - Oxidación parcial.
 - Reducción electroquímica indirecta de óxidos metálicos con litio.
- Procesos de pirólisis:
 - Pirólisis en fase vapor.
 - Reducción de la ilmenita (en reactor de plasma).
 - Separación de iones (en reactor de plasma).
- Procesos en soluciones acuosas:
 - Disolución ácida con HF.
 - Disolución ácida con H₂SO₄.

Para seleccionar el proceso más adecuado de todos se han tenido en cuenta una serie de criterios como son el ahorro de costes para la base lunar (al usarse los recursos propios de la Luna y evitarse los importados desde la Tierra), el coste por unidad de producción, la disponibilidad de la tecnología a aplicar (ya que algunos de los procesos son teóricos o tan sólo han sido probados experimentalmente en laboratorio) y las dimensiones finales que tendría la planta de recuperación de productos y los requisitos energéticos de la misma. En función de dichos criterios se seleccionó finalmente el proceso de **reducción de la ilmenita con hidrógeno**, por varias razones:

- Tecnología probada con éxito en procesos terrestres a gran escala.
- No tiene una química complicada (con lo que se requieren pocas etapas para la extracción y, en consecuencia, la planta necesaria será de menor tamaño).
- No requiere una gran cantidad de energía para llevarse a cabo.
- Se pueden obtener hierro y titanio, además de agua, como subproductos.

Las reacciones que tienen lugar en el proceso son las siguientes (entre 700 ° C y 1 000 ° C):



Los principales inconvenientes que presenta este proceso son, en primer lugar, que sólo la ilmenita se puede reducir con hidrógeno y no todo el regolito, con lo cual serían necesarios unos procesos previos de clasificación y separación del material bruto extraído del suelo lunar; y, en segundo lugar, que la cinética es algo lenta, ya que se requiere algo más de una hora para extraer el 70 % del oxígeno de la ilmenita. Por ello, será posible sustituir este proceso por alguno de los anteriormente citados si, durante los años previos al establecimiento de la base lunar, se comprobara su viabilidad de forma experimental con análogos terrestres del suelo lunar.

Además del oxígeno, será muy interesante la extracción de ciertos metales abundantes en el regolito lunar. Un buen ejemplo de ello sería la extracción del hierro y el titanio presentes en la ilmenita. Para ello se podría aprovechar el propio proceso de reducción de la ilmenita con hidrógeno (visto para la extracción del oxígeno) ya que, en este proceso, el hierro aparece como un subproducto del proceso y el titanio se puede obtener aplicando una nueva etapa para obtenerlo por descomposición del óxido de titanio. El proceso que se seguiría sería el siguiente:

- La ilmenita reacciona con carbono para reducir el FeO a Fe0.
- El hierro es clorurado a 800 ° C en un reactor de lecho fluido, mientras que el TiO₂ permanece inalterable.
- El FeCl₃ gaseoso es condensado y reacciona con oxígeno gaseoso a temperaturas entre 300 ° C y 350 ° C en un segundo lecho fluido para dar Fe₂O₃.
- El Fe₂O₃ puede ser reducido con carbono o con hidrógeno gas a una temperatura por debajo de 1 000 ° C para producir acero bajo en carbono o hierro.
- El CO o el H₂O formados podrían reciclarse para recuperar el oxígeno, mientras que el FeCl₃ se puede reducir con hidrógeno directamente a hierro metálico, a 700 ° C. El cloruro de hidrógeno formado como subproducto se puede reciclar.
- El residuo del proceso es TiO₂, que puede ser procesado para recuperar el titanio. Como el titanio forma un óxido muy estable, no se puede reducir con hidrógeno o con carbono como se hacía con el hierro, pero sí con calcio metálico. Para llevar a cabo esta reducción se utiliza el TiO₂ granulado y el calcio en polvo y se calientan hasta unos 925 ° C – 950 ° C durante varias horas, obteniéndose óxido de calcio (CaO) y titanio.
- El CaO se disuelve mediante un baño en lecho ácido, preferentemente con ácido acético, y el titanio se separa como producto del proceso.

La planta piloto de extracción tendría una producción anual de 1 000 t de oxígeno, 200 t de hierro y 100 t de titanio. El coste de producir estos materiales en la Luna es muy superior a lo que costaría su producción en la Tierra, sin embargo, la importancia de obtenerlos en la Luna radica en que de este modo se evita el tener que transportarlos desde la Tierra, cuyo coste sería infinitamente superior, con el consiguiente ahorro que se obtendría. Por tanto, estos materiales obtenidos serán para el propio consumo en la Luna, bien para ser almacenados (el oxígeno se utilizaría en parte para abastecer de combustible a las naves espaciales de transporte o a las que, en un futuro a medio y largo plazo, podrían llevar seres humanos a Marte u otros lugares del sistema solar) o bien para ser utilizados en la construcción y desarrollo de la propia base lunar o de otras bases y asentamientos futuros. También hay que tener en cuenta que con la extracción de otros elementos valiosos como volátiles, elementos de las tierras raras (muy abundantes en ciertas regiones lunares y en meteoritos) y ciertos minerales preciosos que se encuentren en los numerosos meteoritos que han impactado sobre la Luna, se pueden obtener importantes beneficios de ser exportados a la Tierra en las condiciones más adecuadas posibles.

Bibliografia:

Eckart, Peter (1999), *The Lunar Base Handbook*, Mc-Graw Hill, 850 p.
Schrunk, Davil et al (1999), *The Moon: resources, future development and colonization*, Wiley-Praxis, 432 p.
Spudis, Paul (1996), *The once and future Moon*, Smithsonian Institution Press, 308 p.
Kulcinski, Gerald (2004), *Extraction techniques: solar wind volatiles*, 35th Lunar and Planetary Science Conference.