

Introdução a Geologia Lunar

Material de apoio para estudo e compreensão da Lua.

Pesquisa: R.Gregio

Índice do Conteúdo

- Prefácio - A Lua da Terra**
- Capítulo I - O Sistema Terra-Lua**
- Capítulo II - A Origem da Lua**
- Capítulo III - A Órbita da Lua**
- Capítulo IV - As Eras Geológicas da Lua**
- Capítulo V - A Geografia Lunar**
- Capítulo VI - Geomorfologia Lunar**
- Capítulo VII - A Superfície Poeirenta da Lua**
- Capítulo VIII - Terrae e Mare Lunar - Os planaltos e as Planícies da Lua**
- Capítulo IX - As Crateras de Impacto da Lua**
- Capítulo X - Morfologia das Crateras de Impacto**
- Capítulo XI - Formação de Crateras Simples**
- Capítulo XII - Formação de Crateras Complexas**
- Capítulo XIII - Crateras Raiadas**
- Capítulo XIV - Outros Efeitos do Crateramento Lunar**
- Capítulo XV - Os Processos Tectônicos na Lua**
- Capítulo XVI - Vulcanismo na Lua**

Prefácio A Luna da Terra

Os antigos a chamavam Selene, Ártemis, Cíntia, Luna e muitos outros nomes ela recebeu em diferentes civilizações. Lua de Plantar, Lua de Colher, Lua da Flor, Lua do Morango, Lua do Caçador, Lua do Milho, Lua da Neve, Lua Gelada, Lua de Mel, Lua Azul! Deusa da Noite, os homens a adoraram e temeram desde a pré-história. Ela já foi inatingível, remota, terra dos poetas, dos boêmios, dos apaixonados sem amor, dos solitários astrônomos, dos sonhadores e dos casais enamorados. Foi cantada em verso e prosa, e verdadeiros hinos eruditos e populares foram compostos em sua homenagem. Mesmo após o homem haver conquistado a Dama da Noite ela ainda nos encanta e seduz, ela nos mostra o passar do tempo com suas lunações, mas ainda guarda sua misteriosa origem e muito há que ser conhecido sobre a bela Luna da Terra!

20 de julho de 1969 d.C.

"The Eagle landed."

(A Águia pousou.)

"This is a small step for a man, a gigantic jump for the humanity."

(Este é um pequeno passo para um homem, um gigantesco salto para a humanidade.)

*HERE MEN FROM THE PLANET EARTH FIRST SET FOOT UPON THE MOON.
JULY 1969, A. D.*

WE CAME IN PEACE FOR ALL MANKIND

(Aqui os homens do Planeta Terra pisaram na Lua pela primeira vez. Nós viemos em paz por toda a raça humana.)

Astronautas: Neil A. Armstrong (*Commander*)

Edwin E. Aldrin, Jr. (*Lunar Module Pilot*)

Michael Collins (*Command Module Pilot*)

- Tripulação Reserva: James Lovell (*Commander*). Fred Haise (*Lunar Module Pilot*). William A. Anders (*Command Module Pilot*)
- Objetivo da missão: Executar aterrissagem lunar tripulada e retorno seguro da missão. Coleta de dados e material lunar.
- Lançamento: 16 de julho de 1969; 09:32:00 a.m. EDT. Local - Complexo 39-A Kennedy Space Center, FL. - USA
- Alunissagem: 24 de julho de 1969; 12:50 p.m. EDT. Local: 13 graus 19 min Norte e 169 graus 9 min Oeste do Mare Tranquilitatis - Lua.
- Retorno: a 195:18:35 MET. Tripulação a bordo de U.S.S Hornet a 01:53 p.m. EDT; astronave a bordo navio às 03:50 p.m.

A realização do sonho começa com um compromisso público do então Presidente dos Estados Unidos da América, John F. Kennedy, no dia 25 de maio de 1961 em colocar um americano na Lua até o final da década de 1960. Até então, o Projeto Apollo havia sido toda a promessa. Mas... O sonho de voar para cima, em direção ao espaço, para longe, na conquista das regiões exterior à Terra não começou e nem termina aí... Muitos deram suas vidas e outras infelizmente ainda serão ceifadas para que o incansável espírito do homem avance em seu infindável caminho em busca da aventura e do conhecimento ampliando seus horizontes na procura dos mundos distantes. Para iniciar a maior aventura do século XX, o homem escolheu a Lua como seu primeiro objetivo. De certo modo, esta escolha já havia sido feito desde a época das cavernas quando o homem deixou a posição curvada e olhou para o céu. Pálida e brilhante em noites limpas e céus escuros nossos velhos ancestrais viram a bela Lua que se apresentava como uma tentação irresistível, quase como que um objetivo a ser atingido, talvez, por força do destino ou de sua insaciável curiosidade. Do sonho alado do mitológico Ícaro até a chegada do homem na Lua, a humanidade teve que superar obstáculos, desafios quase intransponíveis, entre ela e o caminho para o céu. Durante milênios, o homem se arrastou pela Terra, foi preciso dominar o fogo, os metais, a explosão, criar tecnologias, materiais e equipamentos, conquistar novas terras, fincar suas bandeiras no ponto mais alto da Terra, cruzar as últimas fronteiras polares e descer as profundidades abissais. Assim a humanidade foi criando as bases para dar o inevitável grande salto a tanto tempo almejado.

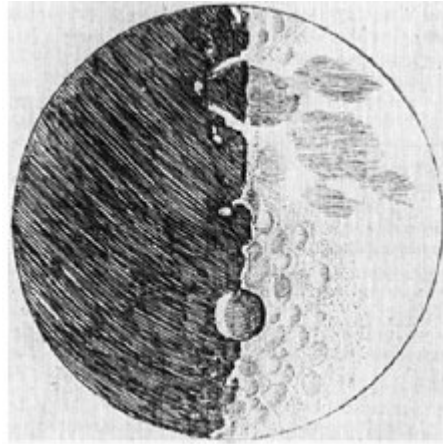


Figura: Desenho de Galileu Galilei da Lua conforme ele a via através de sua pequena luneta entre 1609/1610.

Transcorria o ano de 1610 pela época do Renascimento na Itália, quando nas noites dos dias 24 e 25 de abril, no terraço da casa do Duque de Bolonha, a Lua se aproximou repentinamente dos homens e lhes mostrou sua nova e desconhecida face. Homens importantes, nobres, sábios, estudiosos, homens de ciência, matemáticos e religiosos ali se haviam reunido e, incrédulos, perplexos, olhavam através de um simples tubo munido com lentes em ambas as extremidades. Eles não conseguiam acreditar naquilo que seus olhos viam. Galileu Galilei, o criador daquele pequeno instrumento óptico destinado a observação celeste, aos 46 anos de idade, lhes mostrava que a Lua lisa, plana e esférica dos filósofos da época era apenas sofisma. Pela primeira vez eles estavam vendo a verdadeira face da velha Luna; esburacada, cicatrizada, com montanhas e vales profundos, sem a poesia de sua tradicional imagem calma e serena pairando pelo céu escuro.

Sim, através de sua luneta, Galilei lhes apresentava a verdadeira Lua, pela primeira vez acessível ao homem em meados do século XVII. Assim, uma imensa janela se abriu para vasculhar o céu cada vez mais de perto e mais fundo, possibilitando ao homem entrever por ela as maravilhas nunca dantes imaginadas e, acima de tudo, perceber que o Universo é mutante; que nascimento, vida, morte e transformações acontecem a cada momento em proporções gigantescas.

Em sua longa caminhada pela Terra, o homem quer muito mais, quer alcançar outros planetas, alcançar outras galáxias, quem sabe outros universos e acima de tudo, descobrir vida inteligente em outras plagas celestes e com elas se comunicar. Afinal, o homem ainda não sabe responder de forma científica algumas incógnitas básicas que o atormenta desde sempre:

Quem somos?
De onde viemos?
Para onde vamos?
Estamos sós?

Como diria o famoso poeta e dramaturgo William Shakespeare: ' ' ... Eis a questão! ' ' . Contudo, e apesar do homem já ter pisado na Lua, ainda muita coisa há que ser descoberta e observada na Lua da Terra. E isso, sem sombra de dúvida, está ao alcance de nossos pequenos instrumentos.

Capítulo I

O Sistema Terra-Lua

A nossa bela Lua é um astro impar entre todas as luas encontradas até agora orbitando os planetas do Sistema Solar, e apesar de todos os esforços e estudos já realizados sobre nosso astro selênico, ainda há muito que ser desvendado sobre sua origem, formação, composição e evolução.

A Terra tem um satélite natural, a Lua, é mais de um quarto o tamanho de Terra (3,474 km em diâmetro), fazendo com que o sistema de Terra-Lua virtualmente pareçam um planeta duplo. Por causa de seu tamanho menor, a gravidade da Lua é um sexto da gravidade da Terra, como nos foi demonstrado pelos pulos gigantescos dos astronautas que pisaram na Lua.

A Lua da Terra é a quinta maior lua do Sistema Solar, maior até mesmo que o planeta Plutão. Ela apresenta uma órbita quase circular ($e=0.05$) inclinada a aproximadamente 5° em relação ao plano da órbita da Terra. Sua distância média do nosso planeta é de 384,400 km. A combinação do tamanho e distância da Lua da Terra faz com que a ela pareça no céu com o mesmo tamanho do Sol e é por essa razão que nós podemos ter eclipses totais do Sol.

O período de orbital da Lua é de 27.322 dias. Por causa deste movimento, a Lua parece mover aproximadamente 13° contra o fundo de estrelas a cada dia, ou aproximadamente a metade de um grau por hora. Se nós assistirmos a Lua em cima do curso de várias horas em uma noite, podemos notar que sua posição entre as estrelas mudará através de alguns graus.

A Lua não produz sua própria luz, mas nos a vemos luminosa no céu porque reflete a luz do Sol. Pense no Sol como uma lâmpada incandescente, e a Lua como um espelho, refletindo a luz da lâmpada incandescente. A Lua apresenta fases que mudam conforme a Lua orbita em torno da Terra e porções diferentes de sua superfície são iluminadas pelo Sol. A posição variável da Lua com respeito ao Sol conduz as fases lunares. Por causa do efeito na Lua de forças relativas a maré devido a Terra, o mesmo lado da Lua está sempre voltado de frente para a Terra, como também devido a que o período de rotação e o período de orbital da Lua são iguais. Como resultado disso, os observadores baseados na Terra nunca podem ver o ' ' lado distante' ' da Lua, também conhecido como 'face oculta' ' da Lua. Devido as forças relativas a maré dos planetas que as contém, muitas das luas de nosso Sistema Solar podem ter este tipo de órbita. A rotação da Lua está em fase com sua órbita, de modo que o mesmo lado está sempre voltado para a Terra. Na verdade, a Lua parece "dançar" um pouquinho (pelo fato de a sua órbita ser ligeiramente elíptica), de modo que apenas alguns graus da face oculta da Lua podem ser vistos em determinadas ocasiões, mas a face oculta, em sua maior parte, era completamente desconhecida até haver sido fotografado pela sonda soviética Luna 3 em 1959.

A Lua não possui atmosfera que possa ser detectada através de instrumentos. Dados recentes fornecidos pela sonda Clementine sugeriu que poderia haver gelo em algumas crateras próximas aos pólos da Lua, mas através de algumas experiências os dados resultaram insatisfatórios. Todavia ainda permanece a possibilidade de que possa existir

gelo misturado com o solo lunar, e principalmente no fundo das crateras que jamais recebem a luz do Sol.

A crosta da Lua tem em média 69 km de espessura e varia de 0, sob o Mare Crisium, a 107 km ao norte da cratera Korolev, no lado oculto do nosso satélite natural. Abaixo da crosta encontra-se um manto e, possivelmente, um pequeno núcleo. Entretanto, diferentemente do manto da Terra, o manto da Lua, muito provavelmente, não é suficientemente quente para apresentar-se derretido.

Curiosamente, o centro de massa da Lua é deslocado de seu centro geométrico em cerca de 2 km em direção à Terra. Além disso, a crosta é mais fina no lado visível.

Há dois tipos básicos de topografia lunar: os planaltos bastante antigos, de coloração mais clara e densamente craterizados e as maria de cor mais escura, relativamente planas e mais jovens. As maria (que compreendem cerca de 16% da superfície lunar) são enormes crateras de impacto que, posteriormente, foram inundadas por lava derretida. A maior parte da superfície lunar é coberta de rególito - uma mistura de fino pó e resíduos rochosos produzidos pelos impactos de meteoritos. Por alguma razão desconhecida, as maria estão centradas no lado visível. Além das familiares formações no lado visível, em seu lado oculto encontram-se a Aitken Bacia - no Pólo Sul - a maior bacia de impacto do Sistema Solar, com 2250 km de diâmetro e 12 km de profundidade - Orientale, na borda ocidental, que é um esplêndido exemplo de uma cratera de múltiplos anéis.

382 kg de amostras de rochas foram trazidas à Terra pelos programas Apolo e Luna. Devemos a elas a maior parte dos detalhes que hoje detemos sobre a Lua. Elas são particularmente valiosas porque podem ser datadas. A maioria das rochas da superfície lunar parece ter entre 4,6 e 4 bilhões de anos - um confronto casual com as mais velhas rochas terrestres, que raramente têm mais de 3 bilhões de anos. Assim, a Lua fornece pistas inéditas sobre a história pregressa do Sistema Solar.

Antes do estudo das amostras trazidas pelas missões Apolo, não havia consenso sobre a origem da Lua. Havia três principais teorias: a Co-creação, segundo a qual a Lua e a Terra teria se formado ao mesmo tempo a partir da Nebulosa Solar; a Fissão, que defendia a hipótese de que a Lua teria se originado da própria Terra; e a Captura, que postulava a formação da Lua em outro ponto do universo, sendo subsequentemente capturada pela Terra. Nenhuma dessas teorias mostrava-se plenamente satisfatória. Mas as novas e detalhadas informações trazidas pelas pedras lunares levaram à Teoria do Impacto: a colisão da Terra com um objeto de grande dimensão e a formação da Lua a partir do material ejetado. Ainda há detalhes que precisam ser elaborados, mas a teoria do impacto é agora amplamente aceita.

A Lua não possui campo magnético total como a Terra. Mas, algumas das rochas superficiais apresentam magnetismo remanescente, indicando que pode ter havido um campo magnético global no início da história da Lua. Sem atmosfera e campo magnético, a superfície da Lua está diretamente exposta ao vento solar. Durante seus 4 bilhões de anos de existência, muitos íons de hidrogênio oriundo do vento solar vieram a ser incorporados ao rególito da Lua. Assim, as amostras de rególito trazidas da Lua mostraram-se valiosas para o estudo do vento solar. Esse hidrogênio lunar poderá ser de utilidade, algum dia, como combustível para foguetes.

Dados Estatísticos Comparativos do Sistema Terra-Lua
(Segundo informação NSSDC, National Space Science Data Center).

	Lua	Terra
Massa (10 ²⁴ kg)	0.07349	5.9736
Volume (10 ¹⁰ km ³)	2.1973	108.321
Raio Equatorial (km)	1738	6378
Raio Polar (km)	1735	6356
Raio Médio em Volume (km)	1737.5	6371
Elipticidade	0.002	0.0034
Densidade Média (kg/m ³)	3340	5520
Gravidade de Superfície (m/s ²)	1.62	9.78
Velocidade de Escape (km/s)	2.38	11.2
GM (x 10 ⁶ km ³ /s ²)	0.0049	0.3986
Albedo Vinculado	0.067	0.385
Albedo Geométrico Visual	0.12	0.367
Visual magnitude V(1,0)	+0.21	-3.86
Irradiação Solar (w/m ²)	1380	1380
Temperatura de Corpo Negro (K)	274.5	247.3
Alcance Topográfico (km)	25	20
Momento de Inércia (I/MR ²)	0.394	0.3308

Parâmetros Orbitais da Lua (em relação à órbita da Terra)

Semi-eixo maior (10⁶ km): 0.3844
 Perigeu (10⁶ km): 0.3633
 Apogeu (10⁶ km): 0.4055
 Período de Revolução (dias): 27.322
 Período Sinódico (dias): 29.53
 Velocidade Orbital Média (km/s): 1.023
 Inclinação Orbital (graus): 5.145
 Período de Rotação Sideral (hrs): 655.728
 Inclinação Equatorial (graus): 6.68

Capítulo II

A Origem da Lua

Os Modelos Hipotéticos da Origem Lunar

Nossa compreensão da história da Lua foi revolucionada pelas Missões Apollo e outras missões não tripuladas nas últimas décadas. Apesar disso, muito ainda nos é desconhecido. Desde muito tempo o homem tem tentando encontrar uma explicação para a origem do astro mais próximo da Terra, a Lua. Para tanto, vários modelos e suas respectivas vertentes e adaptações foram engendrados, mas, pelo menos até agora, nenhum deles explica completamente ou de forma muito convincente a origem da nossa bela Lua. O modelo mais aceitável hoje em dia, mas não completamente, é o da hipótese da Colisão - um corpo do tamanho relativo de Marte teria se impactado com a Terra a aproximadamente 4.6 bilhões de anos e cujo material ejetado em órbita pelo impacto se condensou para formar a nossa bela Lua. Ainda há detalhes que precisam ser elaborados, mas a hipótese do impacto é agora amplamente aceita.

Hipótese da Diferenciação

Alguns cientistas postulam que, apesar de suas particularidades, o sistema Terra-Lua teria nascido simultaneamente, como planeta principal e satélite natural (lua), através de condensações da nebulosa primordial que deu origem ao Sistema Solar. Contudo, esse modelo não está livre de objeções. Primeiro porque seria precioso encontrar uma explicação da diferença de densidade entre ambos os corpos - formados a partir de material situado na mesma região do espaço e de constituição que supostamente teria sido homogêneo, isto é, teriam a mesma natureza. Segundo, ao crescerem as massas da Terra e da Lua, por agregação do material encontrado ao longo de suas órbitas, seria mais provável que a Lua se precipitasse sobre a Terra para formar um corpo único, ou então que escapasse à atração da Terra, transformando-se em um planeta independente.

A Hipótese da Captura

Esse modelo sobre a origem da Lua pressupõe que ela e a Terra teriam sido formadas em diferentes regiões do Sistema Solar e que, devido a circunstâncias não muito bem explicadas, em algum momento no passado, a Lua teria sido capturada pela Terra. Embora esse modelo seja compatível com as diferenças observadas entre as densidades de ambos os corpos a densidade média da Lua não coincide com a de nenhum dos demais planetas do tipo terrestre. Todavia, isso poderia ser explicado se a Lua tivesse sido formada como planeta independente em outra região do espaço diferente à dos planetas rochosos, mas, se isso fosse correto, as dificuldades para um processo de captura da Lua pela Terra teriam sido quase impossíveis, maiores ainda que no caso de se supor que ambos os astros tenham nascido relativamente próximos no espaço. Muitas das luas que cercam outros planetas realmente são asteróides capturados e não são objetos que se formaram no mesmo lugar junto com o planeta mãe, ou foi então lançado em órbita pelo planeta mãe. Um sinal que uma lua realmente é um asteróide capturado é que ele apresenta uma forma não esférica, isso é, uma forma angular como uma rocha e não arredondada como um planeta. Luas como estas são as duas luas de Marte; Phobos e Deimos. Outro sinal que uma lua pode ser capturada é se ela orbita em uma direção oposta ao do planeta mãe. Um exemplo de uma lua deste tipo é a lua de

Netuno Triton. A nossa Lua apresenta estas duas características: é arredondada e orbita a Terra na mesma direção orbital. Estas são as duas evidências mais diretas que a Lua não é um objeto capturado. Se a Lua fosse um objeto capturado isso explicaria por que a Lua e a Terra não parece serem feitas do mesmo material. Por outro lado, existem algumas preposições que contradizem este modelo de captura.

A Hipótese da Co-Formação

O modelo da co-formação explica a origem da Lua como um objeto que se formou ao mesmo tempo e, asperamente, fora da nebulosa solar primitiva no mesmo lugar que a Terra, enquanto ambos os astros estavam se formando na nebulosa solar, o núcleo da Lua, então chamado protolua retirou seu material da nuvem de gás e pó ao redor deles. Como a protolua está assim perto da prototerra o material da nebulosa da qual ambos se formaram devia ser bem parecido, composto principalmente de material rochoso em lugar de gases voláteis. A hipótese da co-formação explica por que a Lua aparece na localização que está, mas não explica a evidência que a Terra e a Lua não parecem ser feitas do mesmo material.

A Hipótese da Expulsão por Colisão ou Fissão

Atualmente, a hipótese que melhor explica quase todas as evidências da formação da Lua aponta para um modelo em que a Lua foi expulsa através da colisão. Neste sentido, a Lua se formou dos escombros lançados da Terra quando um grande objeto, possivelmente comparado as dimensões de Marte, se chocou com a Terra. Simulações deste modelo mostraram que a energia gerada em uma tal colisão produz um fluxo de rocha vaporizada do impacto. A Lua teria se formado desse material que esfriou. Esta teoria explica muita das propriedades conhecidas da órbita e composição da Lua. O material lançado teria fundido em ou teria se aproximado do plano da eclíptica colocando a Lua em uma órbita semelhante a que ela apresenta hoje. Acredita-se que a Lua tem um pequeno caroço férreo e poderia ter retido este caroço quando da colisão. Os elementos voláteis teriam se vaporizado durante o impacto. Esta hipótese também poderia ter inclinado o eixo da Terra e poderia ter causado as estações que nós vemos acontecer agora. O problema com este modelo é que não parece muito provável, embora objeções para a teoria baseada em considerações do impulso angular entre os dois objetos estiveram resolvidos em recentes modelos de computador.

Hipótese da Fissão 1

Em 1880, George H. Darwin (filho do naturalista Charles Darwin) elaborou um modelo hipotético em que, a princípio, a Terra era um astro solitário, e que em algum momento de sua evolução, as oscilações provocadas pelas marés do globo terrestre entraram em ressonância (em física: vibração enérgica que se provoca num sistema oscilante quando atingido por uma onda mecânica de frequência igual a uma das suas frequências próprias; reforço da intensidade de uma onda pela vibração de um sistema que tem uma).

frequência própria igual à frequência da onda.) com a frequência da oscilação natural do próprio globo, resultando em que um grande pedaço de massa da Terra que permaneceu a girar em torno dela dando origem a Lua. A fragmentação dessa grande massa rochosa deve ter produzido no planeta uma enorme cicatriz, a qual se supõe seja hoje em dia preenchida pelo Oceano Pacífico.

Alguns consideráveis indícios servem de apoio a essa hipótese. Se por outro lado, o fato

de a densidade média de a Lua ser semelhante à das camadas superficiais da Terra; por outro lado, as observações vêm demonstrando que, com o decorrer do tempo, a Lua tem se afastado da Terra em cerca de 2 a 3 centímetros por ano. Invertendo o processo e regredindo no tempo, chegou-se a conclusão que, há cerca de uns 4 500 milhões de anos atrás, a Lua estava muito próxima da superfície terrestre. Uma outra inconsistência se refere a questão do chamado Limite de Roche, isto é, a menor distância em que um corpo pode se encontrar de seu astro principal, sem que as marés provoquem sua desintegração. No caso da Terra, essa distância é de cerca de 2,9 raios terrestres, o que faz duvidar que a Lua tenha estado mais próximo da Terra que esta distância limite. Mais um ponto contra essa teoria se refere aos cálculos realizados no início do século XX por Moulton e mais tarde por Jeffrey e Littleton, torna claro que uma grande massa arrancada da Terra pelas forças das marés deveria ter voltado a cair sobre ela ou, caso contrário, acabaria escapando para sempre da atração gravitacional terrestre.

Hipótese da Fissão 2

Uma outra hipótese sugere que a Lua teria se formado a partir da fissão de uma Terra em seus estágios iniciais quando nosso planeta ainda não se havia resfriado e antes que fosse revestido de uma crosta sólida. Assim, antes que a massa planetária houvesse atingido um grau de resfriamento suficiente para nele se operar a solidificação, uma massa desse material, um verdadeiro glóbulo líquido, se destacou do plano equatorial da Terra, plano no qual a força centrífuga é maior, e, em virtude das mesmas leis que regem os movimentos dos planetas, adquiriu um movimento de translação ao redor do seu planeta gerador. Assim teria nascido a Lua, cuja massa, menos considerável que a da mãe Terra, deve ter sofrido um resfriamento muito mais rápido. As condições em que se efetuou a desagregação da Lua lhe permitiram, com dificuldade, distanciar-se da Terra, e a constrangeram a permanecer suspensa em seu céu, como uma figura meio ovalada cujas partes, as mais pesadas, formaram a face voltada para a nós, e cujas partes menos densas ocuparam a face que fica escondida da Terra. Isso explicaria duas naturezas essencialmente distintas na superfície da Lua; uma sem nenhuma analogia possível com o a Terra, porque os corpos fluídos e etéreos lhe são desconhecidos; a outra, ligeiramente parecida com a terrestre, uma vez que todas as substâncias, as menos densas, se assentaram sobre essa face (face oculta da Lua).

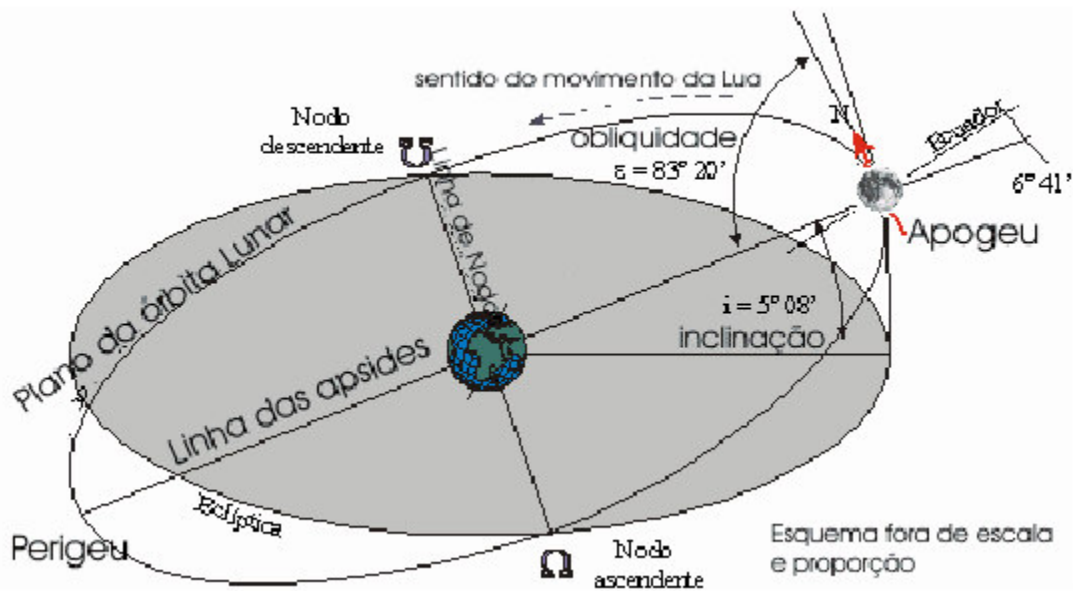
Hipótese da "Origem Comum por Fragmentação"

Entre as idéias desenvolvidas de forma incompleta no aspecto teórico, um modelo interessante pressupõe uma origem comum da Lua, da Terra e de Marte. Um planeta primitivo, que ao contrair-se aumentava a velocidade de rotação, teria se dividido em dois fragmentos desiguais que se distanciaram, mantendo-se unidos por um filamento, como se fosse uma ' ' ponte' ', de material. Ao separarem-se definitivamente, a ' ' ponte' ' deu origem a uma espécie de ' ' gota' ', a qual permaneceu em órbita do fragmento maior, a Terra. A Lua seria a ' ' gota' ' e o fragmento menor seria o planeta Marte.

Capítulo III Órbita Lunar Cálculo da posição aproximada da Lua

O cálculo da posição da Lua é razoavelmente complicado, pois incluem de maneira apreciável também o Sol e a Terra. Por isso veremos somente algumas das intrincadas características da órbita lunar.

A Lua gira ao redor da Terra descrevendo uma elipse cuja excentricidade é de $1/18$ ($e = 0,054900$) e a uma distância média de 384.403 km que corresponde a 60,2665 raios equatoriais. A excentricidade da Lua bastante maior que a órbita da Terra ao redor do Sol ($1/60$) fazendo com que a distância da Lua até nós varie bastante ao longo de uma órbita de 363.300 km correspondendo a 56 raios no perigeu, e até 405.500 km correspondendo a 64 raios no apogeu e isso no transcurso de meio mês. Isto se comprova facilmente medindo o diâmetro aparente do disco lunar devido à mudança da distância e que eles flutuam de $32' 42''$ no perigeu e de $29' 22''$ no apogeu. A uma distância corresponde a um semidiâmetro de $15' 32''$.



Crédito de imagem: Mario Gaitano Játiva.

<http://www.mailxmail.com/curso/excelencia/astronomia>

Se determinados a Ascensão Reta e a Declinação lunar mediante observação para um período lunar e desenharmos estes pontos sobre a esfera celeste, o resultado será um círculo cercado a eclíptica e que cortará a eclíptica em dois pontos o nó ascendente W onde a Lua cruza a eclíptica passando do sul ao norte e o nó descendente. Estes pontos foram chamados Draconícos na antiguidade porque se acreditava que nestes pontos (que é onde ocorrem os eclipses) os dragões esperavam a Lua em sua travessia. Esta denominação foi conservada quando se trata de falar sobre revolução draconítica e a inclinação da órbita lunar em relação a da eclíptica é de $i = 5° 8' 43''$. A revolução draconítica é o intervalo de tempo que separa duas passagens consecutivas da Lua pelo mesmo nó de sua órbita, e

vale 27,21222 dias; também chamada de mês draconítico, mês nódico, revolução nódica, período draconítico, período nódico.

A Lua em seu movimento avança de Oeste para Leste com um movimento muito rápido que em média vale $n = 13^{\circ}10' 35''$, porém, devido a elevada excentricidade e a Segunda Lei de Kepler seu movimento sobre a esfera celeste é extraordinariamente não uniforme. Por essa lei a Lua se separa de seu movimento médio e uma quantidade chamada Ec. de Centro que em primeira ordem vale $C = 2e \sin M$. Assim a Lua adianta ou atrasa até $C_{max} = 180 \times 2e/p = 6^{\circ},30$. Porém, este movimento que seria o existente se a Lua e a Terra estivessem isoladas seria muito complicado devido a confluência da gravitação solar e planetária. Estes efeitos gravitacionais suplementares fazem com que a órbita lunar não obedeça exatamente a Leis de Kepler, sofrendo perturbações entre as quais as mais importantes são:

1 - Retrogradação da Linha dos Nodos: A linha de interseção da órbita da Terra com a da Eclíptica não é fixa, mas retrógrada em cerca de 19.3° por ano, quer dizer que da uma volta em sentido retrógrado em 6.798 dias (18 anos e 224 dias) variando em média por dia - $3.17724' = 0.052954^{\circ}$. Assim $W = W_0 - 0.052954t$. Sem dúvida esta retrogradação dos nodos não é uniforme. Desaparece em dois momentos do ano quando a posição solar coincide com os nodos, pois nestes momentos a componente ortogonal da força perturbadora do Sol desaparece.

2 - Avanço da linha das apsides ou avanço do perigeu lunar: O eixo maior da elipse lunar se move em sentido direto uns $40^{\circ}.7'$ por ano dando a volta completa em 3232.6 dias (8 anos e 310 dias) movimento análogo ao que a Terra efetua só que muito mais rápido pois está usa 21.000 anos. O avanço é de $0^{\circ}.111404 = 6^{\circ}.68424$. Sem dúvida a longitude do perigeu lunar não varia uniformemente e nem sequer avança sempre. Pela ação combinada das componentes normais e tangenciais da atração solar o perigeu avança e retrocede alternadamente, porém o avanço supera a retrogradação na média exposta.

3- O ângulo de inclinação sofre oscilações periódicas: Passa de $5^{\circ}0' 1''$ a $5^{\circ}17' 35''$ em um período de 173 dias. Seu valor médio é de $5^{\circ}8' 43''$.

4 - A excentricidade da órbita lunar varia: Desde $0^{\circ}.0381$ a $0^{\circ}.0719$ em um prazo aproximado de 210 dias. Seu valor médio é de $0^{\circ}.054900$. Isto faz com que a teoria do movimento lunar seja extremamente complicado, por exemplo, a Longitude celeste lunar se expressa por uma série que contém 655 limites e a latitude por outros que contém 300.

Como a órbita da Lua é elíptica e seu eixo de rotação é inclinado em relação a perpendicular do plano orbital, se produz um efeito conhecido como Libração (longitude e latitude) e isso permite que vejamos, de nossa posição na Terra, algo mais que a metade da superfície lunar, em torno de 59%.

A Libração em Longitude se deve ao fato que a Lua gira uniformemente em relação a seu eixo, de modo que o movimento orbital é mais rápido em torno do perigeu (quando a Lua está mais próxima da Terra), e mais lento quando a Lua está no apogeu (mais longe da Terra), de acordo com a segunda Lei de Kepler. Portanto, um determinado detalhe na superfície lunar, que no perigeu e no apogeu se encontra justamente em cima do meridiano do lugar, estará a Leste do meridiano quando a Lua está entre o perigeu e o apogeu, e a Oeste do meridiano quando a mesma a bela Luna está entre o apogeu e o perigeu.

A Libração em Latitude se deve a inclinação do eixo de rotação da Lua em relação a perpendicular do plano orbital, nos permitindo ver um pouco mais de sua superfície polar, alternando uma maior visão do pólo Sul Lunar ou do pólo Norte. Este período de libração em Latitude é igual ao mês Draconítico, como já vimos acima.

A Libração Diurna ou Paraláctica depende do lugar de observação na superfície da Terra. Dois observadores que se encontram localizados em dois pontos diferentes na Terra vêem em um mesmo momento regiões um pouco diferentes da superfície Lunar.

Astrônomos como Brown, Laplace, Damoiseau, Hanse, Delaune e outros consagraram suas vidas a estudar as desigualdades do movimento lunar e calcular sua amplitude, o que determina sua importância. Foram estudadas 1500 e delas restaram só umas 500 que resultaram imprescindíveis para estabelecer com precisão a posição lunar.

As irregularidades mais importantes e que são consequência das variações dos elementos orbitais são:

Eveccção [Do lat. evectione.] - A maior irregularidade do movimento da Lua, e a primeira que foi descoberta. Origina-se da variação de excentricidade da órbita lunar, e provoca mudança na direção da força de atração solar. A correção da Eveccção depende de $C - L - Ls$ diferença entre as longitudes da Lua e do Sol e da anomalia média lunar Mn segundo a expressão $Ev = 1.2739 \text{ sen } (2C - Mm)$. Sua amplitude é de $1^{\circ}16'$ e seu período é de 32 dias. Sendo que foi descoberta por Tolomeo.

Ec. Anual - Desigualdade na longitude lunar devido a variação da distância do Sol-Terra e cauda o movimento elíptico desta. A Ec. Anual depende da anomalia média do Sol M e seu valor é $Ae = 0.1858 \text{ sen } M$, sua amplitude é de $11' 9''$ e seu período é de 1 ano anomalístico, isto é, o período de uma revolução completa da Terra em torno do Sol, referido à passagem pelo periélio, e que equivale a 365 dias, 6 horas, 13 minutos e 53 segundos médios.

Variação - Se deve ao movimento lunar no centro do campo gravitacional solar, pois sofre mais atração quando está em fase de Lua Nova (novilúnio) que quando está em plenilúnio, Lua Cheia. A correção a aplicar é de $V = 0.6583 \text{ sen } 2(l' - Ls)$ sendo l' a longitude lunar corrigida do avanço da eveccção do perigeu. ec. anual, etc. Seu período é o mês sinódico, isto é, revolução sinódica.

Irregularidade paraláctica - Com idêntica razão de existir que a anterior (variação), talvez seja a mesma irregularidade, faz com que a Lua se atrase em média 4 minutos ao chegar ao Primeiro Quarto (Lua Crescente) e adiantar outros 4 minutos ao chegar ao Último quarto (Lua Minguante). Mediante cálculos se fala que a causa deste avanço e atraso é que a distância solar é de 389 vezes a distância da Terra e disso resulta um valor de $1UA = 149.5$ milhões de Km.

Pequeno Glossário

Apside (sí). [Do gr. apsis, ' abóbada' , pelo lat. apside.] Ponto da órbita de um astro, no qual este se encontra mais afastado, ou menos afastado, de seu centro de atração.

Nodo - Cada uma das interseções da órbita de um corpo celeste com determinado plano de referência.

Nodo ascendente - Aquele ponto no qual o planeta, em seu movimento orbital, passa do hemisfério sul para o hemisfério norte.

Nodo descendente - Aquele em que o planeta, em seu movimento orbital, passa do hemisfério norte para o hemisfério sul.

Revolução - Movimento de um astro em torno de outro.

Revolução anomalística - Intervalo de tempo necessário para que um astro descreva a sua órbita, a partir do periastro, e que usualmente se refere à Lua, valendo, neste caso, 27,5546 dias; período anomalístico, mês anomalístico.

Revolução sinódica - Intervalo de tempo que separa duas faces idênticas e consecutivas de

um astro. Revolução sinódica da Lua que corresponde a 29,53059 dias; mês lunar, lunação.[Sin. ger.: período sinódico, mês sinódico.]

Revolução sinódica dos nodos - Intervalo de tempo que separa os dois instantes em que o mesmo nodo da órbita lunar tem a mesma longitude celeste.

Nota: O método para encontrar a posição lunar é o mesmo para qualquer planeta, salvo em alguns aspectos: Os termos corretivos que tem que ser aplicados e que nem a longitude do perigeu e nem a nodal podem ser consideradas constantes.

Capítulo IV

As Eras Geológicas da Lua

Estratigrafia

Resumo

Pequeno Glossário

A geologia planetária é o estudo da origem, evolução, e distribuição de matéria sólida condensada na forma de planetas, satélites, cometas, e asteróides. O termo geologia é usada aqui em seu sentido mais amplo para designar o estudo das partes sólidas dos planetas. Dessa forma, os aspectos de geofísica, geoquímica, geodésica, cartografia, e outras disciplinas relacionadas ao estudo de corpos sólidos estão incluídas no termo geral, Geologia.

A craterização por impacto foi um processo geológico sempre presente ao longo da história do Sistema Solar, e é provável que crateras e bacias que foram formadas por esses eventos afetaram significativamente a formação das crostas planetárias em suas respectivas formações iniciais e isso inclui a Terra. As crateras de impacto também provêm essenciais meios de estabelecer cronologias planetárias e lançar luz sobre as histórias evolutivas das populações de projétil. Os processos que degradam, correm, e modificam uma superfície planetária, em especial a lunar, devem ser mais bem entendidos através da cronologia das crateras e da formação das bacias.

Datação

Para melhor estudar e compreender a evolução da geologia lunar, os Geólogos adotaram uma evolução de tempo para a história geológica lunar semelhante à linha cronológica secular conhecida por ' ' Eras' ' da história geológica da Terra. A estimativa da formação da Lua apontam para provavelmente cerca de uns 4.6 bilhões de anos atrás pelo impacto de um planetóide de consideráveis dimensões com nossa própria Terra.

A Lua foi imprensada por tantos meteoritos e outros objetos que as cicatrizes deixadas por eles, as crateras, são as marcas desses impactos e podem ser usadas para datar a época desses eventos. Além disso, as rochas que as missões lunares tripuladas americanas e a da sonda robótica soviética, ajudaram muito nesse estudo de datação. A história antiga da nossa Terra é dividida em períodos de acordo com os diferentes espécimes fossilizados encontrados nas rochas terrestres, como por exemplo, bactérias, trilobites, dinossauros, samambaias, troncos de árvores, peixes, conchas, ossos, etc. Obviamente, este método de marcar a escala de tempo não pode funcionar na Lua. Ao invés disso, nós marcamos o tempo na Lua medindo a idade de crateras de impacto. As crateras de impacto são excelentes como marcadores de tempo porque elas são eventos instantâneos, e cujas marcas não sofreram erosão de fenômenos atmosféricos ou da água, sendo, portanto muito bem preservadas, embora tenha havido erosão por sucessivos impactos e conseqüentes

desmoronamentos e também haja vestígios de elementos trazidos pelo vento solar. O choque de um grande impacto cria novo mineral radioativo que é fácil de serem datados em laboratório. As amostras de rochas trazidas pelas missões que pousaram na Lua foram datadas desse modo. Os grandes impactos também esparramaram materiais ejetados (escombros) em cima de uma grande distância e assim eles podem ser encontrados muito longe de seu local de origem, o que permite datar regiões extensas da Lua.

A maioria das bacias de impacto gigantes que foram analisadas, formaram-se durante o período Nectarian. Isto significa que o período de Bombardeio Pesado é calculado haver sido de 3.9 a 3.5 bilhões anos atrás. Foram usadas quatro crateras de impacto específicas para datar objetos na lua: Nectaris Bacin, Imbrium Bacin, e as crateras Eratosthenes e Copernicus. Amostras de cada uma destas crateras tiveram suas idades datadas em laboratório. A história lunar é esculpida então para cima de 5 épocas diferentes, divididas em quando cada cratera foi formada.

A Estratigrafia Lunar

Eras (segundo os sistemas lunares)	Início (datas aproximadas)	Duração (dados aproximados)
Coperniciana	1800 (1.2 bilhões anos)	1800
Eratostheniana	3300 (3 bilhões de anos)	1500
Imbriana	3800-3850 (3.85 bilhões anos)	~500
Nectariana	4150-4200 (3.92 bilhões anos)	200-300
Pré-Nectariana	4560 (4.6 bilhões de anos)	~400

Idade das bacias Lunares

(final do período de bombardeamento)

Era	Bacia	Idade de formação (bilhões de anos)
Imbriana inferior	Imbrium, Orientale	3.8
Nectariana superior	Serenitatis, Fecunditatis, Tranquilitatis.	intermediário
	Crisium, Nectaris.	~3.9

Nota: Ao pesquisarmos os dados do início do tempo de cada Era da história geológica lunar encontramos algumas discrepâncias e por isso foram colocados entre parênteses.

Após os vôos da Apollo e outras missões lunares, ficamos conhecendo um pouco mais da história geológica da Lua após seu nascimento e devemos a elas a maior parte dos detalhes que hoje conhecemos sobre a Lua.

382 kg de amostras de rochas foram trazidas a Terra pelos programas das missões Apollo. Estas amostras lunares são particularmente valiosas porque podem ser datadas. A maioria das rochas da superfície lunar parece ter entre 4,6 e a 3,9 bilhões de anos enquanto as

rochas mais velhas terrestres raramente têm mais de 3 bilhões de anos. Assim, a Lua fornece pistas inéditas sobre a história pregressa do Sistema Solar.

Os cientistas lunares designaram o período mais antigo da história geológica lunar como sendo a Era Pre-Nectarian, assim chamada porque descreve as condições da Lua em sua formação até um período muito menor (mas ainda considerável até onde a Lua concerne) impacto que criou a bacia do Mare Nectaris; período esse que foi quando a Lua sofreu o período mais violento de transformações durante sua história geológica.

Se a teoria do oceano de magma está correta, é bastante provável que este oceano original pode ter sido consequência de um impacto gigante com a Terra. Alguns cálculos sugerem que um tal impacto pudesse ter derretido até um terço do objeto impactor e da Terra. Se o impacto original não proveu a energia de calor necessária para formar o oceano de magma, ou se o efeito do choque ejetou o material para fora como os restos do impactor e que se reformaram

e esfriaram em órbita de Terra, há outros mecanismos que poderiam responder pelo oceano de magma. Por exemplo, um acreção dos escombros do Sistema Solar primordial pela Lua muito jovem, o não era um processo muito calmo, mas que teria envolvido impactos muito enérgicos capaz de derreter as capas exteriores da Lua para criar o oceano de magma. O calor lançado teria afundado o ferro metálico, mais pesado, durante a formação do caroço central, o que poderia ter provido a energia para o derretimento, como também pode ter sido uma interação relativa a maré com a Terra.

As missões Apollo descobriram quantias enormes de urânio radioativo, tório e isótopos de potássio na crosta lunar que teria lançado quantias enormes de calor se assumido que eles existiram em concentrações semelhantes ao longo da crosta e manto da Lua jovem.

Eventualmente o oceano de magma teria esfriado, mas não antes de ferver e volatilizar elementos como a água, sódio e potássio. Feldspatos de *plagioclase* (plagioclásio) de baixa densidade *anorthosite* (anortoclásio) foram para o topo do oceano de magma, formando a crosta sólida. Debaixo da crosta de *anorthosite*, os magmas teriam continuado a esfriar e solidificar até a profundidade de 1100 km - o que foi determinada por experimentos pela onda sísmica das missões Apollo como a localização do limite entre as zonas sólidas e fundidas. Todavia, vários fatores podem ter contribuído para que a Lua tivesse originalmente um enorme oceano de lava fluida. Os resultados obtidos pelas pesquisas lunares indicam que a Lua é principalmente sólida, e que apenas o caroço interno, de raio de 600 km, ainda hoje permanece parcialmente fundido. Sismos lunares ainda acontecem no manto a profundidades de 600 a 800 km debaixo da superfície, e assim sabemos que a Lua não está completamente quieta ou morta, como anteriormente era pensamento de alguns. Há evidência que interações relativas desses sismos tenham como gatilho as marés de Terra porque muitos destes sismos tendem a acontecer quando a Lua está em perigeu ou apogeu. O oceano de magma provavelmente tenha se solidificado a aproximadamente 4.2 bilhões anos atrás.

A Era de Nectarian seguiu a Era Pre-Nectarian e começa com o grande evento de impacto que criou o Mare Nectaris, uma bela forma oval escura facilmente visível em binóculos no quadrante sudeste da Lua. Este evento aconteceu à cerca de 3.92 bilhões anos atrás, onde aconteceram significantes numerosos impactos por meteoróides na Lua durante este período e criaram uma bacia de impacto de multianéis cujo anel exterior é preservado em parte como na Escarpa de Altai. A maioria significativa daquilo que aconteceu na Era de Nectarian é o que os cientistas chamam de "recente bombardeio pesado" ou "cataclismo terminal". Durante este período que terminou a mais ou menos 3.9 bilhões anos atrás

asteróides pequenos dinamitaram mais de quarenta bacias de impacto grandes da crosta lunar jovem.

As missões Apollo provaram que as terras altas, chamadas de *terrae* ou *highlands* (crosta) apresentam rochas de locais extensamente separados. Apesar de ser de lugares que estavam muito distante um do outro, a datação por isótopo destas rochas mostraram idades que chegam ao redor de 3.9 bilhões anos. Isto sugeriu que a maioria das terras altas da Lua foi formada a uns 3.9 bilhões anos atrás. Esta foi uma surpresa aos geólogos lunares, que anteriormente haviam pensado que as idades seriam mais próximas a 4.2 bilhões anos, quando o oceano de magma solidificou.

Claramente os impactos que formaram as bacias teriam reajustado os relógios geológicos desta crosta das *highlands* numa escala de 3.9 bilhões anos. Estas rochas, inclusive as brechas (*breccias*), mostraram sinais de choque de impacto, o que foi identificado nas amostras trazidas da Lua para a Terra. O bombardeamento pesado da superfície lunar durante a Era Nectarian também foi responsável pela criação da funda capa de 2 km de rególito (*regolith*) que pulverizou a crosta.

Seguindo-se a Era de Nectarian temos a era chamada de Era Imbrium porque começa com o impacto gigante que formou o Mare Imbrium a uns 3.85 bilhões anos atrás, não longo depois do fim do recente bombardeio pesado. O impactor que formou o Imbrium provavelmente era um asteróide uns 100 km de diâmetro, sendo que sua colisão com a Lua causou uma explosão catastrófica que esculpiu uma enorme cratera circular onde há agora uma área escura facilmente visível ao olho desnudo.

O Mare Imbrium domina o quadrante noroeste da Lua e mede 1500 km por suas planícies de lava. O impacto do Imbrium teria estremecido demais a Lua o que provavelmente teria provocado numerosas fraturas e um vigoroso período de vulcanismo lunar na magra crosta lunar ainda jovem. Isso teria permitido que quantias enormes de lavas aflorassem para cima da zona do poço de fundição, o qual não estava tão longe debaixo da superfície neste período da história geológica da Lua. Em cima dos próximos 700 milhões de anos, estas lavas encheram as bacias de impacto de quarenta ou mais crateras de impacto esculpidas durante a Era Nectarian precedente e é por isso que hoje nós vemos estas áreas coloridas de tons mais escuros.

As lavas lunares foram, de longe, produzidas de formas diferentes das lavas produzidas pelos vulcões terrestres. Amostras de basaltos lunares colecionadas por astronautas das Apollos mostraram que as lavas eram menos viscosas que as da Terra. Experimentos de laboratório mostraram que a lava lunar tem a consistência de óleo magro de motor, não bastante espesso para construir os comés de vulcões de proteção que são encontrados em nosso planeta. Estas lavas magras teriam tido uma tendência para se juntar em lagoa ao término da erupção, cobrindo muitos dos tubos de lava e outros sinais de vulcanismo que é estranhamente raro na Lua. Mas elas eram bastante densas para se acentuar e fraturar dando forma aos *rilles* concêntrico que podemos ver hoje ao redor das margens de muitas regiões dos mares lunares, inclusive do Mare Humorum. É possível que os cumes de ruga misteriosos, ou pelo menos alguns deles, também foi produzido deste modo. Contudo, como explicar a quase ausência de lava em regiões de Maria na face não visível da Lua? A melhor resposta para esta desconcertante pergunta provavelmente é que não houve nenhum impacto nas proporções da escala que formou a bacia Imbrium (face visível da Lua) no lado distante da Lua quando a crosta lunar estava bastante magra para permitir o afloramento de um poço de lava. De qualquer forma, devemos nos lembrar que a profundidade na face distante da Lua é bem maior que a da face visível. Ao final da Era

Imbrium, 3. 15 bilhões anos atrás, a crosta lunar tinha solidificado a uma profundidade onde as lavas estavam muito fundas para subir à superfície e havia terminado o período de difusão do vulcanismo. Por este tempo a Lua já se parecia em muito com o que vemos hoje, com todas as Maria principais e as terras altas.

Seguindo a cessação do vulcanismo lunar, entra o período mais longo da história geológica lunar, a Era Eratosthenian, com duração de aproximadamente de 3 bilhões a 1.2 bilhões a anos atrás. Sendo que nesse longo período não houve nenhum impacto cataclísmico no estilo da Era Imbrium que encheu o mare de lava. Ao invés disso, a Lua experimentou um pouco de vulcanismo durante este tempo, e muitos impactos modestos de meteoróides que, mais de 2 bilhões anos, gradualmente corroeu as encostas das terras altas e pulverizou a superfície, suavizando e arredondando o aparecimento de não só as montanhas lunares, mas de quase todos os outros aspectos da topografia da Lua. Certamente muitas formações foram completamente destruídas pelas Eras de impactos de meteorito, e é provável tanto evidência de anéis de impacto múltiplos ou foi obliterada ou foi feito obscurecimento por este processo, como podemos presenciar na região Eratosthenes / Copernicus que inclui as crateras nomeadas para este período da história geológica lunar e o próximo.

O período mais recente da história geológica lunar aconteceu ao término da Era Copernican, e assim foi nomeada porque a grande cratera Copernicus foi formada não muito longe do começo desta Era. Começando aproximadamente acerca de 1.2 bilhões anos atrás, a Era Copernican se caracteriza por poucos eventos de impacto moderados que criaram crateras relativamente novas como Copernicus e Tycho. Ambas as crateras apresentam sistemas de raios (raias) bem preservados o que evidencia suas relativas jovialidades das características lunares de eventos do passado.

Resumo

Pelo menos aparentemente, a história geológica da Lua também pode ser dividida em Eras, tal como a da Terra, para que sua evolução seja mais bem compreendida. As datas são apenas marcos para diferenciar um período de outro e podem não ser exatas.

Era Pré-Nectariana - Qualquer coisa que aconteceu na Lua antes de 3.9 bilhões de anos atrás é considerado pertencente ao Pre-Nectarian. Os eventos incluem a solidificação de um oceano de magma na crosta lunar e a formação da Lua. Este seria o período mais antigo da história da Lua quando sua superfície estaria coberta por quilômetros de oceanos de lavas completamente fundidas. Aos poucos, este oceano de lava fundida começou a se consolidar. O material mais leve e menos denso flutuou em direção a superfície, que posteriormente veio a se tornar crosta primitiva de anortosito. Segundo estudos, essa crosta de anortosito foi quebrada a uma profundidade de cerca de 2 quilômetros pelo impacto constante de meteoritos, cometas e pedaços de asteroidais. Durante este período houve um intenso bombardeamento de objetos impactantes que formando as crateras das terras altas, também chamadas de terrae, as quais representavam a crosta lunar primitiva e que tudo indica foram formados entre 4.3 e 4.2 bilhões anos atrás.

Era Nectariana - Segundo dados encontrados esse período aconteceu entre 3.9 a 3.8 bilhões de anos atrás. A Era Nectariana é demarcada pela bacia de impacto Nectaris, e seu material ejetado (região de Janssen e formações de Descartes). Nectaris é uma das bacias de crateras mais velhas da Lua, suas extremidades estão danificadas e assim é difícil vê-la. A cratera tem aproximadamente 860 km, com o Mare Nectaris no centro. As formações mais proeminentes do período Nectarian são 13 grandes bacias formadas de super massivos

impactos. Tudo indica que todas as outras bacias de impacto antigas foram formadas durante este período. A cerca de 4.1 bilhões de anos atrás teve início o período de vulcanismo e prosseguiu até o meio da Era Imbriana.

Era Imbriana (em torno de 3800 a 3,300 ou 3,2 bilhões de anos atrás). O surgimento da bacia do Mare Imbrium assinala o início da Era Imbriana. Quando um enorme meteorito teria se chocado com a superfície lunar e formado uma grande bacia de impacto que lançou ejeta (material ejetado) por cerca de 1400 quilômetros em todas as direções, cobrindo em torno de 16 % da superfície lunar. Grande parte desse material ejetado veio a se tornar a região de Fra Mauro, Alpes e formações em Cayley. A bacia Orientale (Mare Orientale) provavelmente também foi formada durante este período.

Os gigantescos impactos que formaram as bacias racharam a crosta de anortosito e a lava preencheu seu interior. Boa parte da área coberta por lava basáltica foi formada durante um período que durou mais ou menos aproximadamente 500 milhões de anos, formando as chamadas terras baixas, que conhecemos por mare ou maria. As formações do período Imbrian incluem: Formação de cratera de impacto Orientale. Massivo vulcanismo durante este tempo. Formação das maria e início do enchimento das bacias de impacto do período Nectarian.

Era Eratostheniana (cerca de 3,300 a 1,800 bilhões de anos atrás) Durante os primeiros 100 milhões de anos da Era Eratostheniana as lavas basálticas continuaram a se espalhar pelas terras baixas. Posteriormente a Lua começou a se resfriar como um corpo de forma geosférica, mas continuou a sofrer impactos meteoritos e algum vulcanismo esporádico. A Era Eratostheniana é representada por crateras de impacto ainda bem preservadas. As formações do período Eratosthenian são principalmente as crateras escarpadas mas sem nenhum raio. Os últimos vulcanismos lunares aconteceram durante o início do período Eratosthenian. A Cratera Eratosthenes mede 58 km e está na extremidade sul-oriental do Mare Imbrium. É bastante velha, pois que seu material de ejeta foi obliterado, mas é jovem o bastante porque a própria cratera não está estropiada.

A Era Coperniciana (mais ou menos de 1,800 bilhões de anos atrás até hoje). A Era Coperniciana é marcada por crateras mais jovens que ainda apresentam os raios ou raias do material ejetado delas, como por exemplo, as crateras de Copernicus e Tycho. Ao que parece, algum fluxo de lava em pequena escala ainda acontecia no início dessa Era. Embora possa parecer que as atividades geológicas tenham atualmente cessado, a Lua não é um astro morto, sem nenhuma atividade geológica. Ocorrências de fenômenos de escape de gases, TPL, e atividades sísmicas ainda são detectados na bela Lua. A maioria dos objetos citados como sendo Copernican são as crateras com raios frescos. Copernicus é uma cratera de 93 km, mas proeminente ao sul do Mare Imbrium. Copernicus tem raios luminosos que saem dela. Isto é onde o material foi lançado para fora da cratera pela força do impacto

Pequeno Glossário

Anortosito / anortoclásio (*anorthosite*) - Mineral triclinico do grupo dos feldspatos, mistura de silicato de alumínio e sódio com silicato de alumínio e potássio. Anortita - Mineral triclinico, do grupo dos feldspatos (plagioclásio), silicato de cálcio e alumínio.

Brechas (breccias) - Fragmento anguloso, consolidado por cimentação, e que pode resultar do quebramento de uma rocha por processos tectônicos, ou de fragmentos de blocos vulcânicos, ou de cascalhos angulosos sedimentados.

Era - Ponto determinado no tempo, que se toma por base para a contagem dos anos.

Período geralmente longo, que principia com um fato marcante ou que dá origem a uma nova ordem de coisas. Em termos da geologia planetária é a divisão básica do tempo geológico contado cronologicamente, o qual abrange vários períodos da história geológica de um planeta ou lua.

Estratigrafia - (trà). [De estrati- + -grafia.] Geol. Estudo da seqüência, no tempo e no espaço, das rochas da litosfera, e bem assim de suas relações genéticas, suas condições pretéritas de formação e sua paleogeografia. Como vimos no início, embora esse termo seja usado para definir coisas da Terra, ele também é usado para todos os outros corpos do Sistema solar, com exceção do Sol, que é uma estrela.

Plagioclásio (plagioclase) - Série de minerais triclinicos (Que tem três ângulos desiguais, os quais se cortam em ângulos oblíquos) do grupo dos feldspatos, que se obtêm por meio de misturas isomorfas de albita e anortita em todas as proporções. São estes os termos intermediários: oligoclásio, andesita, labradorita e bytownita.

Raio - Cada um dos traços ou dos objetos retilíneos que, partindo de um centro, se distribuem em todas as direções, à maneira dos raios luminosos. Algumas crateras lunares possuem raios ou raias luminosas que normalmente partem do centro de origem do objeto impactores.

Regolito ou rególito (*regolith*) - Camada superficial desagregada, proveniente da ação das intempéries, que recobre a rocha fresca e cuja espessura varia entre alguns centímetros e dezenas de metros.

Rille ou Rima - Longos canais na Lua que cruza a superfície das maria; provavelmente formados como um canal aberto em um fluxo de lava, ou como um tubo de debaixo do solo que levava a lava quente e que se desmoronou quando a lava fluiu para fora. Essas trincheiras ou sulcos podem ser sinuosas, angulares ou lineares.

Sistema cristalino - Conjunto de eixos cristalográficos cujas posições referentes no espaço e cujos valores dimensionais definem e classificam os cristais em sete categorias: sistema monométrico ou isométrico, tetragonal ou quadrático, hexagonal, trigonal, ortorrômico, monoclinico e triclinico. Sistema triclinico - Sistema cristalino que pode referir-se a três eixos desiguais oblíquos.

Capítulo V A Geografia Lunar

Os nomes estranhos que você vê nos mapas da Lua vêm de idéias mais antigas sobre a Lua em tempos passados quando ninguém sabia como era de fato a superfície da lunar, e assim foi assumido que as áreas escuras e claras eram continentes e oceanos. ' ' Mare“ é a fórmula latina para mar (plural = maria), e muitas pequenas planícies lunares são chamadas de ' ' lagos' ' e ' ' baías' ' .

A Lua foi mitologicamente associada a loucura, e por isso algumas de suas características foram nomeadas por estados da mente, tempo e outros conceitos abstratos. As grandes crateras foram nomeadas com nomes de destacados cientistas, estudiosos e artistas todos falecidos.

As crateras pequenas são primeiro determinado com os nomes comuns da terra e outras recebem a designação de uma letra (A, B, C, D, etc) conforme sua proximidades com

crateras maiores e/ou que foram formadas pelo material de rebote do mesmo impacto. Nossa Lua é um mundo rochoso com paisagens pálidas - de tonalidade mais clara, quebradas e rugosas chamadas ' *highlands* ' que são as terras elevadas ou planaltos; e planícies escuras e mais lisas chamadas ' maria ' . *Highlands* (também chamadas *terrae*) são muito mais cicatrizadas com crateras que variam em tamanho de buracos minúsculos menores que um dedo para vastas bacias com mais de 2600 quilômetros de diâmetro. As maria são extensas planícies, bastante lisas e com menos crateras que cobrem aproximadamente 16% da lua. Elas tendem a apresentar forma circular porque freqüentemente se localizam dentro de enormes bacias de cratera de grandes impactos. Também há significantes *landforms* (formações de terras) de menor tamanho, como os *vallis*, *hilles*, *ridge*, *graben*, canais de lavas, montanhas, picos, fendas e outras formações não visíveis a olho desarmado.

Quando os astronautas cavaram a superfície da Lua durante o programa de Apollo, eles estavam fazendo mais que desenterrar sedimento seco e escuro. Eles foram os primeiros viajantes do tempo em um mundo desolado e antigo muito bem preservado.

As rochas e sedimentos trazidos para a Terra pelas missões que pousaram na Lua contêm pistas vitais para tentarmos saber como o sistema Terra-Lua foi formado, a natureza e o tempo de derretimentos ocorridos mais cedo, a intensidade do bombardeio de impacto e sua variação com o tempo, e até mesmo a história do Sol. A maioria desta informação, partes cruciais da história da Terra e planetas, não pode ser aprendida estudando as rochas da Terra porque nosso planeta ainda é geologicamente ativo e sobre intensa erosão que apagou muito do registro original de nosso planeta. As pistas foram perdidas em bilhão de anos de construções de montanhas, vulcanismo, desgaste, e erosão. As colisões das placas tectônicas, chuvas candentes de material expelido por vulcões, antigos impactos de meteoritos e outros processos físico-químicos apagaram muito da história da Terra, especialmente os anos mais cedo antes de quatro bilhões anos de atrás.

Em seu auge a Lua foi geologicamente ativa, produzindo uma ordem fascinante de produtos, mas sua máquina geológica não era tão vigorosa e por isso todos os registros de eventos ocorridos mais cedo não foram perdidos em sua maior parte, mesmo porque, como a Lua é bem menor que a Terra, ela se resfriou muito rapidamente. Seus segredos ficaram registrados em suas crateras, planícies, planaltos, rochas e poeira. Todavia, o entendimento da Lua requer outras técnicas, como cartografia geológica através de fotografias de alta resolução, dados colhidos por sondas colocadas em torno da Lua, o estudo das características análogas as da Terra (por exemplo, crateras de impacto), e experimentos em laboratórios. Além disso, ainda se fazem necessários novos pousos tripulados em regiões não abrangidas pelas missões anteriores, como por exemplo, no pólo sul da Lua onde, talvez possa existir água congelada no fundo de crateras que nunca são iluminadas pela luz solar.

Com tudo o que sabemos até agora da Lua, ela ainda guarda intrigantes e instigantes mistérios, como também detalhes e fenômenos anômalos que precisam ser mais bem observados e entendidos. Mas o estudo da Lua não se restringe apenas através de sondas orbitais e pousos humanos na Lua. A bela Luna pode e deve ser estudada através de nossas observações com instrumentos e mesmo a olho desarmado de nossa posição na Terra. A Lua é o astro mais íntimo da Terra e por isso podemos sem muito esforço observar sua superfície muito facilmente e até em detalhes, dependendo é claro, da resolução e do tipo de nossos instrumentos. A Lua é um vasto mundo a ser observado e explorado de forma sistemática e científica por nossos instrumentos daqui de nosso próprio quintal.

Capítulo VI Geomorfologia Lunar

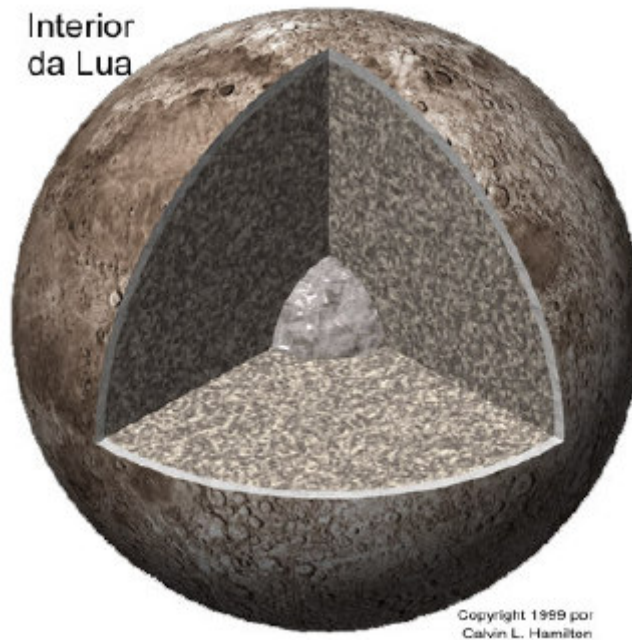


Figura: Este esquema mostra as três maiores divisões (ou camadas) do interior lunar, a crosta (seção mais externa), o manto e o núcleo. A espessura da crosta lunar varia de dezenas de quilômetros de profundidade (por baixo das bacias dos mares) até pouco mais de 100 quilômetros em algumas regiões dos planaltos lunares, com uma espessura média de cerca de 60 a 70 quilômetros. O raio do núcleo mede entre 300 e 425 quilômetros. (Copyright 1999 por Calvin J. Hamilton)

<http://www.solarviews.com/homepage.htm>

Baseado nas análises feitas a partir de dados coletados pelas sondas espaciais e outros instrumentos, foi elaborada uma teoria sobre o interior lunar, formada pela crosta composta de basaltos; mais abaixo o manto médio, que é formado pelo mesmo material da crosta, mas que sofre alterações devido ao aquecimento provocado pelos grandes impactos que deram origem aos mares; o manto inferior é composto de material no estado plástico; e o pequeno núcleo ou caroço que seria constituído basicamente de ferro, pouco níquel e talvez enxofre.

O pouco que conhecemos do interior lunar vem principalmente do monitoramento sísmico dos abalos lunares, e de instrumentos a bordo de astronave localizadas em órbita da Lua. Durante as missões das Apollo 12, 14, 15, e 16, foram colocados sensíveis instrumentos sísmicos na superfície lunar. Estes instrumentos descobriram que a Lua sofre abalos sísmicos moderados, alguns dos quais originados no manto superior e algum mais fundo. Eles também registraram impactos ocasionais (alguns naturais e alguns provocados artificialmente pelo homem – impacto projetado de astronaves) na superfície lunar. Monitoramentos como o tremor provocado por impacto e tremores próprios da Lua é possível estudar as ondas sísmicas de frequências variadas que se

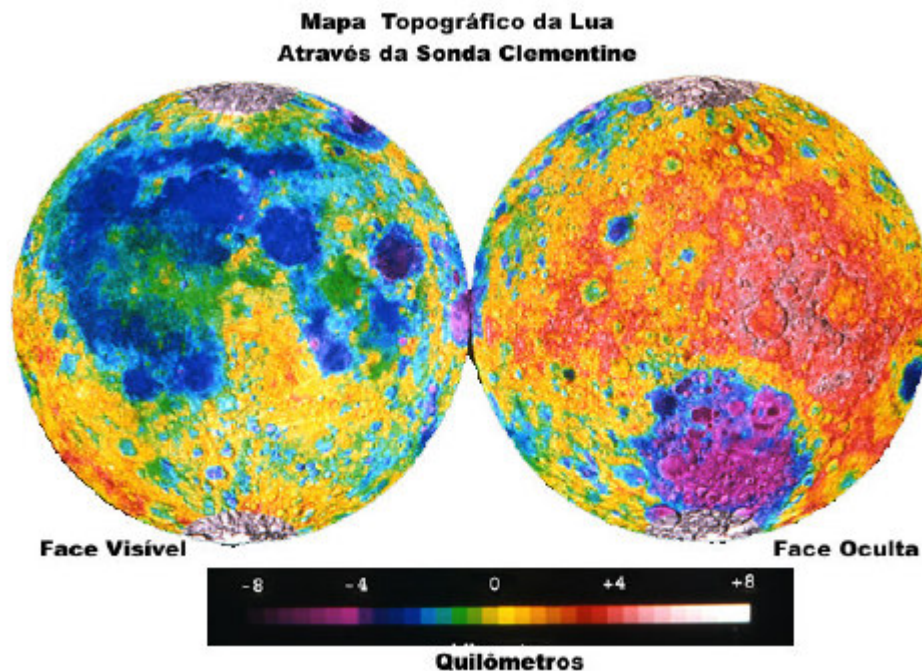
propagam pelo interior e superfície da Lua, possibilitam aos cientistas obter informação sobre a natureza do interior lunar.

Adicional entendimento do interior da Lua nos vem da cartografia de gravidade, indiretamente mapeada por sondas localizadas em órbita lunar, através das quais conseguimos obter informações da estrutura e espessura da crosta.

Baseado em informações primeiramente coletadas durante a era Apollo, os cientistas sugeriram que a Lua foi formada quando um corpo do tamanho de Marte bateu na Terra durante sua história mais cedo. Este impacto teria acontecido depois que o caroço de ferro da Terra havia se formado. Assim, o material rochoso da crosta da Terra pobre em ferro foi lançado em órbita e então se fundiu para formar a Lua. Recentemente, a sonda Lunar Prospector confirmou que a Lua tem um caroço pequeno, o que apóia a teoria de impacto.

A evidência científica indica que o caroço lunar contém menos de quatro por cento da massa total da Lua, com o valor provável de 2% ou pouco menos. Isto é muito pequeno quando comparado com a Terra cujo caroço férreo contém aproximadamente 30 % da massa do planeta

Semelhanças na composição mineral da Terra e a Lua indicam que elas compartilham uma origem comum. Porém, se ambos os corpos foram formados simplesmente da mesma nuvem de rochas, gás e poeira, a Lua teria um caroço (núcleo) semelhante em proporção a dos materiais do núcleo da Terra.



As missões que chegaram a Lua através de sondas robóticas e tripuladas demonstraram a complexidade das formações geológicas na Lua. O conjunto de dados existente até agora é, porém, insuficiente para revelar de forma detalhada o desenvolvimento geomorfológico em uma escala global da Lua.

Os melhores dados que temos sobre algumas restritas áreas da face lunar voltada para a Terra. Por exemplo, a espaçonave Clementine proporcionou dados globais de só 100

metros por pixel, o que é muito menos que a resolução das melhores imagens realizadas pelas missões Apollo.

A Lua apresenta um formato amoldado em formato de ' ' pêra' ' ou ' ' ovo' ' com seu eixo maior ligeiramente apontando para a Terra. A distribuição da massa lunar não é esférica e os centros da geometria lunar e gravidade estão localizados separadamente em aproximadamente 2 km.

A crosta do lado ou face oculta da Lua (lado distante) que nunca está voltado para a Terra, é composto de anortosito (*anorthositic*) relativamente claro e pode ter pouco mais de 100 km de espessura, enquanto a crosta lunar visível de nossa posição da Terra é mais magra (menos espessa) - cerca de 60 km, e inclui muitas intrusões densas e lavas basálticas.

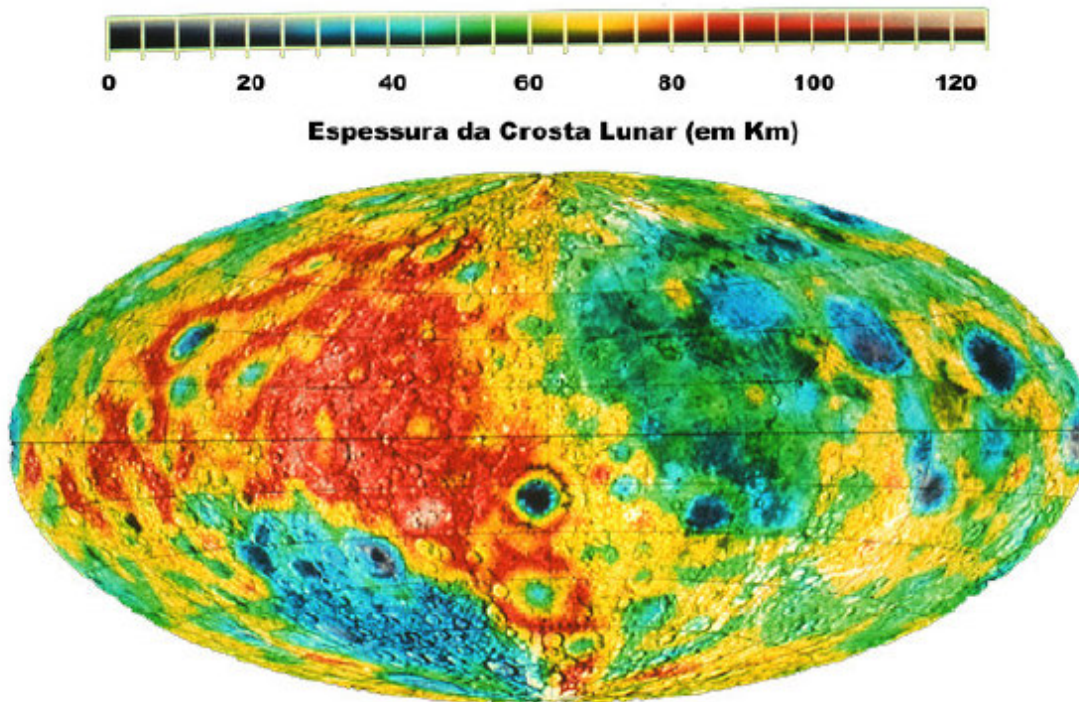


Figura: Mapa Global da Espessura da Crosta Lunar

Porém, o conhecimento do interior da Lua é muito pouco conhecido e nós precisamos de novas medidas para resolver sua distribuição de massa e estrutura mais exatamente. No decorrer da história da geologia lunar, numerosos impactos de várias proporções foram as mais efetivas ocorrências que deformaram sua superfície. A crosta superior foi fraturada, derretida, escavada e misturada através de numerosos impactos e recoberta por camadas esparramadas de ejeta de impacto de diferentes tamanhos.

Os maiores projéteis que se chocaram contra a Lua resultou na formação de bacias de impacto maior as quais podem ser tão grandes quanto mais ou menos dois mil quilômetros em diâmetro e vários quilômetros de profundidade. Normalmente elas têm espessas capas de lava até o ponto que a profundidade original delas ser difícil de serem achados. Beira, paredes, cumes centrais e anéis de crateras, raias e bacias são modificadas através de posteriores impactos.

Os efeitos dos grandes impactos são especialmente difíceis de estudar por causa da idade deles e a existência de eventos múltiplos dentro da mesma área. As formações de ejeta das principais bacias de impacto podem ser usadas para separar as unidades de pré e pós-impacto. Medidas exatas podem sugerir rever a antiga geologia lunar.

Várias crateras e ejeta são detalhes gerais que nos permite identificar os processos envolvidos na formação, envelhecimento e deformação das estruturas de superfície. Podem ser estudados as estruturas de anel, diferença de gravidade, topografia e outros conjuntos de dados.

As maiores bacias de multianéis são as amplas estruturas mais características e a maioria dos eventos influenciou toda a crosta da Lua. O evento ocorrido no Pólo Sul, na *Aitken Basin*, pode ter descoberto material até mesmo do manto lunar. O desenvolvimento geológico de bacias principais pode prover respostas para as perguntas de como foi a origem e a história mais cedo da crosta lunar e manto, e como mais recentes forças deformaram a estruturas da crosta.

A idéia de endogeneidade silenciosa da Lua tem que ser re-pensada quando estudamos as primeiras épocas da história lunar. A idéia de um antigo oceano de magma lunar tem que ser levada em conta e temos de admitir que a maioria das velhas formações da superfície lunares participou em larga escala para os processos endógenos globais.

As bacias lunares mais velhas tiveram uma história endógena (*originado no interior do organismo, ou por fatores internos*) bastante longa e complicada. Isto é demonstrada intensivamente no caso de algumas velhas grande bacia de impacto modificada. Até mesmo se parte da deformação foi causada através de eventos de impacto subsequentes que estas velhas estruturas também foram re-trabalhadas através de processos internos lunares. Interiores cheios de lava indicam atividade interna e há numerosas indicações que a crosta lunar antiga era, pelo menos em alguns lugares, bastante magras para permitir a compensação isostática (*equilíbrio geral da crosta ao flutuar sobre o substrato fluido*) escavada do furo de impacto e o mais recente abastecimento espesso de lava.

Muitas bacias grandes de impacto próximas as laterais das maria têm cumes compressional em sua lava, enchimento tensional ou radial de *grabens* concêntrico ao redor delas, indicando que a crosta sofreu dobramento, possivelmente, pelo menos em parte, devido ao peso do abastecimento de lava. A crosta lunar foi assim comprimida dentro da bacia cheia de lava enquanto seus ambientes foram estirados e fraturados dando lugar para o entendimento e formação de *graben*. As bacias muito mais velhas deveriam ser as mais interessantes neste respeito porque a compressão delas deveria ter sido mais intensa. As imagens de tais bacias lunares e estruturas de anel têm de ser estudadas juntamente com a sua gravidade, topografia, composição e outros conjuntos de dados para um entendimento mais exato. Ainda há numerosas falhas geológicas e outra estrutura tectônica a serem achadas na Lua e sua morfologia de superfície pode ser estudada em imagem de alta resolução.

Tectonicamente, a maioria das áreas ativas também apresentou freqüente vulcanismo. Mudanças na topografia lunar podem ser achadas estudando detalhes em pequena escala; e em alguns casos podem ser identificadas as direções de fluxo de *rilles* sinuosos e suas mudanças ao longo do tempo. As crateras localizadas fortuitamente espalhadas por toda a superfície lunar podem ser importantes para os estudos do leito rochoso da Lua. Detalhes de várias crateras refletem as características desse leito rochoso. Beira, cobertura de ejeta e cume central de qualquer cratera lunar indica efeitos de um impacto

particular em um ambiente geológico especial.

A assinatura espectral das rochas de superfície frescas revela a composição. Crateras frescas e *grabens* provêm cortes de teste na crosta e podem permitir até mesmo uma cartografia em 3D da capa rochosa do leito superior.

Medidas em Altimetria (*Altimetry*) permite inspeção da forma lunar global e topografia. A medição de altimetria juntamente com imagem em estéreo dará uma visão melhorada ao desenvolvimento da superfície local e processos que estiveram ativos no caso de uma formação em particular. A utilização de ângulos variados de iluminação do Sol faz o uso dos dados mais reveladores. Junto com dados de gravidade este conjunto de informações dará melhor idéia da distribuição da massa interna lunar, estrutura e desenvolvimento. Há numerosas estruturas geológicas lunares que provêm tarefas para futuros estudos.

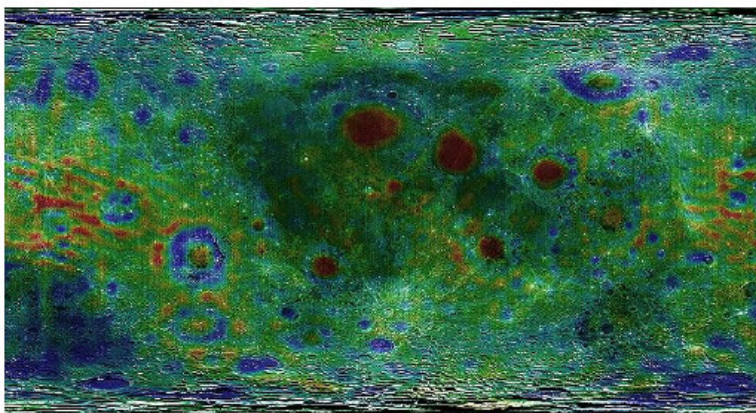
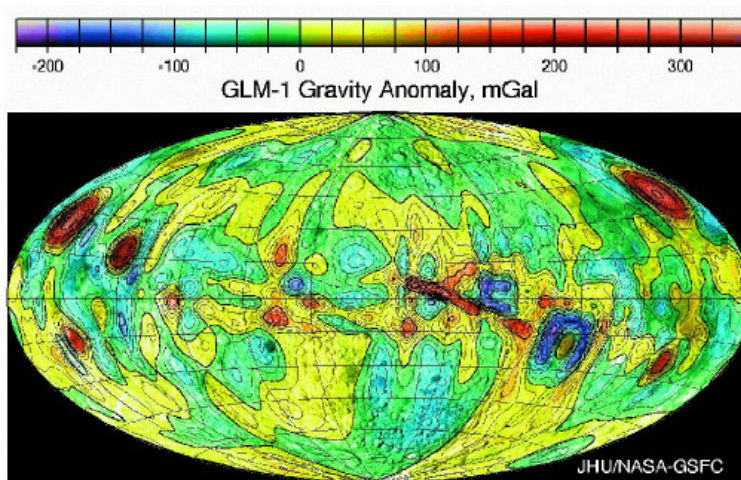


Figura: Mapas da Gravidade na Lua. Crédito JHU/NASA, GSFC



A quantidade de atividade tectônica e tensões envolvidas pode ser calculada estudando os movimentos de falhas, encolhimento da crosta ou compressão da superfície, mas estes só são possíveis ser achados por detalhes revelados em imagem de alta resolução, preferencialmente com uma boa cobertura de imagens em estéreo. Também é interessante e importante estudar como as estruturas tectônicas refletem interiores lunares.

A superfície lunar que nós vemos agora é resultado de vários eventos e a importância

deles varia de um lugar a outro na superfície lunar. Ainda há grandes áreas pouco conhecidas na Lua e devido à resolução e dados espectrais restritos, há uma urgente necessidade de mais dados obtidos em alta resolução.

Capítulo VII

A Superfície Poeirenta da Lua

Há quem diga que ao ver a paisagem coberta com lava fresca na área do Vulcão Kilauea, no Havaí, que ela se parece com a da Lua. Mas, isso não é bem verdade. A lava fresca que fluiu do Kilauea e outros vulcões ativos é normalmente de um cinzento escuro e estéril como a Lua, mas as semelhanças param por aí. A superfície lunar é tipo de um cinza carvão e arenosa, com uma provisão considerável de finos sedimentos.

Meteoritos que se imprensaram contra o solo lunar em cima de bilhões de anos moeu em pó e jogou para cima a antiga superfície. Como a Lua não tem virtualmente nenhuma atmosfera, até mesmo os meteoritos mais diminutos golpeiam uma superfície indefesa a uma velocidade cósmica de pelo menos 20 km/sec. Até mesmo estes pedregulhos que foram formados por último, talvez levem alguns cem milhões de anos, antes que eles sejam moídos em pó pela chuva inexorável de projéteis de alta velocidade. Claro que, um objeto de maior impacto ocasional acontece, e escava a rocha fresca em baixo da manta de sedimento pulverulento, e isso acontece de forma lenta, mas inevitavelmente.

A manta pulverulenta que cobre a Lua é chamada de rególito (*regolith*) lunar, um termo que é usado para definir a camada de escombros produzidos de forma mecânica nas superfícies planetárias. Muitos cientistas também chamam este material de "terra lunar" (*lunar soil*), mas não contém nenhum material orgânico como acontece nas terras da Terra. Algumas pessoas usam o termo "sedimento" ou então "terra" para denominar o rególito lunar. Embora esse material esteja por toda a Lua, a capa de rególito é magra tendo aproximadamente dois metros nas maria mais jovem e talvez 20 metros nas superfícies mais velhas das terras elevadas (*highlands*).

O rególito lunar é um material bastante misturado. Por um lado, misturou o material local de forma que uma pá desse material contém a maioria dos tipos de rochas que acontecem em uma área. Contém alguns fragmentos de rochas lançadas através de impactos e até mesmo de diferentes regiões da superfície, pois o material ejetado é projetado muito longe de seu local de origem. Assim, o rególito é formado por uma grande coleção de rochas diversificadas. Também contém o registro de impactos que ocorreram de cem milhões a um bilhão de anos passados, informação essa, crucial para entender a taxa de impacto na Terra durante aquele tempo. Por outro lado, este registro de impacto até agora não é muito claramente descrito e nós ainda não estamos perto de entender isto de forma concreta. A manta de rególito também obscurece em muito os detalhes da geologia do leito rochoso da Lua. Esse trabalho de campo foi realizado pelas missões Apollo com muita dificuldade e por isso mesmo seu entendimento ainda escapa a nossa compreensão da história lunar. Grosso modo, o rególito consiste no que você esperaria ver em uma pilha de escombros gerada por impacto. Contém rochas e fragmentos minerais derivados do leito rochoso original. Também contém partículas vítreas formadas pelos impactos. Em muitos rególitos, a metade das partículas é composta de fragmentos minerais que foram soldados juntos através de vidro de impacto; sendo que os cientistas chamam estes objetos de aglutinantes.

A composição química do rególito reflete a composição do leito rochoso abaixo da capa de entulho que recobre a superfície lunar. O rególito encontrado nas *highterras* é rico em alumínio, como o são as rochas das terras altas; enquanto os rególitos das maria é rico em ferro e magnésio, que são os principais componentes das rochas basálticas. Um pouco de mistura com o material que está em baixo das capas de basalto ou de lugares das terras altas distantes também acontece, mas não o bastante para obscurecer a diferença básica entre os planaltos e as planícies (*highlands* e as *maria*).

Uma grande parte desse material potencialmente armazenou e trás informação sobre a história do Sol. O Sol envia ao espaço quantias prodigiosas de partículas levadas pelo vento solar. Composto principalmente de hidrogênio, hélio, néon, carbono, e nitrogênio, as partículas do vento solar golpeiam a superfície lunar e com o tempo vão impregnando os grãos minerais.

Em princípio, nós podemos determinar como as condições dentro do Sol mudaram com o passar do tempo analisando estes produtos dos ventos solares, especialmente a composição de isótopos deles. O mesmo gás dos ventos solar pode ser útil quando as pessoas estabelecem colônias permanentes na Lua. Sistemas de apoio para a vida requerem os elementos como hidrogênio e oxigênio, carbono, e nitrogênio. Bastante oxigênio está presente nos silicatos, nos minerais das rochas lunares (em um volume de aproximadamente 50%) e os ventos solares proveram o resto. Assim, quando os astronautas estavam desenterrando as amostras de rególito lunar para trazer a Terra, eles não estavam apenas buscando provas da formação lunar, eles também estavam explorando a Lua em busca de minério.

Capítulo VIII **Terrae e Mare Lunar** *Os planaltos e as Planícies da Lua*



Imagem: Lua em sua fase Cheia como vista em pequeno telescópio.

Para estudar a origem e evolução da Lua buscamos as marcas que esses processos deixaram em suas grandes formações geológicas observáveis desde a Terra e por equipamentos em sondas que visitaram a Lua, das amostras colhidas na Lua através das missões norte-americanas

e russas, e pela constituição química das rochas lunares. A geologia lunar implica no estudo das características geológicas da Lua bem como a das constituições químicas de seus principais componentes, as rochas. Basicamente a superfície da Lua compreende dois tipos de terrenos, as Terrae que áreas elevadas ou planaltos, de coloração mais

clara e luminosa, e as regiões de Maria - áreas baixas ou planícies de coloração mais escura e, portanto menos luminosa.



Imagem: Montes Alpes. Tipo: Cadeia de montanhas. Período Geológico: Imbrian (cerca de de -3.85 a -3.2 bilhões de anos). Extensão: 250x50Km e Altitude: 2400m.

As terrae, terras altas, dominam a superfície lunar e ocupam mais que aproximadamente de 84 a 85% da Lua. Elas são visíveis da Terra como as partes mais luminosas (claras) dos terrenos da Lua. Observados através de telescópios, elas são de aparência mais áspera, mais densamente craterizadas, e mais alta em elevação que as áreas das maria (planícies).

Foi proposto que as Terrae são mais velhas que as áreas de maria em solos estratigráficos, e os recentes estudos das amostras trazidas pelos astronautas confirmaram esta relação de idade.

A maior parte das pedras das terras elevadas foi datada por métodos radiométricos e que apontam para uma idade de 3.95 bilhões anos ou mais velhas. Em contraste, as áreas de maria (mares), inclusive a grande área irregular conhecida como Oceanus Procellarum, só ocupam aproximadamente 15 ou 16% da superfície da Lua. Elas são as áreas escuras visíveis da Terra a olho desarmado.

As Maria foram formadas de lavas vulcânicas escuras (basaltos) em torno de 3 a 3.5 bilhões

anos atrás, teoricamente de vulcanismo. Além de ser mais escura, as maria são menos densamente craterizadas e conseqüentemente mais lisa que as terrae. A maioria das áreas das maria é relativamente nivelada e muitas ocupam áreas de depressão. Todos esses aspectos sugerem que as áreas das maria são constituídas por fluxos de lavas basálticas. Na Terra, tais fluxos ocupam áreas extensas tanto no chãos de oceano como nos ' ' continentes' ' . Algumas das amostras lunares trazidas pelos astronautas das missões Apollo consistem em basaltos que sob muitos aspectos são semelhantes em química e mineralogia aos basaltos terrestres.

Determinações de idade radiométricas mostraram que a maioria dos basaltos aponta para uma data de resfriamento entre 3.2 e 3.8 bilhões anos atrás. O debate sobre a origem dos basaltos das maria continua. Talvez estudo adicional das amostras trazidas a Terra, de dados geofísicos recolhidos "in situ" na superfície lunar, e de dados geofísicos e geoquímicos obtidos pelas sondas em órbita lunar poderão esclarecer o problema do por que os basaltos formaram e o por que eles se acumularam nas áreas das maria.

As terrae ou terras altas (*highlands*) são terrenos estáveis, com maior albedo (mais luminoso), de cor mais clara, mais velha, e geralmente mais alto e que ocupa a maioria da superfície da Lua. Como elas são mais velhas, as terrae são muito mais densamente povoadas de crateras grandes que as maria. Embora as terrae ocupem dois terços da face visível da Terra, o conhecimento que temos sobre elas é muito menor que sobre as marias. Isto devido a serem mais antigos e de aparente complexidade e, em parte, porque somente uma das cinco astronaves não tripuladas, a Surveyor, aterrissou nas terrae. Porém, nossa compreensão aumentou em muito com os resultados das missões Apollo, especialmente com os resultados das últimas quatro missões.

As análises das amostras lunares trazidas a Terra, os estudo de dados coletados de instrumentos colocados na superfície lunar, e instrumentos sensores distantes de naves em órbita da Lua preencheu muito dos buracos de informação que faltavam, mas também apresentou novos problemas a serem resolvidos. Dados radiométricos obtidos em amostras de rochas das terrae confirmam, como era acreditado anteriormente, que as terrae são mais velhas que as maria.

Apesar de que as terrae foram altamente modificadas, elas são compostas de material rochoso formado muito cedo na história da Lua pelo processo de diferenciação magmática. São minerais segregados formados dentro de uma fundição ígnea de acordo com as diferenças nas suas propriedades físicas. Materiais mais leves sobem ao topo do corpo do magma em virtude da sua mais baixa gravidade específica, e, depois da solidificação, formam rochas de baixa densidade.

Entre as amostras lunares trazidas é pensado que não representam completamente os materiais de terra alterados por eventos subseqüentes, variedades de *anorthosite* de *gabbroic* são os mais comuns. Este tipo de rocha está em grande parte composto de *plagioclase* com quantias variadas de *olivina* e *pyroxene*. *Plagioclase* é um mineral comum na Terra e que apresenta gravidade específica bastante baixa. A preponderância de rochas *anorthositic* nas terras altas lunares é apoiada por dados obtidos por instrumentos sensores das missões Apollo.

Algumas das diferenças químicas entre *anorthositic* e as rochas basálticas foram determinados pelas técnicas de raio-X fluorescência e raio gama de experimentos nas Apollos 15 e 16. O resultado apresentado foi uma relação mais alta de alumínio para silício nas terrae que nas maria, correspondendo à diferença química conhecida entre *anorthositic* e rochas basáltica, sendo que as terrae contêm menos ferro e titânio que as marias. Isto

também é consistente com as composições químicas de *anorthositic* versus as das rochas basálticas. A mais baixa gravidade específica de rochas *anorthositic* comparada a basaltos é outra característica que foram diretamente ou indiretamente medidas através de experiências orbitais.

As últimas cinco missões registraram variações no campo de gravidade lunar ao longo do rastreamento do solo. Os resultados apresentam claramente que os materiais de terrae são menos densos que os materiais das maria. Evidências indiretas foram apresentadas por altímetros de laser a bordo das Apollo 15, 16, e 17, mostrando conclusivamente que nas regiões das terrae são mais altas em elevação média que nas maria. A experiência eletromagnética da missão Apollo 17 substanciou as elevações de mancha registradas pelo altímetro de laser.

Os resultados combinados destas três experiências indicam que a maioria da crosta da Lua é semelhante a da maioria da crosta da Terra em equilíbrio isostático (*equilíbrio geral da crosta terrestre ao flutuar sobre o substrato fluido*). Em outras palavras, as áreas mais altas têm sob si rochas de baixas densidades, e nas áreas baixas as rochas apresentam uma densidade mais alta, e diferenças em elevação por largas áreas apresentam resultado de diferenças em densidade, ou gravidade específica.

Os antigos materiais rochosos das terrae foram drasticamente modificados desde o início da sua formação através de vários processos na história lunar. Bombardeio repetitivo de choque de corpos vindo do espaço foi a causa mais importante dessa modificação.

Incontáveis eventos de impacto resultaram na redistribuição do material difundido em cima da superfície, a *brecciation* (*fragmento anguloso, consolidado por cimento, e que pode resultar do quebramento de uma rocha por processos tectônicos, ou de fragmentos de blocos vulcânicos, ou de cascalhos angulosos sedimentados*) das rochas assim deslocadas, e o metamorfismo por choque dos minerais que compõem as rochas. Os eventos de impacto foram tão numerosos e o efeito cumulativo deles foi tão penetrante que há poucas amostras reconhecíveis do material da crosta original.

Outros processos que modificaram as terrae são o tectonismo, o vulcanismo, e massa de desgaste proveniente do material ejetado das crateras e dos corpos de impressão.

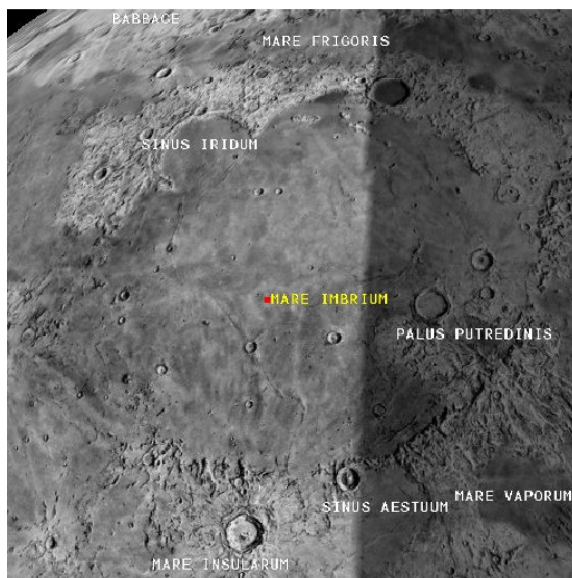


Imagem: Mare Imbrium localizado na Bacia Imbrium. Período Geológico: Imbrian (de -3.85 a -3.8 bilhões de anos). Extensão: 1250x1250Km.

O **tectonismo** é visível em numerosas estruturas lineares cortam as terrae. Algumas já

foram reconhecidas e mapeadas como falhas normais, ou como pares de falhas normais espaçadas de perto que limitam (bordejam) as *grabens*.

Algumas dessas maiores estruturas lineares estão localizadas no lado visível da Lua e irradiam da extremidade da bacia Imbrium (*Imbrium basin*) onde se situa o Mare Imbrium (Mar das Chuvas). Obviamente elas estão relacionadas com a formação daquela bacia. Porém, em cima da Lua inteira, a maioria das características lineares é orientada nas direções nordeste e noroeste. Esse arranjo resulta em um padrão de grade retilínea chamada de " *lunar grid*", cuja origem é desconhecida. Deve ter sido formada em uma fase mais cedo porque partes delas foram modificadas e interceptadas por padrões de falhas e devem ter sido cinzeladas irradiando-se externamente da bacia circular, estas características devem ser de idade bastante considerável.

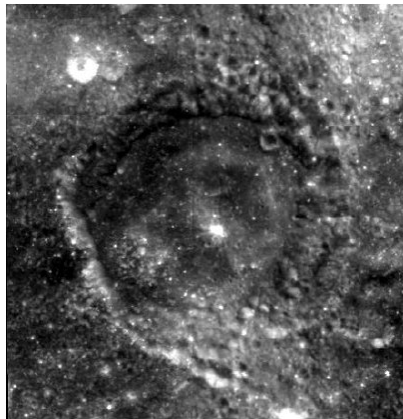


Imagem: Cratera Abulfeda. Crédito Astronave Clementine - NASA

O **Vulcanismo** é claramente evidente, por exemplo, na *cadeia de crateras Abulfeda* que se estendem para mais de 200 km a sudeste da cratera Abulfeda. Esta cadeia é alinhada de perto com duas crateras em encadeia similares em aparência: uma está perto da cratera *Ptolemaeus* e a outra está próxima da cratera *Piccolomini*.

Outra área de possível atividade vulcânica é o planalto de Kant (*Kant plateau*), a extremidade do qual foi examinado pelos astronautas da Apollo 16. A área da cratera *Ptolemaeus* e de *Kant* são altas e têm quantias anormalmente altas de alumínio a silício.

Massas de material erodido afetou as terrae reduzindo as diferenças do relevo causado por craterização, tectonismo, e vulcanismo. Esta forma de erosão dominou o áspero peculiar das terrae movendo os materiais das áreas altas para as áreas baixas. A taxa alcançada por esse movimento vai de muito lenta (como por rastejo) para muito rápido (como através de avalanches). Há muitas hipóteses para explicar a variada distribuição de materiais da crosta documentada pelos sensores orbital das Apollo' s e as amostras trazidas da superfície lunar.

A variação em espessura, composição, e elevação das regiões de maria e regiões das terrae, a atividade de raio de gama aumentada observou no centro da face distante da Lua, o aumento magnético descoberto a partir de medições realizadas em cima de algumas áreas, e as diferenças essenciais entre bacias das maria irregulares e circulares e as áreas das terras elevadas (*highland*) indicaram a existência de um mecanismo controlando.

Uma teoria baseada em transmissão de manto (circulação interna de material quente) dá uma possível explicação para os dados observados por sensores e descreve um possível mecanismo controlando para a substância química, variações geofísicas, e topográficas.

Muito cedo na história da formação da Lua, quando estava muito quente e fluido, o material do manto estava separado da fundição primordial através de diferenciação química. O material de mais baixa densidade foi se concentrado na parte superior do manto, considerando que o material mais denso localizava-se na parte mais baixa. As correntes de transmissão dentro do manto parcialmente transportou o material de peso mais leve para algumas áreas causando a variação agora marcada na espessura da crosta lunar, na densidade e na composição química observada presentemente entre as terras e as áreas de maria. As áreas despojadas de material de peso mais leve foram então inundadas por basaltos que presentemente estão em uma crosta grandemente emagrecida (fina). As áreas onde estão localizadas estas concentrações apresentam aumentos de raio gama e atividades magnéticas que foram causadas pela circulação interna e concentração de materiais com mais alto teor magnético e propriedades de raio gama. Porém, a teoria de transmissão do manto ainda está sendo debatida, e um verdadeiro entendimento do desenvolvimento da crosta lunar pode ainda precisar de anos de estudos adicionais.

Capítulo IX

As Crateras de Impacto da Lua

Um meteoróide é um corpo que pode ser rochoso, metálico ou um misto de ambos, que viaja pelo espaço. Seu tamanho pode variar de microscópico a muitos metros de tamanho. Quando um meteoróide entra na atmosfera da Terra, ele é chamado de meteoro e dependendo de seu tamanho e constituição (na maioria das vezes de minúsculas partículas de poeira a tamanho de uma bolinha de gude), ele é imediatamente vaporizado pelo atrito com nossa atmosfera deixando atrás de si um rastro luminoso. Mas, quando um deles consegue alcançar o solo então é chamado de meteorito. Suas velocidades podem ser tão grandes quanto 80,000 quilômetro por hora ou mais. Assim, um meteorito é um meteoróide que golpeou a Terra ou qualquer outro corpo celeste. A Lua, ao contrário da Terra, não apresenta atmosfera suficiente para vaporizar um meteoróide e assim todo e qualquer corpo que é atraído pela gravidade da Lua, bate em sua superfície.

Impactos de grandes meteoritos deixam crateras e se ele for de material muito denso e compacto pode se enterrar bem fundo. Quando o meteorito é formado por rocha, ao se chocar contra o solo, na grande maioria das vezes ele explode e se esfacela em milhões de partículas e poeira, se misturando ao chão da região onde caiu. Na explosão do impacto, muito material do local também é ejetado para fora da cratera. Assim, quando da ocorrência de impactos o objeto que provocou o impacto pode ou não ser destruído e partido em pequenos pedaços que por sua vez pode formar uma série de crateras menores em torno da cratera de origem.

Objetos potencialmente impactantes como meteoróides, asteróides e cometas que cruzam nossos céus, ainda que não tão numerosos como no passado, ainda apresenta grande possibilidade de impacto em corpos do Sistema Solar, e tal acontecimento é inevitável. Como cada impacto diminui a provisão desses objetos, obviamente a provisão e conseqüentemente a taxa do número de impactos, deveria ter sido muito mais

alta num distante passado. De uma forma ou de outra, todos os corpos do Sistema Solar sofreram e ainda sofrem impactos quer seja de meteoritos, cometas e até mesmo algum asteroide de maior tamanho.

Praticamente, qualquer imagem da Lua serve para vermos centenas de crateras de variados tamanhos que podem ser observadas através de lunetas, binóculos e telescópios, e então veremos milhares delas espalhadas por toda a superfície da Lua. Claro que a Terra também foi palco de muitos choques com meteorito que aqui bateram desde sua origem e durante a evolução de sua história geológica. Mas a Lua apresenta uma enormidade de crateras visíveis porque ela não tem atmosfera para queimar os meteoróides que são atraídos por sua gravidade, e nem alguns dos processos de erosão eólica, química e física como acontece na Terra; e dessa forma, todos os meteoróides que chegam muito próximos da Lua se chocam contra sua superfície.

A forma das Crateras

Tanto na Lua como em outros corpos do Sistema Solar, a maioria das crateras apresenta forma circular, têm uma depressão central, bordas elevadas e uma cobertura de material ejetado a rodeá-la e outras ainda apresentam uma saliência, elevação ou pico central bastante pronunciada. Embora algumas raras crateras lunares apresentem formato de oval alongada a esmagadora maioria delas que nós vemos na Lua, na Terra e nos outros corpos do Sistema Solar são totalmente ou quase circulares (formato de tigela). A razão disso é que uma explosão acontece nos impacto e as forças associadas a uma explosão sempre são esfericamente simétricas.

A vasta maioria das crateras lunares é formada através de impactos, e várias vazões podem ser dadas para explicação esta afirmação. O fato das crateras apresentarem formas circulares é que o ejeta delas normalmente é radialmente simétrico, apontam para a origem das crateras de uma fonte centralizada muito pequena. O material lançado de crateras grandes é significativo e indica que grandes quantias de material foram deslocadas do local da cratera. Em alguns casos, o material ejetado como também pequenas crateras secundárias pode ser encontrado a milhares de quilômetros de seu ponto de origem. Isto mostra que eles foram lançados a quase a velocidade de fuga lunar. A energia exigida para causar este tipo de movimento de massa de uma zona central pequena só pode vir de impacto de objetos do espaço. A crosta lunar não é bastante forte para conter um tal pressionamento de um ponto pequeno sem lançar energia para criar grandes crateras lunares. Foi sugerida a idéia de que um colapso pudesse causar grandes crateras lunares, mas a idéia de colapso não pode explicar o material lançado a distância e espalhado ao redor de crateras.

O chamado lado distante da Lua (não visível da Terra), até mesmo mais que a face visível da Lua voltada para a Terra, apresenta um largo registro do bombardeio sofrido pela Lua ao longo de sua história, o que exemplifica o ataque inexorável de objetos vindos do espaço que imprensaram com a superfície lunar e que caracterizou a maioria de sua história. Todavia, a face visível da Lua foi igualmente impactada no longínquo passado, mas uma imensa quantidade de crateras nas regiões plana da Lua, foi coberta de lavas.

As crateras nesta área da face não visível são encontradas em várias formas, tamanhos, e graus de degradação que atesta uma grande variedade de processos formativos, energias de formação, e idades. Cada cratera circular individual provavelmente foi produzida pelo impacto de um corpo do espaço interplanetário - quanto maior for a cratera, uma

mais alta energia foi necessária para provocá-la; quer dizer, um corpo maior despendeu uma maior velocidade e energia de impacto. Os primeiros maiores impactos que aconteceram na Lua apagaram todas as características mais antigas e produziram as crateras que enche a maioria da superfície lunar em ambas as faces da Lua.

Capítulo X

Morfologia das Crateras de Impacto

A aparência das crateras lunares se assemelha mais com as crateras de impacto terrestre que com as de crateras de explosão feitas por vulcões. Isto estende até mesmo a condições de quantidade e medida - como as dimensões interiores das crateras, e o fato que em crateras de impacto o chão entra debaixo do terreno circunvizinho. Morfologias estas que não são reproduzidas em crateras vulcânicas. Por outro lado, a grande maioria das crateras lunar não apresenta nenhum cone vulcânico semelhantes aos tipos encontrados na Terra.

As crateras na Lua são distribuídas fortuitamente em uma superfície de uma determinada idade, enquanto características vulcânicas e outras características de forças estruturalmente controladas não são distribuídas ao acaso. Além disso, a distribuição de tamanho e frequência de crateras nas diferentes partes da Lua nos remete a uma distribuição de tamanho/frequência de potenciais corpos impactores provenientes do espaço, da mesma forma que vemos em planetas e outras luas do Sistema Solar. Finalmente, choque metamórfico e coberturas de rochas nas áreas das terras elevadas (*highlands*) lunares dão mostras que são muito comuns nas áreas dos *mares* (no singular e *maria* para o plural). Estas rochas foram formadas a pressões que excedem de longe qualquer possível pressão vulcânica. A frequência delas exige impactos significativos o que é provado em todo local das terras elevadas lunares.

Sabemos que o processo mais comum que afeta a superfície lunar é o processo de crateramento por impacto. As crateras de impactos são encontradas em uma grande variedade de tamanho, e com diferentes características. Algumas das características são influenciados pelo seu tamanho, e para auxiliar na classificação e distinção, elas foram divididas em vários tipos morfológicos.

Os tamanhos variam desde microcrateras, que não são telescopicamente visíveis, que começam a aproximadamente um micron de tamanho indo até um tamanho que ocupa uma fração significativa da superfície da Lua; sendo que crateras que tenham cerca de 1000 km podem ser vistas a olho nu a partir da superfície da Terra, e outras são tão minúsculas que exigem os microscópios mais poderosos para seu estudo. Estas crateras minúsculas são abundantes até nos menores grãos das amostras trazidas da Lua pelas missões Apollo.

Em geral, o tamanho das crateras maiores de uma superfície particular dá uma medida da idade daquela superfície. Isso porque as áreas mais jovens contêm crateras pequenas enquanto que as áreas (regiões) mais velhas ou antigas são povoadas com crateras muito grandes.

Além de dar uma medida da idade da superfície lunar, as crateras provêm informação sobre outros processos que afetam a Lua. O estudo das formas das crateras e da distribuição do material lançado delas nos dá informação sobre a natureza do projétil,

sua energia, e direção de impacto. Esse tipo de informação nos conta que tipo de objeto causou a cratera se era um objeto de baixa densidade como, por exemplo, cometas, ou um asteroide de alta densidade; como também do tipo de solo na região do impacto. Sabemos que o processo de craterização, em maior ou menor escala, é um acontecimento onipresente no Sistema Solar desde sua formação.

Depois de alguns debates iniciais, chegou-se a um consenso que a maioria das crateras vistas nas superfícies da Lua e dos planetas foram formadas por impactos de escombros cósmicos que aconteceram a hiper-velocidades. Embora os trabalhos realizados mais cedo enfocaram em usar estas características para calcular as idades relativas de unidades de superfície, estudos mais recentes se concentraram em entender o processo de crateramento. Considerando que muitas destas investigações trataram de impactos em superfícies rochosas, as investigações de astronave em corpos do Sistema Solar que mostraram a importância de estender tal estudo a outros materiais que inclui rególitos (*regoliths*) ricos em gelo e gelo puro.

Um impacto de hiper-velocidade resulta em duas frentes de choque, uma das quais propagam no objetivo e a outro no projétil. À frente de choque nas compressões designam inclusive o meio material, fixação do movimento e as tensões resultantes que são suficientemente grandes e causam mudanças em seu estado físico (por exemplo, de sólido para líquido ou vapor, ou combinações de ambos). A descompressão do material móvel altera o "campo" de fluxo iniciado pelo choque e induz expulsão de material de uma cavidade crescente e rebote do material do meio que estava mais ou menos comprimido no local. Os resultados finais são um buraco no solo (a cratera) e um depósito circunvizinho de ejeta (material ejetado).

A forma final da cratera é determinada por vários fatores entre os quais se incluem a gravidade de superfície, o tamanho do corpo, as propriedades físicas e químicas do objetivo e projétil, o tamanho, a velocidade, o ângulo de impacto do projétil, e a pressão atmosférica ambiente. Estes parâmetros também governam as características do depósito de ejeta da cratera.

O estudo do material lançado (ejetado) das crateras provê dados da temperatura e pressões causadas pelo impacto. As mudanças na química dos materiais e no mineral forma o que é chamado de metamorfismo de impacto (ou metamorfismo de choque) dão pistas sobre a natureza dos projéteis. Claro que se pedaços do objeto imprensando for encontrada, uma determinação direta pode ser feita.

É aceito que os mecanismos elásticos e gravitacionais modificam as cavidades das crateras mais intensamente, principalmente nas crateras maiores. Crateras muito grandes normalmente possuem morfologias caracterizadas por múltiplo, anéis concêntricos, dependendo desse número, são chamadas de bacias de multianéis (*multiring basins*). Os diâmetros destas estruturas variam de cerca de 100 km a mais de 2000 km e implica que sua formação afetou os corpos rochosos em escalas verdadeiramente gigantescas.

Os parâmetros de mudanças do padrão comum e em forma e aparecimento de crateras com diâmetros crescentes já foram satisfatoriamente estabelecidos. Porém, as razões para estas tendências ainda não são completamente entendidas.

Uma taxa precisa da importância relativa das principais variáveis mencionadas acima e de seus papéis específicos nesse jogo determinativo da variação observada na morfologia de cratera tem sido uma meta fundamental na pesquisa de cratera.

O melhor entendimento das estruturas de impacto lunar foi feito a partir de estudos das

crateras de impacto naturais na Terra como também de crateras feitas pelo homem a partir de explosões de testes com bomba atômica e também por processos realizados por explosivos como a dinamite.

O estudo detalhado das crateras feitas por explosivos, impacto de projétil balístico, ou projéteis incendiários com armas de altas velocidades em objetivos rochosos resultou em um pouco de compreensão do processo pelo qual as crateras são formadas.

Quando os projéteis de alta velocidade entram no objetivo, uma onda de choque compressional se esparrama para longe do ponto de entrada, seguido por uma onda de rarefação que joga para fora a maioria do material ejetado da cratera. Finalmente, o chão da cratera se ressalta formando um cume ou elevação central. Este é o tipo chamado de cratera complexa.

Como as formas das crateras podem ser aproximadamente previstas (pelo menos em materiais rochosos), estas características foram usadas como valiosos marcadores para medir espessura (densidade) de várias características geológicas e depósitos. Sabendo a geometria interior média de uma cratera nos permite calcular a profundidade de qualquer material que penetrou com um grau razoável de precisão. Justamente por isso, a distribuição conhecida das alturas das beiradas em função do diâmetro da cratera pode ser usada para calcular as densidades de depósitos exteriores e documentar o grau no qual crateras de um determinado tamanho são enterradas em uma determinada região em particular. Para isso, dados topográficos precisos são necessários para se estabelecer as características morfométrica das populações de cratera.

A classificação das morfologias de cratera com respeito aos seus vários tipos vem produzindo informação sobre as propriedades dos materiais como também dos efeitos destas propriedades no processo de craterização. Desde que grandes quantidades de calor são lançadas em um tempo muito pequeno durante um evento de impacto, significativos volumes de material são derretidos e vaporizados. Sob estas condições, parâmetros como conteúdo volátil parecem representar um papel significativo influenciando a classificação e morfologia da cratera final.

O estudo específico de algumas grandes crateras e bacias de choque associadas a um evento de impacto e fratura do corpo impactado apresentam ao redor e debaixo da cavidade finais, saídas localizadas para a extrusão de lava de zonas de fraqueza nas quais tensões tectônicas podem mobilizar o material da crosta. Por exemplo, é acreditado que algumas crateras possam ter servido como centros de erupção para uma fração significativa dos basaltos que cobrem as regiões do Mare Australe e da bacia Imbrium.

Podem ser achados três tipos de depósitos ao redor de uma cratera:

- O primeiro tipo é as linhas de ejeta jogadas para fora da cratera ao longo de caminhos

4

balísticos e que formam as linhas de crateras secundárias. Na Lua, estes formam os raios luminosos que se estendem de 10 a 30 diâmetros de cratera.

- Um segundo tipo acontece quando uma manta contínua de ejeta se estende para dois diâmetros de cratera em extensão: tal qual uma cobertura formada por movimento do material lançado ao longo da superfície é denominada "onda básica". Este material corrente pode formar cumes e dunas que variam de acordo com a velocidade do fluxo e a forma preexistente da superfície. Em seu caminho, o ejeta fundido pode fluir do interior das paredes de uma cratera velha e forma uma poça no chão de cratera ou então flui da beira se inclinando pelo externo da cratera.

- O terceiro tipo de depósito é as linhas de ejeta que radia do cume central. Estes materiais são os últimos a ser lançados da cratera.

Material Ejetado



Imagem: Material de ejeta na cratera Copernicus

O material de ejeta ou material ejetado de cratera foi estudado e classificado em dois grupos: Ejeta balístico que é jogado para fora formando raias em padrões lineares ou encurvado e agrupamentos de crateras secundárias na superfície da Lua. A fina granulação de ejeta e a fluência com que cobre localmente a superfície lunar e formas moldadas em fluxos de baixo alcance (pouca distancia da cratera de origem) que se estendem da cratera de impacto primária. A manta de ejeta contínua é aparentemente posicionada estendida como fluxo de onda com base na superfície que cerca a cratera. Um exemplo notável de padrões de superfície criado por ejeta fluida e sua interação com a topografia local é encontrado perto da cratera *King* no lado oculto da Lua. O bombardeio continuado da superfície lunar através de meteoritos e material de impacto secundário formou um rególito (*regolith*) na superfície composta de fragmentos de brecha (*breccia*) e escombros de fragmentos não consolidado. As densidades e idade do rególito variam sistematicamente. Em geral, o cálculo da espessura baseado na forma da cratera concorda bem com estimativas baseadas em medidas de *bistatic radar*.

De forma resumida, podemos dizer que as crateras entram em três grupos:

- **Primeiro:** Existem crateras primárias que geralmente são distribuídas fortuitamente. Escombros cósmicos que ocasionalmente golpeou a terra lunar em linhas longas e formou as características das cadeias de crateras de meteoritos.
- **Segundo:** Padrões de crateras menores que radiam e cerca a cratera de impacto primária maior. Estas crateras secundárias podem ter outras filiais de material ejetado, que foram jogados para fora delas e espalhados em direção ainda mais longe da cratera primária.
- **Terceiro:** Há crateras de origem interna (por atividade vulcânica). Estas têm uma forma diferente, são freqüentemente alinhadas ao longo de fraturas (falhas), e têm mantas de ejeta de estilo e forma diferentes das crateras de impacto.

O material de ejeta por imprensamento (choque) se apresenta em muitos blocos e forma

muitos depósitos de pedregulho; ao contrário do ejeta vulcânico que literalmente cai em uma forma de ' ' chuva' ' e é normalmente liso. Além de outras características, as crateras de origem vulcânica apresentam paredes e bordas mais lisas enquanto as originada por choques têm paredes e bordas mais escarpadas.

As mecânicas do crateramento de impacto foram estudadas intensivamente com a ajuda dos dados obtidos pelas missões Apollo. De forma minuciosa foram estudadas crateras de variados tamanhos e centenas de bacias gigantes com muitos quilômetros (como a bacia Imbrium), crateras menores visíveis em fotografias orbitais (1 m de diâmetro), como também em microcrateras na superfície de esferas de vidro contida nas amostras das terras lunares trazidas para a Terra.

Crateramento por Vulcanismo

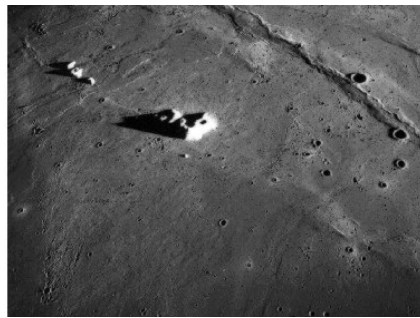


Imagem: Sul do Mare Imbrium, localizado na Imbrium Basin.

Uma variedade de características da Lua foi investigada e reconhecida como sendo de origem vulcânica. Outras características de formações de terrenos foram equivocadamente classificadas como possivelmente de origem vulcânica e outras ainda permanecem indecifradas. Um bom exemplo da sucessão de fluxos de lava foi traçada na Bacia Imbrium (*Imbrium basin*).

Embora nenhuma cratera reconhecida como de origem vulcânica foi visitada de perto por nenhuma das missões Apollo, estudos foram feitos baseados em imagens e dados obtidos através de medições por equipamentos avançados das próprias Apollo e de sondas que orbitaram a Lua como, por exemplo, a sonda Clementine, entre outras.

Crateras de Halo Escuro

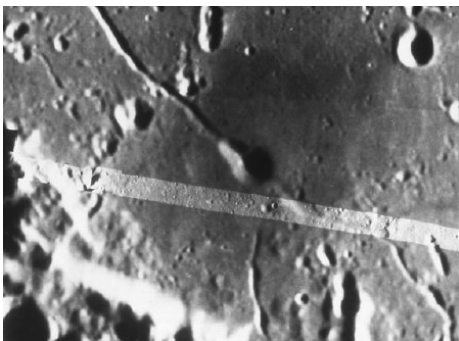


Imagem: Cratera de Halo escuro (Dark-Halo Crater). Chão da Bacia Schrödinger centrada em 76°S, 139°E. O halo escuro que se estende por 5 km é um evento de erupção vulcânica de cinzas ocorrido durante o período da formação dos mares vulcânicos na Lua, a mais de de 3.5 bilhões de

anos atrás.

As crateras de halo escuro se apresentam circundadas por uma borda baixa, rodeada com um manto escuro de cinzas que cobrem a topografia circundante. Algumas estão localizadas sobre fissuras e pode ter sido bocas eruptivas. Mas, infelizmente nenhuma delas foi visitada pelos astronautas. As crateras que apresentam halos escuros foram extensivamente estudadas e divididas em duas classes:

Crateras circulares de lados lisos - sem blocos visíveis nas paredes das crateras são acreditadas como sendo vulcânicas, e é pensado que o material do halo escuro é composto de ejeta vulcânico de granulação muito fina.

Crateras de halo escuro - são as que têm esboços irregulares e podem ser crateras de impacto nas quais o material mais escuro foi desenterrado e derretido na hora do impacto.

Linhas ou Cadeias de Crateras

Linhas ou cadeias de crateras (*crater chain*) também foram classificadas em dois grupos:

Cratera vulcânica em encadeia (Hyginus Rille e Davy crater chain).

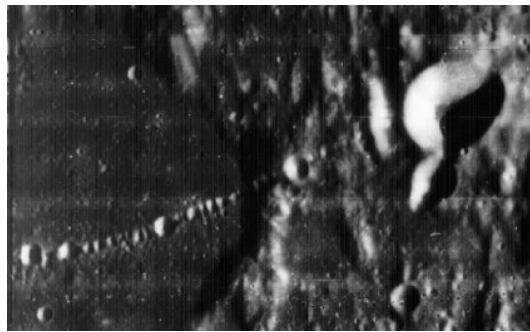


Imagem: Davy crater chain é uma das mais espetaculares cadeias de crateras na Lua, se estende por cerca de 50 km de distancia da borda da antiga cratera Davy Y e sobre sua borda oriental. A cadeia pode estar relacionada em origem ao par de crateras irregulares Davy G (diâmetro 15 km) e Davy GA. Crédito Lunar Orbiter – NASA

Foram propostas duas origens para esta formação na cratera Davy. Alguns geólogos lunares acreditam que é uma cadeia de crateras de impacto secundárias, e outros acreditam que é uma linha de crateras vulcânicas. A geometria simples da cadeia Davy, a simetria e espaçamento uniforme de suas crateras individuais, e seu alinhamento com Davy G apóia fortemente uma origem vulcânica. Também o fato que a cadeia Davy é uma solitária característica apóia essa idéia. Não há nenhuma outra cadeia semelhante. Todavia, note que o espaçamento entre as crateras da cadeia pode ser o resultado de impactos secundários, atividade vulcânica, ou foram formadas por um objeto impactor que se partiu logo antes do impacto, semelhante ao Cometa Shoemaker/Levy 9 em Júpiter.

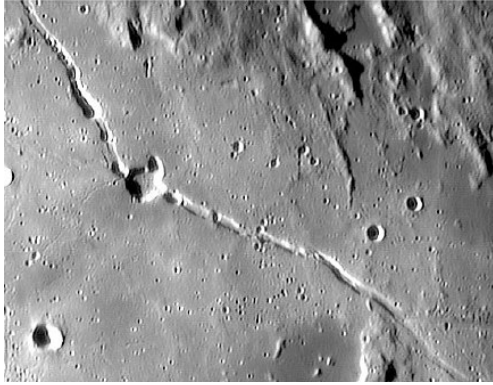


Imagem: Hyginus Rille. Localizado a Oeste do Mare Tranquillity, é um vale serpenteante escavado por um fluxo de lava, e aparentemente similar a um canal.

Crédito: Bruno Daversin, Image obtained with Ludiver Observatory (Normandy, France) 600 mm (24") F/D=16 cassegrain telescope + infrared filter + TouCam Pro in B&W mode. <http://www.lpod.org/archive/2004/02/LPOD-2004-02-25.htm>

Cratera de impacto secundária encadeada (*impact crater chains*) que se estendem radialmente de crateras grandes (como Copernicus, Kepler, e Aristarchus) que foram formadas através de ejeta balístico proveniente das crateras grandes.

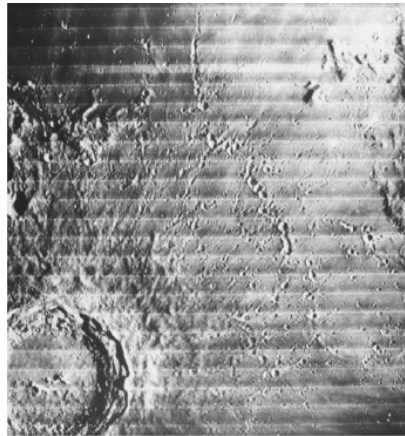


Imagem: Cratera Copernicus e a cadeia de crateras de impacto que se entende radialmente de crateras grandes.

Alguns tipos Interessantes de formações relacionadas a crateras:

Crateras com barrancos - As paredes internas deste tipo de crateras formam barrancos perfeitamente definidos. No fundo da Cratera existe um pico central proeminente.

Exemplos: *Theophilus, Alpetragius e Copernicus (imagem acima).*

Crateras Concêntricas - São crateras com vários anéis de todos os tamanhos. Como exemplos têm as crateras: *Taruntius e Hesiodus.*

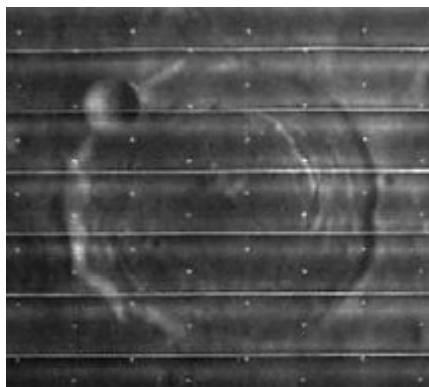


Imagem: Cratera concêntrica Taruntius.

Crateras com Gretas - No fundo de algumas crateras existem complicados sistemas de sulcos chamados de "Gretas". Exemplos: *Gassendi, Hevelius e Humboldt*.



Imagem: Cratera Gassendi. Exemplo de cratera com gretas em seu interior

Crateras que formam Baía Lunar - Alguns acidentes lunares formam o que são chamadas de Baías, que são áreas onde uma cratera se situa na borda de um mare que foi inundado parcialmente de forma que parte de sua parede foi destruída. Como exemplos têm as Baías: *Fracastorius, Hippallus e Lemonnier*.

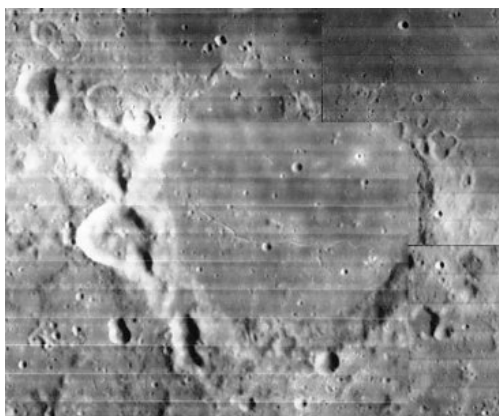


Imagem: Cratera Fracastorius é um belo exemplo de cratera que forma Baía na Lua

Crateras Fantasma - São as crateras cujos seus interiores aparentemente foram inundados por material das maria, cujo formato ainda pode ser percebido. Ex: a cratera fantasma na região da cratera *Flamsteed*.

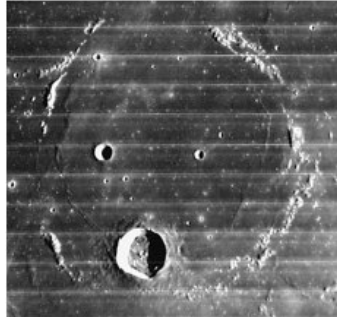


Imagem: Cratera Flamsteed P e os resquícios de uma cratera que foi inundada por Lava.

Crateras Raiadas - Algumas crateras são facilmente percebidas por apresentarem sistemas de Raios Brilhantes que, não raro, se estendem a grandes distâncias. Entre muitas delas, tomamos como exemplos as crateras de *Tycho e Copernicus, Kepler, Proclus*.

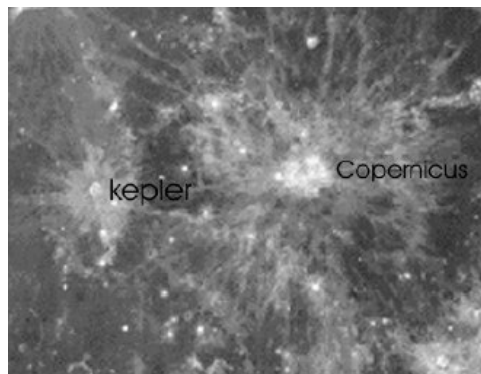


Imagem: Crateras Kepler e Copernicus. Exemplos de crateras raiadas.

Cadeia de Crateras ou Crateras Encadeadas – Como vimos acima, este tipo de formação é composto por vários sistemas de crateras um seguido do outro ligado por um vale; semelhante a um colar de perolas. Outros exemplos desses sistemas têm as formações de *Hyginus e Ariadaeus*.

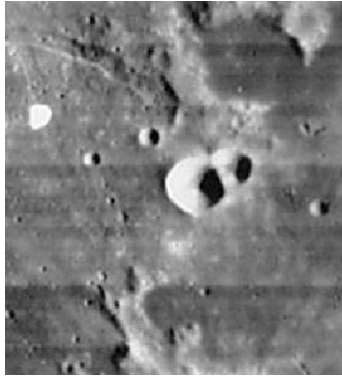


Imagem: Cratera Ariadaeus.

Conclusão

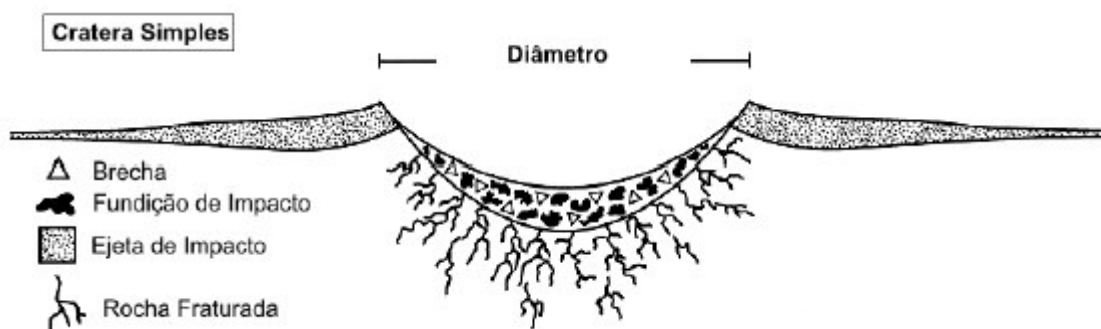
Embora em um primeiro momento muitas das questões relativas à origem, formação, e morfologias das crateras tenham sido satisfatoriamente respondidas como resultado de dados adquiridos por uma variedade de técnicas durante as últimas décadas, alguns aspectos detalhados dos processos de crateramento permanecem mal compreendidos. Estas perguntas mais detalhadas envolvem as fontes, fluxos, e características de projéteis, os mecanismos físicos específicos e sucessões de eventos em grandes e pequenas escalas de tempo envolvidas no processo de escavação de crateras; como também os efeitos de choque em materiais planetários, devem ser procurados vigorosamente.

A disponibilidade de mapas topográficos precisos e um melhor entendimento dos possíveis mecanismos envolvidos no fraturando dos chãos de cratera permitiu um amplo modelo matemático de tais processos originado no interior lunar. Em uma escala muito maior, as análises matemáticas da estrutura de bacias têm conduzindo a melhores modelos do interior da Lua como também do planeta Marte. Porém, tais cálculos dependem fortemente dos valores assumidos para vários parâmetros materiais, inclusive da efetiva crosta e viscosidades do manto que, na maioria, é pobremente conhecida.

Nosso conhecimento de crateras e suas mecânicas cresceram notavelmente durante as últimas duas décadas. Foram tratados os problemas de primeira ordem como o da origem e modo de formação em detalhe abundante, mas uma enorme quantidade de perguntas mais específica ainda resta a serem respondidas. Como podemos perceber, muitos aspectos da geologia planetária são dependentes do uso específico do conhecimento que temos das crateras como ferramentas essenciais para seu estudo, um programa vigoroso de pesquisa de cratera deve ser mantido para solucionar as muitas dúvidas e as novas questões que por ventura advirem dessas e de outras novas descobertas.

Capítulo XI Formação de Crateras Simples

As crateras do tipo simples são depressões em forma tigelas na superfície da Lua. Esta classificação inclui crateras com dimensões que vão de diâmetros submilimétricos até aproximadamente 15 km em diâmetro, sendo que de 15 a 20 km é a zona de transição entre as crateras simples e complexas.



As crateras simples se formam quando meteoritos pequenos golpeiam a Lua em altas velocidades. O bólido é vaporizado junto com a superfície golpeada (*o objetivo - local do impacto*). A rocha vaporizada é injetada no chão da cratera, e segue a onda de lançamento que escapa ao exterior onde será localizada como ejeção, isto é, lançará para fora da cratera uma onda de material ejetado. Quando a onda de choque começa a dissipar, a próxima capa de materiais não será vaporizada, mas apenas derretida, então chamada de ' ' fundição de impacto' '. Este material é injetado no chão da cratera e parte dele também é lançado ao exterior como ejeção. Como a onda de choque mais adiante se dissipa, ela não é capaz de derreter nenhum material localizado mais longe do impacto, mas ao invés disso ela só fratura as rochas. Esta rocha fraturada é novamente empurradas em ambas as direções. A própria cratera é formada através da onda de descompressão ao longo dos lados da cratera e isso permite aos fragmentos do choque vaporizar, derreter e escapar para fora. Este material se deslocará como uma manta de ejeção (cobertura de ejeção) que apresenta quatro fases distintas. Fora da borda da cratera está a zona de ejeção contínuo que é formado do último material lançado do impacto. A próxima capa lançada para fora é o ejeção descontínuo que se integra com a superfície lunar circunvizinha. Avançando nesse processo, ainda mais longe é lançado o material que forma o sistema de raios luminosos (raias) que é formado do primeiro material lançado. A quarta parte do ejeção é achada na área do ejeção descontínuo e só além dele está a área de ' ' crateramento secundário' ' o qual é o resultado de ' ' pedaços grossos' ' (*pedaços maiores*) de rochas que é jogada para fora da cratera.

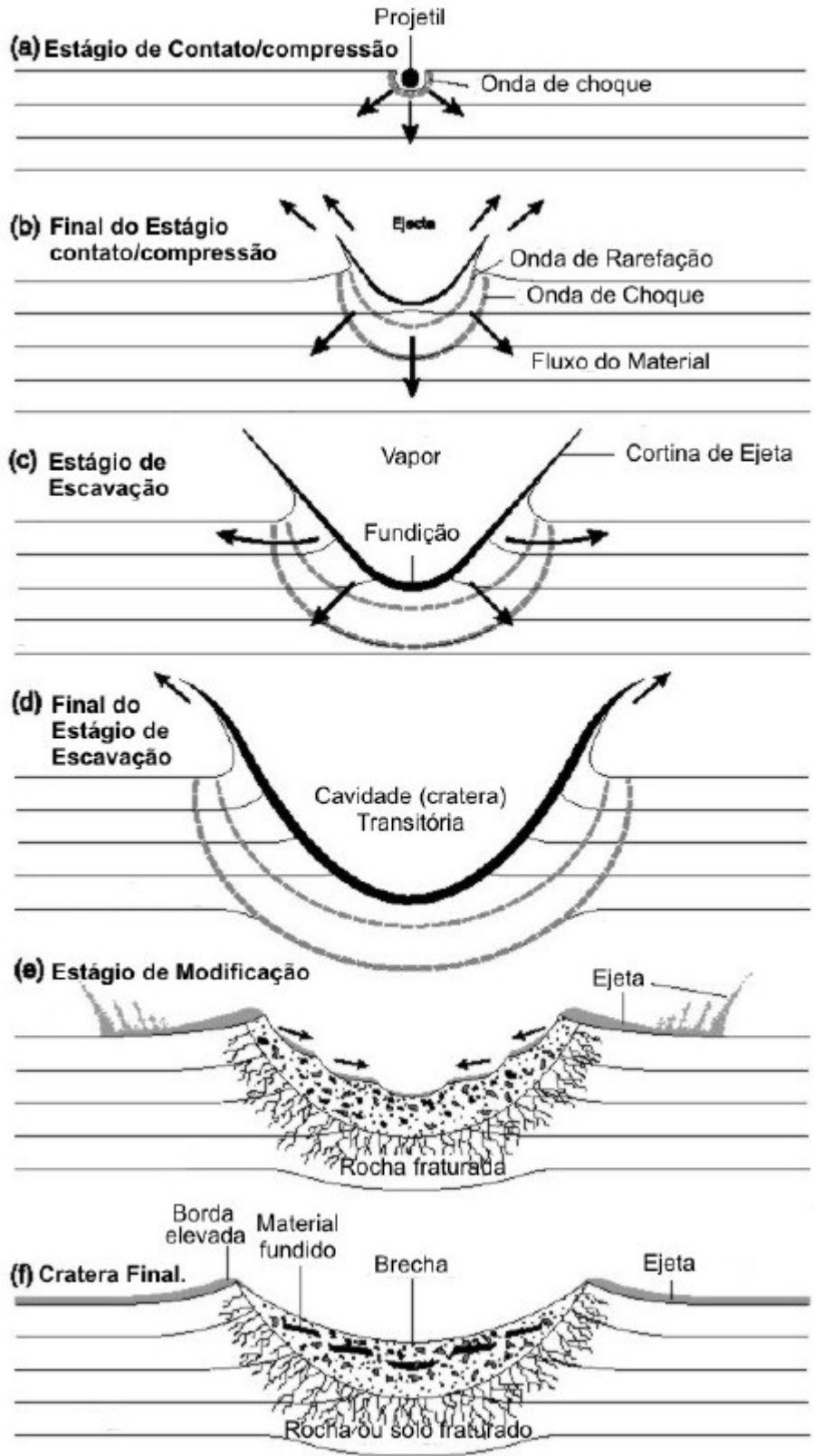
Este crateramento secundário forma tipicamente um padrão de '*herringbone*' '*espinha de arenque*) na superfície lunar, com crateras múltiplas em uma linha amoldada em forma de um pequeno ' ' V' ' que emanam. Uma vez que o ejeção saiu, a cratera restante é chamada a cratera passageira, onde outros processos modificarão sua forma final.

Para as crateras simples, esta ' ' modificação' ' final envolve o deslizamento de materiais de impacto (fundição de impacto e materiais da borda e paredes instáveis) sobre o chão

da cratera. Para crateras neste tamanho, estes materiais geralmente enchem cerca de um terço da metade da profundidade da cratera passageira. Isto resultará na forma final da cratera.

A observação de uma tal cratera revelará uma depressão amoldada em forma de tigela com uma borda afiada, algumas bordas apresentam depósitos (*blocos de material jogados para fora ao término da escavação*), um discreto ejeta cobre de forma gradual de contínuo para descontínuo, e um sistema de raios luminosos. Com o tempo, partes desta cratera se degradarão devido à chuva erosiva de impactos de micrometeoritos. O primeiro a desaparecer será o sistema de raios, seguido pelo ejeta descontínuo e a borda afiada. Este processo continuará até resta apenas uma depressão amoldada em forma de tigela com restos de rampa suave.

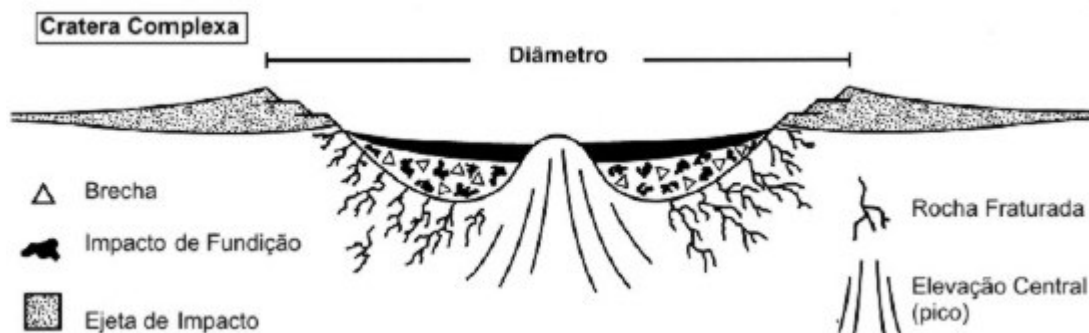
ESTÁGIOS DA FORMAÇÃO DE CRATERAS SIMPLES



Capítulo XII

Formação de Crateras Complexas

As crateras complexas começam com cerca de 20 km de diâmetro, sendo que a zona de transição para crateras simples a complexo está entre 15 a 20 km em diâmetro. Elas são morfologicamente caracterizadas por uma depressão em forma de tigela com elevação central de um ou mais picos (*estruturas de pequenas montanha*) e terraços nas laterais das paredes.



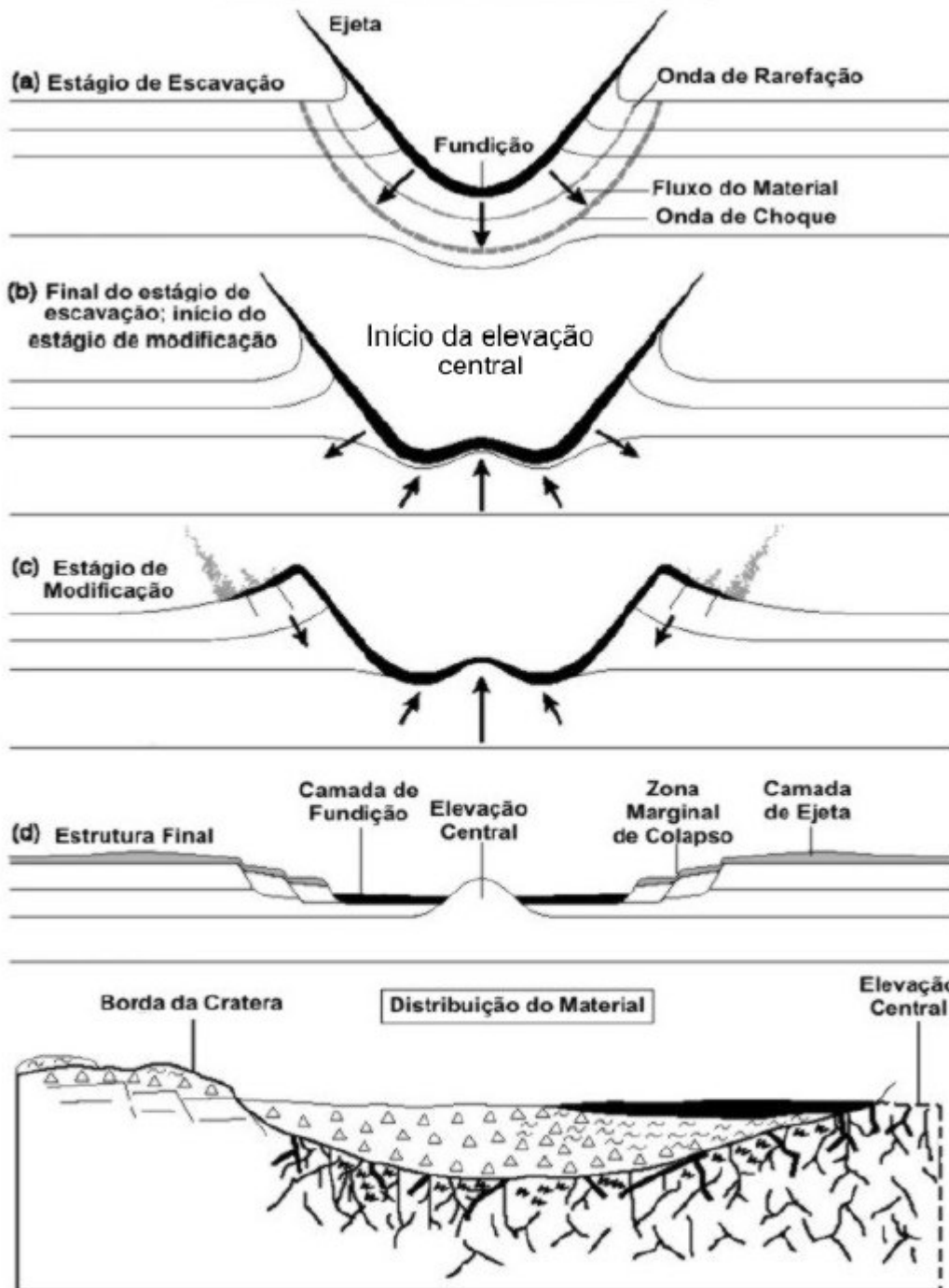
As crateras complexas são formadas através do impacto de meteoritos de médio tamanho na superfície lunar. O impacto acontece da forma como descrito na formação das crateras simples, entretanto a quantidade de energias envolvida é muito maior. As reais diferenças começam depois da formação da cratera passageira. Neste momento a borda é mais volumosa que a de uma cratera simples. Como a rocha de subsuperfície é extensivamente fraturada, e o material da borda chamado 'deslizante' não tem como se apoiar mais firmemente, escorrega para baixo criando uma série de 'terraços' nas paredes internas da cratera. Um cume central ou mais de uma elevação central (picos) também são formados neste momento. Os cumes se formam porque o impacto comprime a rocha subjacente, e esta rocha se eleva depois que a energia do choque é dissipada - semelhante a uma cama de mola que é comprimida e então é lançada quando é descomprimida. O tamanho dos cumes centrais também é modificado pelo afundamento do material da borda que empurra a rocha na elevação central. Ao mesmo tempo em que ele afunda acontece a formação do cume, a fundição do impacto nos lados da cratera está deslizando para baixo junto com outro material da borda instável, que novamente cobre o fundo da cratera temporária e forma lagoas em alguns dos terraços. Isto produz a forma 'final' da cratera.







As partes das crateras complexas são, então, a elevação central que pode ser um ou vários cumes que podem atingir mais ou menos uns 1000 metros de altura. Isto é seguido por um chão externo aplainado pelo material da fundição de impacto que gradua os terraços das paredes laterais da cratera. A borda acontece no topo da cratera em diferentes graus de ejetas contínuo, ou ejetas descontínuo, que irá formar as crateras secundárias maiores, como acontece, por exemplo, ao redor da cratera Copernicus e o sistema de raios luminosos.

A degradação acontece nas crateras complexas como em crateras simples. A primeira deterioração acontece no sistema de raio, seguido pelo ejetas descontínuo e a borda afiada. O ejetas contínuo é depois corroído juntamente com o terraço e o cume central.

Com o passar do tempo geológico, em milhões de anos, a cratera se tornará uma depressão como forma de tigela; isso devido a novos e subseqüentes impactos que vão deteriorando a cratera, bem como de eventuais pequenos sismos que são registrados na Lua.

Estágios de Formação de Cratera Complexa



- | | |
|--|---|
|  Primeira fundição de impacto |  Brechação interna |
|  Brecha suevite |  Fraturas |
|  Brecha rochosa (angulosa) |  Dique de Brechas, falhas. |

Capítulo XIII

Crateras Raiadas ou Crateras de Raios

Muitas vezes, vemos ou ouvimos que as noites de Lua em suas fases mais brilhantes são perdidas para a observação celeste, principalmente quando a bela Lua apresenta-se em sua Fase Cheia. O mesmo aconteceria em relação à observação da própria Lua quando em seu máximo brilho. Porém, uma das características mais óbvias e belas que são especialmente visíveis na Lua Cheia é o sistema de raios que emanam de algumas crateras. Estes raios ou raias luminosas, por vezes, são tão extensos que são melhor visíveis em telescópios baseados na Terra que quando observados mais de perto por imagens realizadas por aeronaves.

A origem dessas raias lunares geralmente é tida como material ejetado durante os impactos de objetos contra o solo lunar, isto é, o material que foi lançado quando pedaços de rochas chocaram contra a superfície lunar e formam as crateras, havendo indicações que as crateras secundárias tiveram seu papel na produção destas raias.

A imagem da lua cheia nos apresenta uma intrincada cadeia de raias que cobrem a superfície lunar. Apesar da proeminência que elas nos apresentam durante uma Lua Cheia, a maioria dos raios é pouco visível quando o ângulo de iluminação solar é baixo. Por outro lado, algumas podem ser vistas quando a elevação do Sol é de apenas 20 graus. Curiosamente, os sistemas de raios nem sempre são igualmente luminosos quando vistos de um ângulo de iluminação semelhante ao amanhecer na Lua.

Usando espectros próximos ao infravermelho e radar as sondas das missões Clementine e Galileu fizeram imagens onde foram encontrados raias a oeste e sul do complexo da cratera *Messier* e do *Mare Frigoris*. Também, análises de imagem e dados de radar indicam que as raias da cratera *Tycho* que cruza uma boa parte do *Mare Nectaris* é dominado por material local fresco escavado de crateras secundárias. Porém, muitos aspectos adicionais das raias ainda não são claramente entendidos, sendo que não há nenhuma explicação satisfatória para os tipos diferentes de raias. Por exemplo, as raias da cratera de *Tycho* são longas e estreitas em relação aos da cratera *Copernicus* que são menos bem definidas e delgadas.

É pensado que algumas raias trocam ligeiramente de posição durante uma luação (29½ dias do ciclo lunar entre duas Luas Nova). Sob esse aspecto as raias emanadas da cratera *Proclus* são bastante notáveis. Algumas teorias sugerem que essas diferenças são devidas a granulação da superfície lunar, o que explicaria a natureza dessas diferenças de características e a visibilidade a ângulos diferentes de iluminação solar. Além disso, muitas raias não apontam precisamente para onde elas supostamente originaram.

Há cerca de 40 anos atrás, foi proposto que a orientação não radial delas foi causada pela Lua que ao girar em seu eixo durante o tempo que acontecia a ejeção de material estava mais distante em sua trajetória balística. Material em baixas trajetórias teriam caído mais cedo e teria menos divergência radial. Um modelo dos raios da cratera de *Tycho* indica que o padrão de divergências só poderia ser ajustado se o dia " lunar " estivesse entre 0.5 e 6.8 dias da duração do dia da Terra, e não os 29½ dias que temos atualmente. Assim, alguns argumentaram que as crateras raiadas foram criadas quando a Lua tinha aproximadamente 100 milhões de anos de idade. Isto foi usado para explicar por que só algumas crateras têm raias - porque elas teriam sido formadas quando a crosta lunar ainda era muito jovem. Por outro lado, muitas das crateras que hoje não apresentam raios são crateras muito antigas cujos raios foram apagados por posteriores

impactos e ejecta que esconderam seus raios luminosos.

Uma característica bastante interessante acontece na cratera Aristarchus no sistema de raias luminosas que se projetam ao redor da cratera. Este material que foi jogado para fora na hora do impacto que formou a cratera é particularmente longo em um dos lados da cratera e parece moldado em formato de uma ' ' vírgula' ' . Que tipo de impacto faria o material ejetado ser distribuído desta maneira? Isto expõe outro aspecto interessante a ser observado na fase de Lua cheia.

Os raios que emanam de certas crateras aparecem notavelmente delineados; alguns deles estendem a distâncias longas sobre a superfície lunar. Em certos casos, as raias são duplas em linhas paralelas. Às vezes as raias se cruzam umas com as outras. Você pode determinar qual é a mais recente e qual delas passa por cima da outra? Você poderia tentar avaliar o ângulo de impacto baseado nas orientações destes raios? De qual direção teria vindo o meteoro? Estas e outras observações podem ser feitas aproveitando a total claridade da Lua, pois são nessas ocasiões que as raias ficam francamente expostas devido a seu alto albedo.

Com o fim do programa de Apollo os sistemas de raias foram amplamente interpretados como as marcas de esguicho de crateras muito jovens, e as divergências observadas não são consideradas estatisticamente significantes. Mas, apesar das centenas de anos que a Lua tem sido observada por telescópios de diferentes aberturas e através de visões íntimas de veículos espaciais, dados observacionais ainda são necessários para testar as teorias da origem e a natureza das raias luminosas.

Com esse propósito, a Associação de Observadores Lunares e Planetários (ALPO) está atualmente expandindo um projeto para estudar as raias lunares. Eles aceitarão qualquer observação de qualquer sistema de raia, mas inicialmente estes estudos se concentram nas raias associadas com as crateras *Proclus*, *Messier A*, *Menelaus*, e *Birt*; cujas localizações de sistemas de raias e sua extensão serão eventualmente transferidos para um mapa padrão. Esboços e imagens (fotográficas ou eletrônicas) são necessários para adquirir os dados dos detalhes exigidos para fazer um projeto que vale a pena. Se você deseja participar deste estudo, esteja seguro de incluir a data, horário e tipo de instrumento em que as observações foram feitas. Isto permitirá calcular coisas como

colongitude e altitude solar para determinar quando os raios são visíveis. E se você observasse as crateras quando suas raias não puderem ser vistas, também é de grande importância porque ajudará a determinar quando elas não são visíveis.

Relação de algumas crateras que apresentam sistemas de raios

Antes de começar a procurar novas crateras que apresentam sistemas de raios, munido de um mapa da Lua, localize as crateras abaixo e observe seus sistemas de raias, analise e anote suas observações tendo por base o que foi relacionado no texto acima.

Cratera Raiada / Latitude Lunar / Longitude Lunar

ANAXAGORAS 73.4N 10.1W

ARISTARCHUS 23.7N 47.4W

ARISTILLUS 33.9N 01.2E

AUTOLYCUS 30.7N 01.5E

BESSEL 21.8N 17.9E

BIRT * 22.4S 08.5W

BYRGIUS A 27.7S 63.6W

COPERNICUS 09.7N 20.0W
EUCLIDES 07.4S 29.5W
FURNERIUS A 33.5S 57.2E
GEMINUS C 33.9N 56.8E
GODIN 01.8N 10.2E
HIND 07.9S 07.4E
KEPLER 08.1N 38.0W
LALANDE 04.4S 08.6W
LANGRANUS 08.9S 60.9E
MANILIUS 14.5N 09.1E
MENELAUS * 16.3N 16.0E
MESSALA B 37.1N 57.6E
MESSIER A* 02.0S 46.9E
OLBERS 07.4N 75.9W
OLBERS A 08.3N 77.5W
PETAVIUS B 27.9S 58.6E
PROCLUS * 16.1N 46.8E
REINER GAMMA 08.0N 58.0W
SIRSALIS 12.5S 60.4W
SNELLIUS 29.3S 55.7E
STEVINUS A 32.1S 51.9E
STRABO 61.9N 54.3E
TARUNTIUS 05.6N 46.5E
THALES 61.8N 50.3E
THEOPHILUS 11.4S 26.4E
TIMOCHARIS 26.7N 13.1W
TYCHO 43.3S 11.2W
ZUCCHIUS 61.4S 50.3W

Nota: As crateras raiadas assinaladas com um asterisco (*) são as formações de especial interesse para a ALPO.

Capítulo XIV **Outros Efeitos do Crateramento Lunar**

O impacto de um corpo vindo do espaço exterior produziu na Lua mais que apenas cicatrizes de crateras e grandes bacias. Vários outros efeitos subsequentes são produzidos antes, durante e após um impacto de meteorito.\

Primeiro, o evento de crateramento cria uma onda de choque que não se limita apenas na área geral do impacto, mas continua viajando pela Lua. Se esta onda contém energia suficiente, causará falha no leito de rochas da superfície e dependendo da qualidade desse terreno, causará danos também a maior profundidade, como também pode ativar falhas já existentes. Finalmente, materiais semi-estáveis da beira da cratera podem se soltar, produzindo deslizamentos de terra e danos em outras crateras. Um exemplo disto é o deslizamento de terra em *Copernicus* que foi causado (*é pensado*) pela onda de choque do impacto que formou a cratera *Tycho*.

No impacto, espesso ejetas se esparramou para fora das bacias e cobrem uma seção enorme da Lua. Estas mantas de ejetas acumularam uma capa de vários quilômetros de espessura, chamada megarególito (*megaregolith*). Em cima disto está uma capa de poeira parda mais fina chamada de rególito (*regolith*), produzido por meteoritos menores e micrometeoritos que pulverizaram as capas superiores do megarególito. A capa de rególito pode ter mais de 15 metros de espessura nas terras elevadas (*highlands*) da Lua, e até 8 metros de espessura nas maria (mares). Como o manto de rególito é muito espesso, ele age como uma capa protetora que conserva as estruturas subjacentes (*megarególitos - lava fluida endurecida*); assim os micrometeoritos e os meteoritos de menor tamanho não podem perfura-la. Apenas meteoros ao redor 3 metros de diâmetro podem alcançar a capa de megarególito, claro que dependendo da velocidade deles.

Em épocas mais cedo, podemos notar através de fotografias, que os impactos de micrometeoritos corroeram as crateras e bacias. Esta degradação acontece em uma certa ordem, de forma que os estudiosos da Lua podem determinar a idade de uma cratera examinando em detalhes seu estado de degradação. Assim, a cratera de médias dimensões que apresentam uma beira afiada, borda, são formadas por depósitos e terraços, um cume central, um ejetas contínuo e descontínuo e um padrão de raios luminoso é as mais jovens. Estas formações pertencem ao Período Copernicano (*Copernican Period*) que se estende do presente a 1.2 bilhões anos de idade no passado. As crateras de tamanho médio que ainda conservam todas estas partes exceto o padrão de raios luminosos foram formadas no período anterior, chamado de Período Eratosteniano (*Eratosthenian Period*), e por isso são um pouco mais velhas, pois foram formadas em uma época que vai de 1.2 a 3.2 bilhão de anos atrás.

As crateras de médios tamanhas que perderam o padrão de raios luminosos e o ejetas descontínuas são muito mais velhas. Elas vêm do Período Imbrium que têm de 3.2 a 3.85 bilhões anos de idade.

Crateras de tamanho médio que perderam o ejetas contínuo e a borda afiada é de uma época ainda mais antiga, o chamado Período Nectariano (*Nectarian Period*) que marcou os eventos ocorridos na Lua de 3.85 a 3.92 bilhões anos atrás.

As crateras de médio tamanhos que aparecem amoldadas em forma de tigela simples sem qualquer beira ou ejetas são as mais antigas de todas. Elas vêm do Período Pré-Nectariano (*Pre-Nectarian Period*), que estende de 3.92 bilhões de anos de idade até o início da solidificação da superfície sólida da Lua.

Porém, este método de datação apresenta algumas limitações. Primeiro porque as crateras de pequeno tamanho degradam mais depressa que as maiores. Segundo porque os sistemas de raios degradam mais rapidamente nas superfícies das maria; e em terceiro lugar porque a degradação aparente pode ocorrer grandes folhas de ejetas ou um fluxo vulcânico que obscurecem as partes de uma cratera. Todavia, apesar destas três limitações, nós ainda podemos nos socorrer deste método para nos contar sobre a idade das crateras pela quantidade de erosão e/ou detalhes que cada uma ainda exhibe.

Capítulo XV

Os Processos Tectônicos na Lua

O Tectonismo na Lua se refere as forças que deformam a superfície lunar. Estas forças

podem ser endógenas (*como as falhas de empuxo*) ou externas (*como a criação de falhas através de eventos de impacto*).

Os processos de Indução das Crateras Impactos criam uma onda de choque que se propaga pela superfície lunar. Se tiverem energia suficiente, estas ondas podem induzir falhas no leito rochoso de subsuperfície, podem reativar falhas localizadas em outro lugar, e podem induzir mudanças locais em materiais semi-estáveis; por exemplo, produzir deslizamentos de terra em paredes de cratera.

Muitos exemplos de falhas nas capas de subsuperfície podem ser vistos ao redor de uma variedade de bacias lunares. Tais falhas podem ser radiais (diretamente fora do centro da bacia) ou concêntricas (*ao redor dos lados da bacia*). Exemplos de falhas concêntricas incluem formações como os '*Arcuate Rills*'. Eles só foram ativados depois do preenchimento das maria pelas tensões de vulcanismo. Bons exemplos deste tipo de falha podem ser vistos ao redor do *Mare Humorum* e do *Mare Serenitatis*.



Imagem: Mare Humorum

A falha radial em uma bacia também pode ser causada pelo impacto que formou a bacia inicial. Nesses eventos, a onda de choque cria falhas de subsuperfície em uma escala um pouco distante da bacia. Enquanto inicialmente foram cobertas de ejecta, estas falhas foram depois reativadas através de outros processos (*como vulcanismo*). Exemplos destes tipos incluem o *Straight Wall*, o *Cauchy Rilles*, e o rilles em *Lacus Mortis*.



Imagem: Lacus Mortis. Crédito: K. C. Pau.
<http://lufod.lpod.org/LUFOD-2004-10-01.htm>

Os materiais semi-estáveis podem se tornar instáveis através de uma onda de choque, e que pode criar deslizamentos de terra em uma cratera. Um exemplo disto é o deslizamento de terra na cratera *Copernicus*, cujo evento é pensado possa ter sido ativado pelo impacto que originou a cratera *Tycho*.

Vulcanismo como um Processo Tectônico

Outros tipos de atividade tectônica podem ser encontrados em associação com vulcanismo. A lava, vinda do manto, é mais densa que a crosta de revestimento. Esta rocha mais densa gera campos de tensão local no leito rochosa subjacente, produzindo cumes de maria e *arcuate rilles* quando a lava abaixa. Porém, existem outros tipos de eventos que formam os cumes nas maria.

Cumes de maria também podem se formar em cima da borda da cratera/bacia. Tal situação acontece quando uma cama de lava enche e cobre a borda da cratera/bacia. Agora nós temos um recife raso de lava em cima da borda e um outro mais fundo fora onde a borda termina. A lava densa baixará mais em cima da área funda e menos em cima da área rasa, induzindo campos de tensão locais ao esfriar, lava plástica. Em tal ponto se formará um cume de maria. Realmente, sua existência pode ser determinada examinando os cumes de maria nas bacias de anéis submersas.

Dois outros processos que formam cumes maria são uma intrusão vulcânica debaixo de um recife de lava fresca e ativação de uma falha devido ao peso da lava com subsequente cobertura e deformação de lava. Assim, os cumes de maria são o resultado final e uma variedade de processos tectônicos.

Interações Relativas à Maré

Forças relativas à maré se referem às tensões induzidas por gravidade entre corpos planetários. Por exemplo, as marés da Terra são causadas pela tensão relativa a maré induzida pela Lua (*e também pelo Sol ou ambos ao mesmo tempo*). Como a Terra é

maior, induz tensões proporcionalmente maiores na Lua. De fato, a Terra mostra força suficiente para torcer a forma da Lua, de maneira que ela não é perfeitamente redonda. Antes que a Lua estivesse em rotação fechada (travada) em relação a Terra (o *mesmo lado da Lua sempre está virado de frente para a Terra*), esta distorção provavelmente produziu terremotos ou sismos lunares (*moonquakes*) e falha de subsuperfície. Porém, esta distorção também teve como causa a redução da velocidade relativo a maré - a fricção destes eventos reduziu a velocidade do giro da Lua. Eventualmente, a Lua ficou com rotação síncrona.

De maneira interessante, a Lua também causa redução na velocidade relativo a maré da Terra, e assim a velocidade do globo terrestre é lentamente reduzida com o passar do tempo. Agora, se a Lua fosse completamente travada em rotação com a Terra, poderíamos esperar pouca atividade sísmica na Lua. Porém, os monitores sísmicos instalados pelas missões Apollo revelaram pequenos *moonquakes* com magnitude entre 2 e 3 na Escala Richter. Isto é porque a Lua ainda tem alguma oscilação (*libração - Qualquer deslocamento, real ou aparente, dos eixos lunares em relação às suas posições médias*) que causam e mudam as tensões relativas à maré, resultando na continuação destes *moonquakes*; contudo, (também há causas térmicas seculares que esfria a Lua).

As Forças Endógenas

A única nova força tectônica endógena é a que induz o continuado esfriamento secular da Lua. Com este resfriamento mais o manto plástico da Lua encolhe. Porém, a crosta rígida não pode encolher com ela e isto cria campos de tensão locais que são eventualmente lançadas através de falha por deslizamento (*em um lado da falha a crosta desliza diagonalmente para cima*). Falhas semelhantes existem em Mercúrio onde o encolhimento foi até maior. Embora estas falhas sejam pequenas, há muitas delas, e segundo o Dr. Alan Binder, elas ainda estão continuando a se formarem.

Resumindo...

Nós podemos concluir que a superfície da Lua foi formada por um conjunto de diversos processos. Embora estes processos não são tão complexos quanto as forças geológicas da Terra, pois a Lua não apresenta placas tectônicas e os movimentos referentes a elas, forças hidrológicas e eólicas, ou um ciclo geotérmico significativo, a bela Lua ainda é um mundo fascinante. E justamente porque falta esta complexidade extra, nos permite estudar estes processos mais simples de forma isolada. Enquanto poderia parecer que nós já entendemos tudo sobre a Lua, é preciso lembrar que ainda há muitos mistérios sobre ela que não foram solucionados, e que o esquema simplificado que apresentamos nesse trabalho tem como objetivo levar aos leitores que apreciam observar a Lua em todos os seus aspectos, uma melhor forma de entender aquilo que nossos olhos não se cansam de admirar. Um maior entendimento de nossa Lua natural só será possível quando o homem retomar seus projetos de exploração em todos os recantos da Lua e, quem sabe, num futuro não muito distante, lá estabelecer colônias e saltar mais longe nas viagens espaciais interplanetárias e, quiçá, interestelar!

Capítulo XVI

Vulcanismo na Lua

O vulcanismo também foi uma principal e poderosa força na Lua que muito contribuiu para a formação das características lunares que vemos hoje. Elementos radioativos como, por exemplo, urânio, potássio, e tório, reaqueceram áreas da mais baixa crosta e manto superior e criou uma série de fundições parciais. Estas fundições eram menos densas que a rocha circunvizinha, e assim começou a subir para a superfície. A erupção de lava aconteceu preferencialmente nas bacias, por duas razões principais: primeiro porque estes impactos volumosos causaram falhas fundas na superfície da Lua com dezenas de quilômetros, provendo canais para a lava ascendente. Segundo porque o manto debaixo das bacias subiu mais íntimo à superfície (*compensação isostática*), tornando o caminho para a superfície muito menor.

Quando a lava explodiu nas bacias, às vezes fluiu por muito tempo e finalmente esparramando-se a grandes distancias antes que esfriasse; e ela pode fazer isso porque na Lua a lava tem uma baixa viscosidade (*muito magra e corrente - fluídica*).

Realmente, pois os materiais derretidos em lava na Terra apresentam a consistência de óleo usado em motor. Isto é porque a lava lunar é baixa em silicatos ('*mafic*' - ~~lavas~~ ao contraste, a lava de alguns vulcões formados por cones de proteção na Terra apresenta viscosidade mais alta, tão espessa como um creme dental, pois seu teor de silicatos ('*felsic*' - ~~lavas~~) é bastante levado.

As lavas lunares geralmente estouraram de fissuras fora das quais verteram lava e formaram lagoas nas planícies geograficamente mais baixas da Lua. Porém quando ela estourou sobre uma superfície em declive, a lava pode fluir pela decida e até mesmo criar rios como canais de erosão térmica. Na lua, estas formações são chamadas '*sinuous rilles*' (vales sinuosos) Algum desses rios formou canais com até centenas de quilômetros antes de finalmente derramar sua lava sobre superfícies mais aplainadas. Este processo de inundação das maria resultou em grandes folhas de lava planas que cobriram as bacias.

Como as bacias eram de forma côncava, a lava ficou mais espessa no centro da bacia e mais magra em direção as extremidades (bordas). Assim, a lava mais densa e espessa (mais pesada) que a crosta rochosa circunvizinha, ' ' comprimiu ' ' o leito rochoso abaixo dela em um processo geralmente chamado de '*subsidence*' (' ' apaziguamento' '). As áreas mais espessas no centro fizeram isto mais que as áreas mais magras das extremidades. Este processo mudou a forma da bacia de plana ou achatada ('*flat*') para uma aparente suave inclinação em forma de bacia rasa que amoldaram a superfície. Isto produziu três formações sem igual.

Primeiro criou uma superfície única, sem igual. Quando o primeiro fluxo de lava baixou, o centro da maria ' ' afundou' ' e as áreas exteriores permanecem elevadas. Os próximos fluxos encheram preferencialmente as áreas centrais mais baixas. Dado que cada grande evento eruptivo teve uma composição ligeiramente diferente, a ' ' cor' ' do fluxo seguiria também aquele mesmo padrão. Isto produziu um efeito que nos permite ver que as faixas exteriores das maria representam os fluxos mais velhos, e as faixas internas o fluxo de lava mais jovem. Um dos melhores exemplos disto é visto no *Mare Serenitatis*.

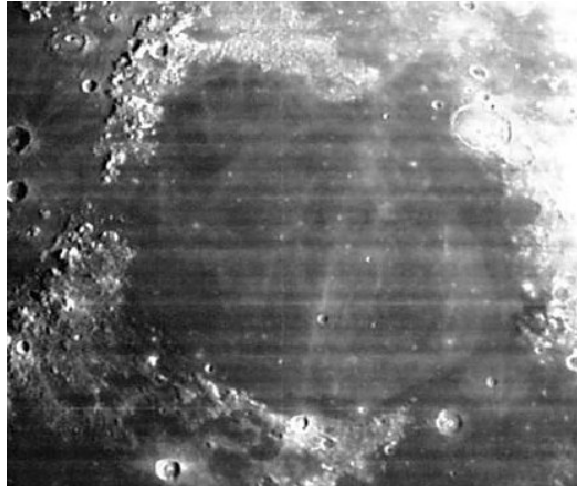


Imagem: Mare Serenitatis.

Segundo, o ' ' apaziguamento' ' de lava produziu tensões dentro da própria cama de lava. Como a lava no centro afundou, produziu uma força compressiva onde a cama de lava mais espessa (*nos lados das bacias de anéis*) permaneceu as camas de lava mais magras (*no topo das bacias de anéis*). Estas forças fizeram a lava ' ' dobrar' ' (*buckle*) sobre si mesma (*talvez devido a falhas encobertas*) produzindo cumes nas maria em cima das bacias de anéis. Embora haja vários tipos de cumes nas maria, estes são identificados formando um anel dentro da maria, e é frequentemente associado com pequenos cumes que representam os pontos mais altos do anel nas bacias inundadas como, por exemplo, o *Mons Piton*.

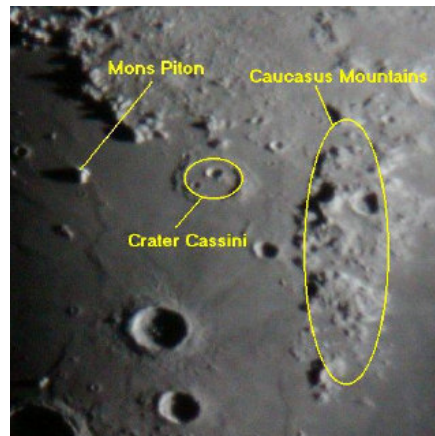


Imagem: Mons Píton. Um cume que se eleva a 6800 pés sobre o Mare Imbrium.
 Crédito: Doug Anderson. <http://www.shoestringastronomy.com/lunar/L101.htm>

Terceiro este processo de ' ' apaziguamento' ' pôs tensões abaixo da cama de lava e no leito rochoso. Esta rocha já profundamente fraturada nas bacias de impacto, e estas novas tensões descendentes fizeram com que algumas dessas falhas ficassem ativas. Elas se abriram criando uma série de 'grabens' (*grabens acontecem onde duas falhas paralelas são ' ' rompidas' ' , cuja seção central se afunda; isto produziu um vale plano e fundo*). Na lua, essas formações são chamadas especificamente de ' ' arcuat hills' '. Esta características só são encontradas ao redor das extremidades das bacias cheias de lava, e os melhores exemplos são aqueles ao redor do *Mare Humorum*.

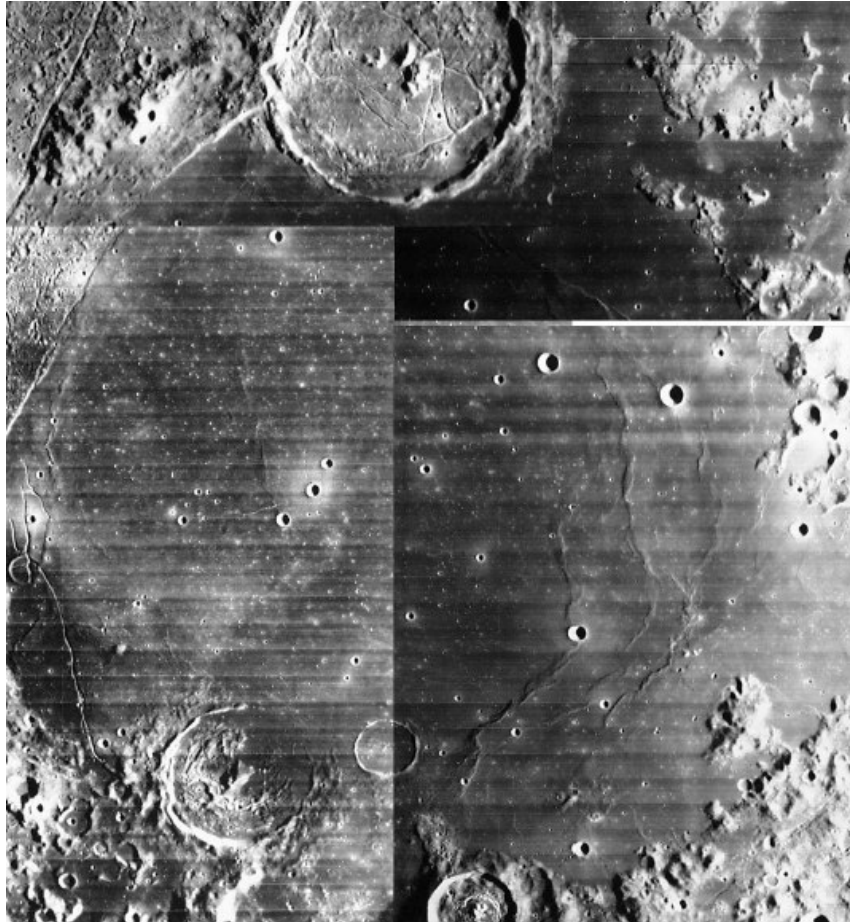


Imagem: Mare Humorum (mosaico).

Até aqui nos falamos dos esquemas habituais de como a lava enche as bacias, junto com a formação dos *sinuous rilles* (vales sinuosos), *arcuate rilles*, e cumes de maria. Agora vamos examinar algumas outras características produzidas pelo processo vulcânico.

Outras Formações de Caráter Vulcânico

O primeiro destes processos é os vulcões lunares que são chamados de ' *domes* ' (*cúpulas*), mas que não devem ser confundidos com os vulcões de cúpula da Terra que tem paredes com inclinações muito íngremes. Os domes Lunares são lisos apoiados com baixos níveis de inclinação. Isto é porque a lava lunar tem uma baixa viscosidade. A maioria dos domes lunares medem de 5 a 20 km, e freqüentemente tem uma pequena cratera em forma de cova em seu ápice. Todavia, é bom lembrar que alguns poucos domes lunares são íngremes - especialmente na região de *Marius Hills* (*região das Colinas de Marius*), e assim oferece evidência em mudanças nas características da lava - porque esfriou a taxas mais baixas de erupção.

As próximas formações são chamadas de áreas de "dark mantling" (" *manto escuro* "), como por exemplo, no chão da *Schrödinger Basin* (*localizada na face distante da Lua*). Estes foram formados pelo processo de " *fire fountaining* " (*fontes ou nascentes de fogo*).

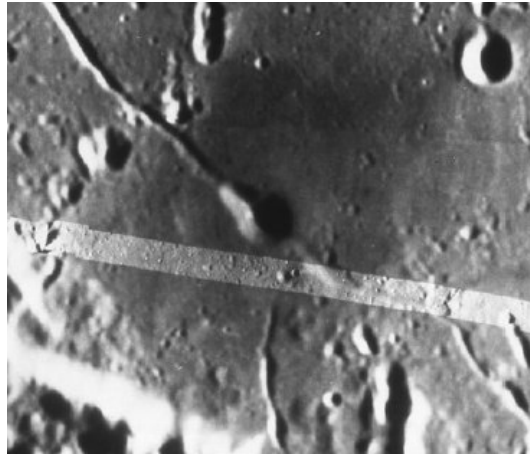


Imagem: Chão da basin Schrödinger. O halo escuro mede 5 km de diâmetro, proveniente de um evento vulcânico durante o período de maior vulcanismo na Lua, a mais de 3.5 bilhões de anos atrás.

Quando a lava está no interior do manto da Lua, ela está sob considerável pressão. Quando ela sobe à superfície, a pressão cai, permitindo que os gases apanhados pela lava escapem num processo chamado *degassing*. Estes gases, pensados como sendo monóxido de carbono ou gás carbônico, agem como propulsores, atirando a lava para o alto sobre a superfície lunar. Lá a lava esfria como contas escuras, vítreas. Quando a lava volta para a superfície lunar, estas contas produzem grandes remendos de “*dark mantling*” (manto escuro). As missões Apollo trouxeram algumas destas contas vulcânicas vítreas (as primeiras delas identificadas como “*vidro laranja*” - “*orange glass*”). Visualmente, estes remendos aparecem como grandes áreas, muito escuras e crateras baixas, que acontece ao redor das extremidades de bacias. Algum. exemplo excelente pode ser visto ao redor do *Mare Serenitatis*.

Finalmente, há duas características lunares incomuns produzidas através de vulcanismo. As **Crateras endógenas** (*endogenous crater*), como *Hyginus Rille*, são interpretadas como sendo de origem vulcânica, e provavelmente formada como características de colapso (*covas desmoronadas*). Só um retorno para a Lua com trabalho geológico adicional solucionará completamente a origem dessas formações.

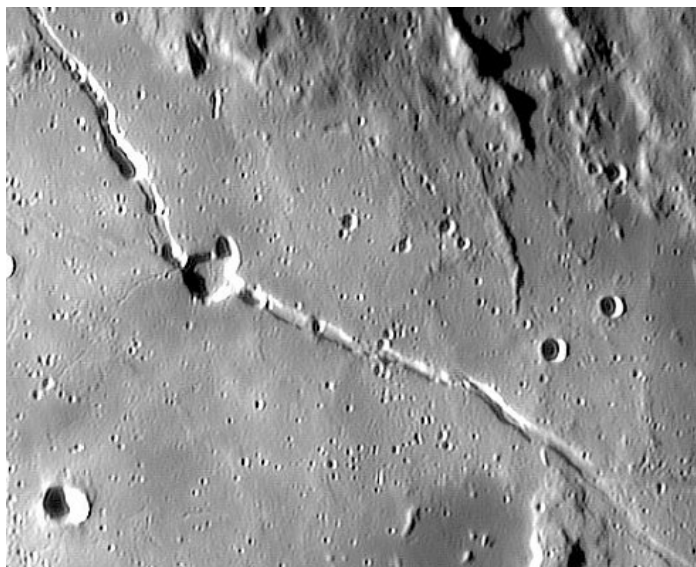


Imagem: Hyginus Rille (rima). Hyginus é uma das grandes crateras da Lua e não é provável que seja de origem de impacto. Hyginus não apresenta nenhuma borda sendo uma pressão com 1.5 km de profundidade. A chave para entender a origem de Hyginus provavelmente são as pequenas crateras de cova visível no rille a noroeste (esquerda) de Hyginus. Estas covas quase certamente formadas por colapso de um tubo de lava (lava tube). Características semelhantes acontecem nos flancos dos vulcões de proteção no Haváí. Pode ter havido uma fase explosiva associada com a formação de colapso de Hyginus baseado no halo escuro que a cerca. Este material - pyroclastic? - é ligeiramente visível aqui e é visto bem à lua cheia. Esta imagem de Ludiver também mostra um rille estreito no sudeste de Hyginus, assim como outro detalhes. Crédito de imagem: Bruno Daversin. <http://www.lpod.org/archive/2004/02/LPOD-2004-02-25.htm>

Como já vimos, outra característica incomum é a ' **Cratera de Halo Escuro**' (*dark halo*). Dois tipos de crateras de halo escuro acontecem, e ambos são associados com produtos vulcânicos. No tipo achado na *Cratera Alphonsus*, os halos são associados com rilles, e provável representa lugares de afloramento eruptivo com emanções de fogo. Assim não é surpresa que seus halos escuros sejam reminiscências do material da cobertura escura. O outro tipo de cratera de halo escuro acontece onde uma cobertura de ejeta luminoso que foram gerados pela cobertura de um fluxo de lava mais velho. Quando um recente impacto acontece ali, perfura a magra folha do ejeta luminoso e revela o fluxo de lava mais escuro em baixo dele. Os ejeta desta cratera incluirão esses materiais mais escuros. Um bom exemplo desse tipo de formação nos remete a *cratera Shorty* que foi visitada pela missão Apollo.