



GRUTAS NOS CÉUS / CAVES IN THE SKIES

Comité Científico / Scientific Committee
M. Maris, E. Bisesi, L. Silva, P. Barcelos, W. Geppert

Textos / Texts
M. Maris, P. Barcelos



European Astrobiology Institute



Associação Os Montanheiros



INAF - National Institute of Astrophysics



University of the Azores



G.S.M. - A.D.F.

ASTROBIOLOGIA E ESPELEOLOGIA

ASTROBIOLOGY AND SPELEOLOGY

INTRODUÇÃO

A Astrobiologia e a Espeleologia são campos de pesquisa interdisciplinares. O primeiro visa compreender a origem, evolução, distribuição e desenvolvimento da vida no Universo e procurar formas de a descobrir. A espeleologia é a ciência que estuda as cavidades naturais. O seu objetivo é compreender como as grutas foram formadas e evoluíram, como a água flui através delas e como a vida se adapta a um ambiente tão hostil. Apesar de séculos de especulação sobre o mundo subterrâneo e a vida além da Terra, tanto a Espeleologia quanto a Astrobiologia surgiram como ciências em meados do século XIX.

A Espeleologia teve origem na exploração de cavidades profundas, inclusive com o objetivo de traçar rios e lagos subterrâneos para fornecer novas fontes de água. A Espeleologia ganhou fundamentação teórica na Geologia, o que possibilitou a compreensão do processo de formação de cavernas conhecido como Espeleogénese.

A Astrobiologia Moderna remonta à publicação da *Origem das Espécies* de Charles Darwin, que revelou que a Vida é um fenómeno natural, entre outros. O processo de formação da Vida, a biogénese, foi uma consequência das leis da Natureza e poderia ser replicado além da Terra. Este novo paradigma surgiu ao mesmo tempo que novas técnicas astronómicas demonstravam que as estrelas e os planetas eram compostos pelos mesmos elementos químicos que a Terra. Hoje estamos mais otimistas quanto à possibilidade de encontrar vida noutras mundos. Muitas das moléculas básicas da vida, conhecidas como blocos construtores, são comuns no Universo, como evidenciado pela sua presença na poeira interestelar, meteoritos e cometas.

Desde o final do século passado, a Espeleologia e a Astrobiologia tornaram-se interligadas devido à descoberta de entradas de grutas nas superfícies da Lua e de Marte. A necessidade de desvendar os limites do desenvolvimento da Vida levou os (astro)biólogos a estudar os chamados extremófilos — organismos capazes de sobreviver e adaptar-se às condições severas de ambientes extremos — dos quais as grutas e o mundo hipogeu são exemplos.

INTRODUCTION

Astrobiology and Speleology are interdisciplinary research fields. The former aims to understand the origin, evolution, distribution, and development of life in the Universe and to search for ways to discover it. Speleology is the science that studies natural cavities; its scope is to understand how caves were formed and evolved, how water flows through them, and how life adapts in such a harsh environment. Despite centuries of speculation the underground world and the life beyond Earth, both Speleology and Astrobiology emerged as sciences in the middle of the 19th century.

Speleology originated from the exploration of deep caves, even with the goal of tracing underground rivers and lakes to provide new water sources. Speleology gained its theoretical foundation from Geology, which enabled the understanding of the process of cave formation known as Speleogenesis.

Modern Astrobiology traces back to the publication of Charles Darwin's *Origin of the Species* which revealed that Life is a natural phenomenon among others. The process of Life formation, biogenesis, was a consequence of the laws of Nature and could be replicated beyond Earth. This new paradigm emerged at the same time as new astronomical techniques demonstrated that stars and planets were composed of the same chemical elements as Earth. Today, we are more optimistic about the possibility of finding life on other worlds. Many of the basic molecules for life, known as building blocks, are common in the Universe, as evidenced by their presence in interstellar dust, meteorites, and comets.

Since the end of the last century, Speleology and Astrobiology have become intertwined due to the discovery of cave entrances on the surfaces of the Moon and Mars. The need to uncover the limits for the development of Life prompted (astro)biologists to study the so-called extremophiles — organisms capable of surviving and adapting to the severe conditions of extreme environments — of which caves and the hypogean world provide examples.

AMBIENTES EXTRATERRESTRES

EXTRATERRESTRIAL ENVIRONMENTS



UMA VISTA PANORÂMICA DA CRATERA GALE A PARTIR DO *CURIOSITY*

A superfície de Marte capturada pelo rover Curiosity da NASA na cratera Gale, perto do equador marciano. A imagem, tirada em 2019, retrata a superfície desértica do planeta, ocasionalmente fustigada por ventos com velocidades de até 100 km/h, resultando na formação de grandes tempestades de areia. Nuvens de poeira fina são visíveis no horizonte. A água líquida está ausente, pois as temperaturas da superfície flutuam entre -90°C e $+6^{\circ}\text{C}$. A pressão superficial é apenas 1% daquela existente na superfície da Terra, semelhante à pressão experimentada ao voar na Terra a uma altitude de 40 km. A atmosfera consiste principalmente de CO_2 , enquanto que o oxigênio fica preso nas rochas, conferindo a cor vermelha característica à paisagem marciana.

A PANORAMA OF THE GALE CRATER FROM *CURIOSITY*

The surface of Mars captured by the NASA Curiosity rover in the Gale crater, near the Martian equator. The image, taken in 2019, depicts the planet's desert surface, occasionally whipped by winds at speeds of up to 100 km/h, resulting in the formation of large sandstorms. Clouds of fine dust are visible on the horizon. Liquid water is absent, as surface temperatures fluctuate between -90°C and $+6^{\circ}\text{C}$. The surface pressure is merely 1% of that at Earth's surface, akin to the pressure experienced when flying on Earth at an altitude of 40 km. The atmosphere primarily consists of CO_2 , while oxygen is trapped in rocks, lending the characteristic red color to the Martian landscape.

FORA DA TERRA NO SISTEMA SOLAR

Na Terra, vivemos num ambiente confortável. A superfície é sólida, a pressão média é de 1 atmosfera e a temperatura média é de $+16^{\circ}\text{C}$. A água está disponível na forma líquida e o oxigênio para respirar é abundante. As radiações perigosas do espaço são bloqueadas pela atmosfera e pelo campo magnético. Existe outro lugar como este no Sistema Solar? Após séculos de especulação e pesquisa astronômica que culminaram no início da era da exploração espacial, a resposta tem sido um desapontante "NÃO". Outros locais do nosso sistema solar são demasiado frios ou demasiado quentes, sem ar ou possuem pressões atmosféricas terríveis e são atingidos por radiação cósmica letal. Vênus e Marte, os planetas que mais se assemelham à Terra, são um inferno quente e um deserto congelado.

OUTSIDE EARTH IN THE SOLAR SYSTEM

On Earth, we have the habit of living in a comfortable environment. There is a solid surface, the mean pressure is 1 atmosphere, and the mean temperature is $+16^{\circ}\text{C}$. Water is available as a liquid, and oxygen to breathe is abundant. Dangerous radiations from space are blocked by the atmosphere and the magnetic field. Is there any other place like this in the Solar System? After centuries of speculation and astronomical research culminating in the early era of space exploration, the answer has been a delusional "NO". Other places in our solar system are either too cold or too hot, airless or possess terrible atmospheric pressures, and are battered by lethal cosmic radiation. Venus and Mars, the planets which most resemble Earth, are a hot inferno and a frozen desert.

EXTREMÓFILOS

EXTREMOPHILES

VIDA EXTREMA EM LUGARES EXTREMOS

Tendo descoberto que os ambientes fora da Terra podem ser tão extremos, poderíamos perguntar se algum dia seria possível existir vida lá. Ou, dito de outra forma, quais são os limites da vida? Na Terra, a vida tem uma capacidade incrível de se adaptar a uma ampla gama de condições. Na verdade, temos visto organismos vivos sobreviverem sem oxigênio, resistirem a temperaturas extremamente baixas ou altas, prosperarem em ambientes altamente ácidos ou alcalinos, sobreviverem à radioatividade intensa e à aridez extrema, e habitarem áreas com poluição significativa ou nutrientes limitados. Estas condições não podem ser toleradas por nós, por isso chamamos estes organismos de extremófilos. Aqui apresentamos quatro deles.

EXTREME LIFE IN EXTREME PLACES

Having discovered that environments beyond Earth can be so extreme, we might ask whether life could ever exist there. Or, to put it another way, what are the limits of life? On Earth, life has an incredible capacity to adapt to a wide range of conditions. Indeed, we have seen living organisms survive without oxygen, withstand extremely low or high temperatures, thrive in highly acidic or alkaline environments, survive intense radioactivity and extreme aridity, and inhabit areas with significant pollution or limited nutrients. These conditions cannot be tolerated by us, so we call these organisms extremophiles. Here we presented four of them.



DEINOCOCCUS RADIODURANS

É um dos organismos conhecidos mais resistentes. Como o próprio nome sugere, esta bactéria é capaz de tolerar uma dose de radiação quinhentas vezes superior à dose letal para um ser humano. As culturas desta bactéria sobreviveram um ano de exposição no espaço a bordo da Estação Espacial Internacional.

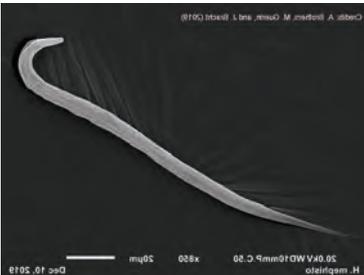
One of the most resistant organisms known. As its name suggests, this bacterium is able to tolerate a radiation dose five hundred times higher than the lethal dose for a human being. Cultures of this bacterium survived one year of exposure to space on board the International Space Station.



ECHINISCUS INSULARIS

Os tardígrados, popularmente conhecidos como *ursos-de-água*, são invertebrados extremamente resistentes. Com apenas 1 mm de comprimento sabe-se que sobrevivem em condições que matariam a maioria dos organismos. Eles podem suportar temperaturas que variam de -272°C a $+150^{\circ}\text{C}$, permanecer dessecados até 10 anos, exibir resistência excepcional à radiação e, quando desidratados, suportar meses em condições espaciais e ainda assim sobreviver.

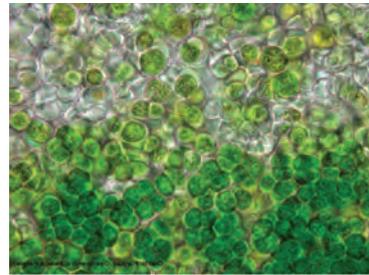
Tardigrades, popularly known as *water bears*, are extremely resilient invertebrates. At just 1 mm in length, they are known to survive under conditions that would kill most organisms. They can withstand temperatures ranging from -272°C to $+150^{\circ}\text{C}$, remain desiccated for up to 10 years, exhibit exceptional resistance to radiation, and, when dehydrated, endure months in space conditions and still survive.



HALICEPHALOBUS MEPHISTO

O “verme do diabo” foi descoberto numa mina sul-africana por G. Borgonie e seus colegas em 2011. Vive em fissuras de rochas cheias de água fóssil, a uma profundidade de pelo menos 1,3 km, num ambiente pobre em oxigênio. Embora organismos unicelulares tenham sido encontrados a 5 km abaixo da superfície, este é o organismo multicelular encontrado a maior profundidade. A sua presença mostra que a biosfera profunda poderia suportar formas de vida mais complexas.

The “devil worm” was discovered in a South African mine by G. Borgonie and colleagues in 2011. It lives in fissures in the rock filled with fossil water at a depth of at least 1.3 km. This is an environment poor of oxygen. Although unicellular organisms have been found 5 km below the surface, this is the deepest multicellular organism found. Its presence shows that the deep biosphere could support even complex life forms.



CHLOROGLOEOPSIS FRITSCHII

As cianobactérias são antigas bactérias fotossintéticas que surgiram na Terra há 3,5 mil milhões de anos. Elas desempenharam um papel crucial na evolução da vida na Terra primordial, oxigenando a atmosfera. Estes microrganismos são capazes de se adaptar a condições extremas e são considerados modelos para a fotossíntese em planetas de estrelas vermelhas, pois podem ajustar os seus sistemas fotossintéticos a mudanças substanciais no espectro de luz.

Cyanobacteria are ancient photosynthetic bacteria that appeared on Earth 3.5 billion years ago. They played a crucial role in the evolution of life on primordial Earth by oxygenating its atmosphere. These microorganisms are capable of adapting to extreme conditions and are considered models for photosynthesis on red star planets, as they can adjust their photosynthetic systems to substantial changes in the light spectrum.”

ANÁLOGOS EXTRATERRESTRES

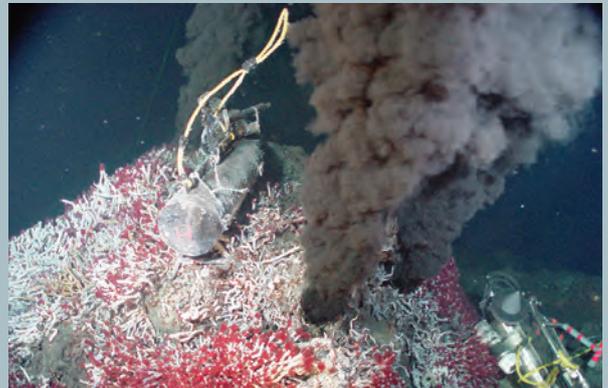
EXTRATERRESTRIAL ANALOGUES

OS NOSSOS LUGARES EXTRATERRESTRES NA TERRA

Para compreender os limites da nossa busca pela vida, devemos identificar locais na Terra que partilham semelhanças com ambientes extraterrestres e examinar os organismos vivos que os habitam. Esses locais são chamados de análogos extraterrestres. Ao procurarmos um análogo de um ambiente extraterrestre frequentemente encontramos locais onde a vida parece lutar para sobreviver – como desertos quentes, gelos antárticos, abismos oceânicos, cavernas profundas e fontes hidrotermais. Estes são lugares desafiadores para visitar e explorar. É comum pensar-se nestes locais como remotos; no entanto, quando vistos da perspectiva de um microrganismo, mesmo algo aparentemente tão simples como uma salina pode ser considerado um ambiente extremo. Ilustramos aqui apenas alguns deles.

OUR EXTRATERRESTRIAL PLACES ON EARTH

To understand the limits of our search for life, we must identify places on Earth that share similarities with extraterrestrial environments and examine the living organisms that inhabit them. These locations are referred to as extraterrestrial analogues. When searching for an analogue of an extraterrestrial environment, we frequently find places where life appears to struggle to survive—such as hot deserts, Antarctic ices, ocean abysses, deep caves, and hydrothermal vents. These are challenging places to access and explore. It is common to perceive these locations as remote; however, when seen from the perspective of a microorganism, even something as seemingly simple as a salt pan can be considered an extreme environment. We illustrate here only some of them.

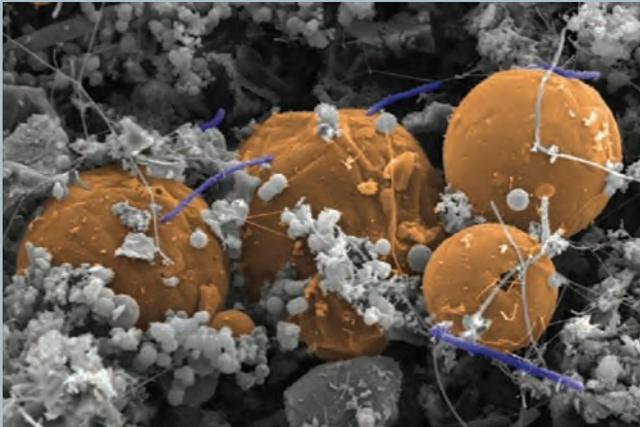


FUMAROLAS NEGRAS

Os fumarolas negras são estruturas subaquáticas semelhantes a chaminés a uma profundidade média de 2.100 m em regiões vulcânicas submarinas. São depósitos de sulfetos de ferro libertados por fluidos hidrotermais quentes (350°C) provenientes do fundo do mar. Os fluidos alimentam um ecossistema de bactérias consumidoras de sulfeto, que sustentam vermes vermelhos gigantes - *Riftia pachyptila* - que vivem nas paredes da fumarola.

BLACK SMOKERS

Black smokers are underwater chimney-like structures at an averaged depth of 2100 m in submarine volcanic regions. They are deposits of iron sulfides released by the hot (350°C) hydrothermal fluids coming from the sea floor. Fluids feed an ecosystem of sulfide eating bacteria which sustains the giant red worms - *Riftia pachyptila* - living on the walls of the smoker.

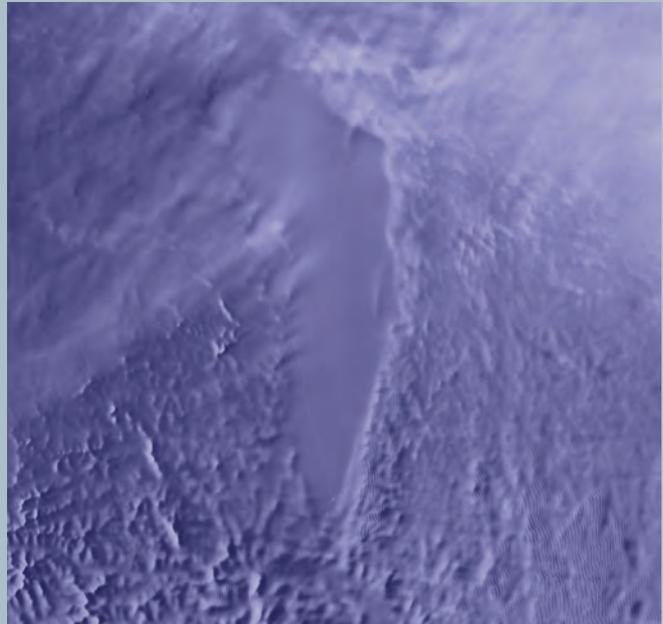


BIOSFERA PROFUNDA

De poucos metros a alguns quilómetros abaixo da superfície da Terra existe uma rica comunidade de organismos formando a chamada biosfera profunda. Esses organismos incluem todos os três domínios da vida, a sua diversidade genética rivaliza com a da superfície e a sua massa total é estimada em 15% da biosfera total. Por ser inacessível à luz solar, os organismos vivos neste ambiente tiveram de obter energia de outras fontes, como por exemplo, consumindo hidrogénio produzido pela serpentinização de rochas ou reações radioquímicas. Na imagem, células de *Candidatus desulforudis audaxviator* encontradas 2,8 quilómetros abaixo da superfície em África do Sul.

DEEP BIOSPHERE

From a few meters to several kilometers below the Earth's surface, a rich community of organisms exists, forming the so-called deep biosphere. These organisms include all three domains of life, and their genetic diversity rivals that on the surface. Their total mass is estimated to be 15% of the total biosphere. Being unreachable by sunlight, living organisms in this environment have had to obtain energy from other sources, such as consuming hydrogen produced by rock serpentinization or radiochemical reactions. In the image, cells of found 2.8 kilometers below the surface in South Africa.



LAGOS SUBGLACIAIS

São corpos de água líquida localizados centenas ou milhares de metros abaixo do gelo permanente, encontrados tanto no Ártico quanto na Antártida. A imagem mostra a marca deixada no gelo pelo Lago Vostok, na Antártida, o maior lago subglacial do mundo, situado 3,7 quilómetros abaixo do gelo. Completamente escuro e isolado da superfície, este lago é um dos lugares mais extremos do mundo. A análise de sua água sugere a presença de organismos vivos, mas os resultados ainda são debatidos.

SUBGLACIAL LAKES

These are bodies of liquid water located hundreds or thousands of meters below permanent ice, found in both the Arctic and Antarctica. The image shows the imprint left in the ice by Lake Vostok in Antarctica, the largest subglacial lake in the world, situated 3.7 kilometers below the ice. Being completely dark and isolated from the surface, this lake is one of the most extreme places in the world. Analysis of its water suggests the presence of living organisms, but the results are still debated.

GRUTAS

CAVES

UM INSTANTÂNEO DA ESPELEOGÊNESE

As grutas são o ambiente mais conhecido do mundo hipogeu. Uma visão antropocêntrica define as grutas como vazios abaixo da superfície de um planeta, grandes o suficiente para serem visitados por humanos. Mas é claro que para os organismos que vivem em grutas (coletivamente chamados troglóbios), mesmo os estreitos canais de drenagem que formam a rede de um aquífero representam um ambiente hipogeu significativo. Tal como outras estruturas geológicas, as grutas têm uma origem, um desenvolvimento e um fim.

Os processos que levam à formação e evolução das grutas são chamados de espeleogênese. Basicamente temos três formas de produzir vazios: mover materiais, erodir materiais ou acumulá-los. Grutas tectônicas, grutas de dissolução e tubos de lava são exemplos típicos desses processos. Até agora, a maioria das grutas descobertas fora da Terra, que apresentam potencial, são provavelmente tubos lávicos de origem vulcânica.

A SNAPSHOT OF SPELEOGENESIS

Caves are the most known environment of the hypogean world. An anthropocentric view defines caves as voids below the surface of a planet large enough to be accessed by humans. But of course for organisms living in caves (collectively called troglobies) even the narrow drainage channels forming the net of an aquifer represents a significant hypogean environment. As other geological structures caves have an origin, a development and an end.

The processes leading to the formation and evolution of caves are called Speleogenesis. Basically we have three ways to produce voids: moving materials, eroding materials or accumulating them. Tectonic caves, dissolution caves and lavatubes are typical examples of those processes. Up to now the majority of potential caves discovered outside the Earth are likely are of volcanic origin probably lavatubes.



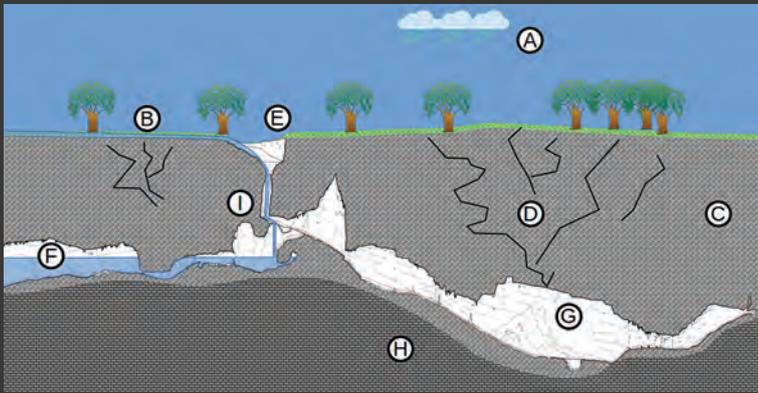
Credits: Wikipedia, Uranzu 2016

GRUTAS TECTÓNICAS GRUTAS DA GRAVIDADE

As cavidades podem formar-se unicamente devido a razões mecânicas: os movimentos diferenciais das camadas rochosas e os efeitos da gravidade. Se as rochas forem fortes o suficiente para manter o vácuo, podem-se desenvolver cavidades com seção triangular ou retangular. A imagem retrata a famosa *Caverna de Harpea*, nos Pireneus espanhóis.

TECTONIC CAVES CAVES FROM GRAVITY

Cavities may form solely due to mechanical reasons: the differential movements of rock layers and the effects of gravity. If the rocks are strong enough to maintain a vacuum, cavities with a triangular or rectangular section can develop. The image depicts the famous *Harpea's Cave* in the Spanish Pyrenees.



M. Mars 2023

GRUTAS DE DISSOLUÇÃO

GRUTAS COM ORIGEM NA ÁGUA

O tipo mais comum de grutas formadas por remoção de material são as Grutas Cársticas, que se desenvolvem em rochas de calcário ou gesso. Neste caso, a chuva (A) e as águas superficiais (B), acidificadas pelo dióxido de carbono atmosférico (CO₂), infiltram-se através de fissuras na rocha (D) num leito de rocha solúvel dissolvendo-a (C). Com o tempo, a erosão cria grandes buracos ou algares (E), que recolhem a água de riachos ou rios e a canalizam para um aquífero subterrâneo (F). A água corrente escava grandes cavidades (G), dissolvendo continuamente a rocha até atingir uma camada de rocha insolúvel (H), ou desvia-se do antigo rio subterrâneo formando uma nova cavidade (I). Muitas vezes o único acesso a este tipo de gruta é através dos seus algares (E).

DISSOLUTION CAVES

CAVES FROM WATER

The most common type of caves formed by material removal is Karst Caves which develop in rocks made of limestone or gypsum. In this case, rain (A) and surface water (B), acidified by atmospheric carbon dioxide (CO₂), percolate through cracks in the rock (D) in a bed of soluble rock dissolving it (C). Over time, erosion creates large sinkholes or pits (E), which collect water from creeks or rivers and channel it into an underground aquifer (F). The flowing water carves out large cavities (G), continuously dissolving the rock until it reaches a layer of insoluble rock (H), or a new cavity is formed, diverting the ancient underground river (I). Often, the only access to this type of cave is through their pits (E).



Courtesy: Os Montanhelros

TUBOS LÁVICOS E GRUTAS VULCÂNICAS

GRUTAS DE FOGO

Os tubos de lava são cavidades formadas através da deposição de material. Neste caso, um fluxo de lava derretida é canalizado por uma depressão do solo (A) e esfria, solidificando-se à superfície (B). O fluxo de lava isolado pode cobrir distâncias maiores. Quando a erupção termina a lava escoar, deixando o tubo de lava desprovido de lava (C). Aberturas, conhecidas como claraboias, podem-se formar por desmoronamentos do teto, permitindo o acesso à gruta (D).

LAVATUBES AND VOLCANIC CAVES

CAVES FROM FIRE

Lava tubes are cavities formed through material deposition. In this case, a flow of molten lava is channeled by a ground depression (A) and cools down, solidifying on its surface (B). The insulated lava flow can cover longer distances than on the outside surface. When the eruption ends, the lava tube becomes devoid of lava (C). Apertures, known as skylights, can form by collapse of its ceiling, allowing access to the cave (D).

ALGARES NA LUA

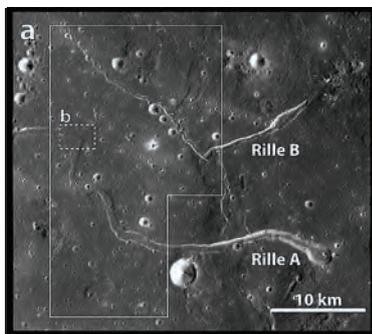
MOON PITS

UMA JANELA ABERTA PARA O SUBSOLO LUNAR

A presença de um ambiente hipogeu na Lua foi proposta muito antes das primeiras alunagens, quando foi sugerido que formações sinuosas na superfície, chamadas rillies ou rimae, poderiam ser traços visíveis de antigos tubos de lava lunares. Em 2009, a sonda japonesa SELENE descobriu o primeiro Algar lunar na região de Marius Hills, uma área vulcânica perto do equador lunar. Os algares lunares são pequenos – dezenas a centenas de metros de diâmetro – e só podem ser detectados por uma nave espacial equipada com câmaras de alta resolução.

AN OPEN WINDOW TO THE LUNAR UNDERGROUND

The presence of a hypogean environment on the Moon was proposed long before the first landings, when it was suggested that sinuous formations on the surface, called rillies or rimae, could be the visible traces of ancient lunar lava tubes. In 2009, the Japanese SELENE spacecraft discovered the first lunar pit in the Marius Hills region, a volcanic area near the lunar equator. Lunar pits are small – tens to hundreds of metres in diameter – and can only be detected by a spacecraft equipped with high-resolution cameras.

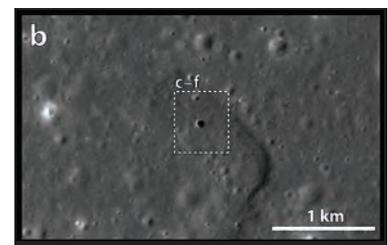


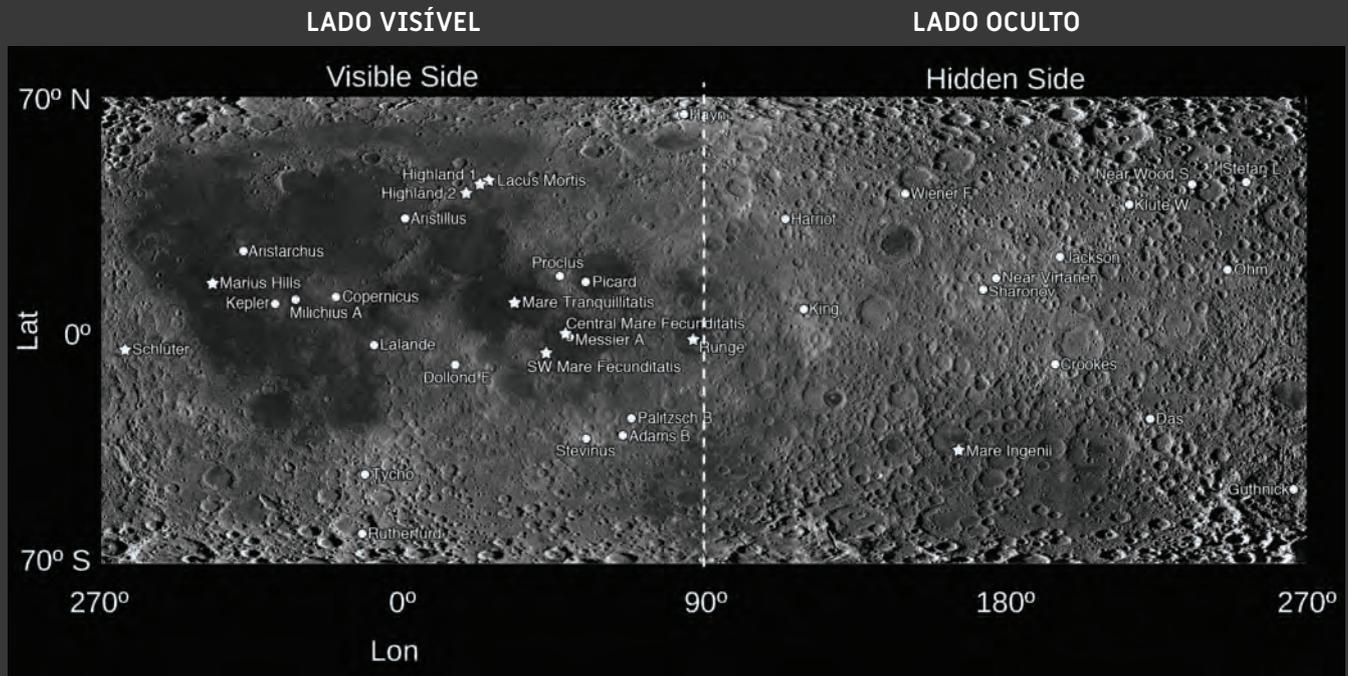
BURACO DE MARIUS HILLS

À esquerda, a região vulcânica das Colinas Marius com seus dois riachos sinuosos A e B. À direita, o Buraco das Colinas Marius na primeira imagem do SELENE. (Créditos: JAXA/Harujama *et al.* 2009)

MARIUS HILLS HOLE

At left the volcanic region of the Marius Hills with its two sinuous rillies A and B. At right the Marius Hills Hole in a SELENE image. (Credits: JAXA/Harujama *et al.* 2009)





(Credits: Wagner & Robinson 2014)

MAPA DOS ALGARES LUNARES

Mais de trezentos algares ou clarabóias foram descobertas na Lua e podem ser classificadas como de dois tipos. A maioria desses algares está localizada em lagoas Impact Melt. Estas regiões da Lua são onde os impactos de antigos asteroides formaram lagoas de rocha derretida. Alguns poços estão localizados no Lunar Maria, os mares lunares criados por enormes inundações de lava nos primeiros milhares de milhões de anos de existência da Lua. A diferença na localização faz com que os algares tenham propriedades distintas. Os algares nas regiões de Impact Melt estão frequentemente associados a fraturas e são geralmente menores e menos profundos do que aqueles nas regiões de Maria. O mapa mostra a localização dos mais importantes algares em lagoas de derretimento (representados por círculos) e dos algares de Maria (representados por estrelas) descobertos até agora na Lua. O mapa cobre todas as longitudes da Lua e latitudes de 70 graus Sul a 70 graus Norte. A linha vertical indica a fronteira entre a parte da Lua visível da Terra e a parte escondida da nossa visão.

MOON PITS MAP

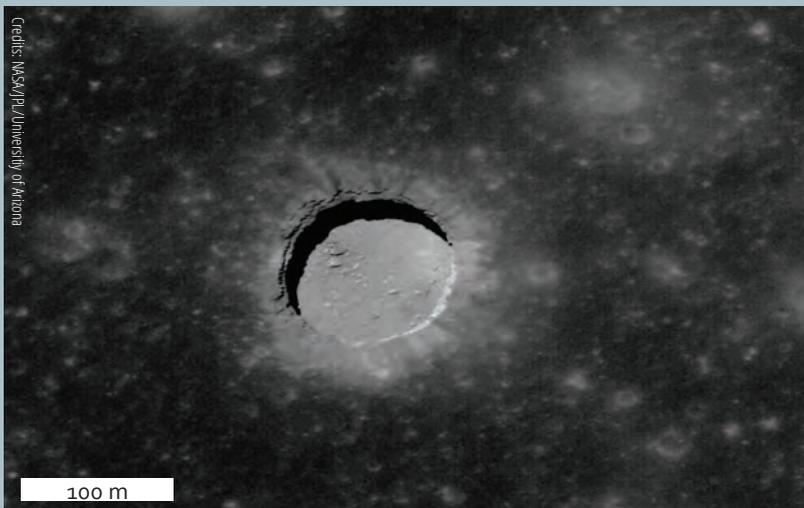
Over three hundred pits have been discovered on the Moon, and they can be classified into two types. The majority of these pits are located in Impact Melt ponds. These regions on the Moon are where the impacts of ancient asteroids formed ponds of melted rock. A few pits are located in the Lunar Maria, the lunar seas created by enormous floods of lava in the first billions of years of the Moon's existence. The difference in localization causes the pits to have distinct properties. Pits in Impact Melt regions are often associated with fractures and are generally smaller and less deep than those in the Maria regions. The map displays the localization of the most important melt pond pits (represented by circles) and maria pits (represented by stars) discovered up to now on the Moon. The map covers all the longitudes of the Moon and latitudes from 70 degrees South to 70 degrees North. The vertical line indicates the border between the part of the Moon visible from Earth and the part hidden to our view.

ORIGEM E FORMAS DOS ALGARES LUNARES

ORIGIN AND SHAPES OF MOON PITS

A origem exata destes algares ou buracos ainda é debatida, mas pelo menos para alguns deles a origem mais provável é o colapso de parte do teto de antigos tubos de lava. Nesse caso, os algares ou clabóias lunares seriam as aberturas para se descobrir a lua hipógea.

The exact origin of these pits or holes is still debated, but for at least some of them the most likely origin is the collapse of part of the ceiling of an ancient lava tube. If so, the lunar pits would be the openings from which to discover the hypogean moon.



Credits: NASA M144395745L

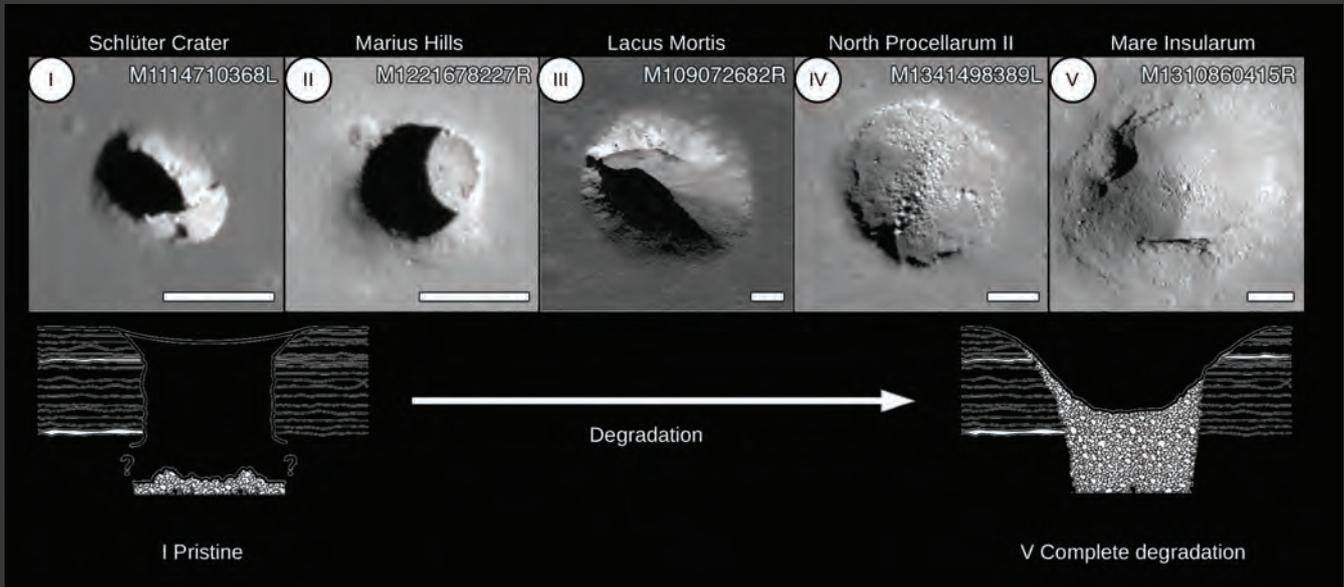


BURACO MARE TRANQUILLITATIS

Localizada no Mar da Tranquilidade, este é um dos mais famosos algares de Maria. De formato oval, as suas dimensões externas são de 170 m x 150 m, e atinge uma profundidade de pelo menos 110 m. A sombra sugere a presença de uma saliência, o que poderia indicar a continuação em direção a um vazio hipógeno. O chão é preenchido por um cone detrítico composto por materiais finos e pedras com cerca de 10 metros de tamanho, provavelmente um resquício do teto caído. Não são visíveis crateras meteoríticas maiores que alguns metros, que é o nível de definição da imagem, sugerindo que o buraco é uma formação geologicamente "jovem". No canto superior direito a imagem do buraco é tirada de outro ponto de vista mostrando o formato cônico do funil e a parede vertical de pelo menos 80 m de altura. A sua estrutura em camadas deve-se à sobreposição de diversas escoadas de lava. Observe também a presença de cavidades na parede. Ao combinar diferentes imagens, R. V. Wagner e M. S. Robinson em 2022 forneceram o perfil vertical, mostrado no canto inferior direito.

MARE TRANQUILLITATIS HOLE

Located in *Mare Tranquillitatis*, this is one of the most famous maria pits. Of oval shape, its outer dimensions are 170 m x 150 m, and it reaches a depth of at least 110 m. The shadow suggests the presence of an overhang, which could indicate a prosecution toward an hypogen void. The floor is filled by a detritic cone composed of fine materials and boulders about 10 meters in size, probably a remnant of the fallen ceil. No meteoritic craters larger than some meter, which is the level of definition of the image, are visible, suggesting that the hole is a geologically "young" formation. In the top right the pit image is taken from another point of view showing the conic shape of the funnel and the vertical wall of at least 80 m height. Its layered structure is due to the overlap of several lava floods. Note also the presence of cavities in the wall. By combining different images, R.V. Wagner and M.S. Robinson in 2022 provided the vertical profile shown at bottom right.



A ESCALA DE DEGRADAÇÃO WAGNER-ROBINSON

Apesar da Lua não ter água líquida nem atmosfera, os algares degradam-se com o tempo, principalmente devido à erosão produzida pelo bombardeio de meteoritos. De acordo com o esquema proposto em 2022 por R. V. Wagner e M. S. Robinson os algares podem ser classificados de acordo com cinco estágios de degradação. O Estágio I é um buraco quase imaculado após o colapso do teto. Nesta fase, os algares possuem buracos verticais e um piso desobstruído, coberto principalmente pelos detritos deixados pelo desabamento. Com o passar do tempo, o bombardeio de meteoritos e a instabilidade das rochas erodem os bordos do algar, alargando-o e enchendo-o com mais detritos. O algar torna-se menos vertical e forma-se um piso em formato de tigela. No Estágio V, o poço está quase completamente obstruído e é muito semelhante a crateras ou outras depressões, de modo que são difíceis de descobrir.

THE WAGNER-ROBINSON DEGRADATION SCALE

Despite the Moon does not have liquid water and an atmosphere, pits are degraded in time mainly due to erosion produced by meteoritic bombardment. According to the scheme proposed in 2022 by R.V.Wagner and M.S. Robinson pits can be classified according to five stages of degradation. The Stage I is the nearly *pristine* pit after the ceiling collapsed. In this stage pits have vertical shafts and an unobstructed floor mainly covered from the debris left by the collapse. As time passes meteoritic bombardment and rock instability erodes the borders of the pit widening it and filling with further debris. The pit becomes less vertical and a bowl shaped floor forms. In Stage V the pit is nearly completely obstructed and are very similar to crateras or other depressions so that they are difficult to discover.

ALGARES DE MARTE

MARS PITS

O PLANETA DOS MIL ALGARES

Em Marte foram descobertos até agora mais de mil algares, que podem ser bons candidatos a entradas para grutas. Como são observados apenas por satélites, são atualmente classificados como potenciais entradas de grutas até que a exploração direta confirme sua natureza. A maioria desses algares são formações vulcânicas ou vulcano-tectônicas, embora alguns surjam em terrenos que parecem cárscicos.



Credits: Kushing et al. 2015

THE PLANET OF A THOUSAND PITS

On Mars, more than a thousand pits, which could be candidate cave entrances, have been discovered up to now. Since they are observed only from satellites, they are currently classified as potential cave entrances until direct exploration will confirm their nature. Most of these pits are volcanic or volcano-tectonic formations, although some open in karst-like terrains.



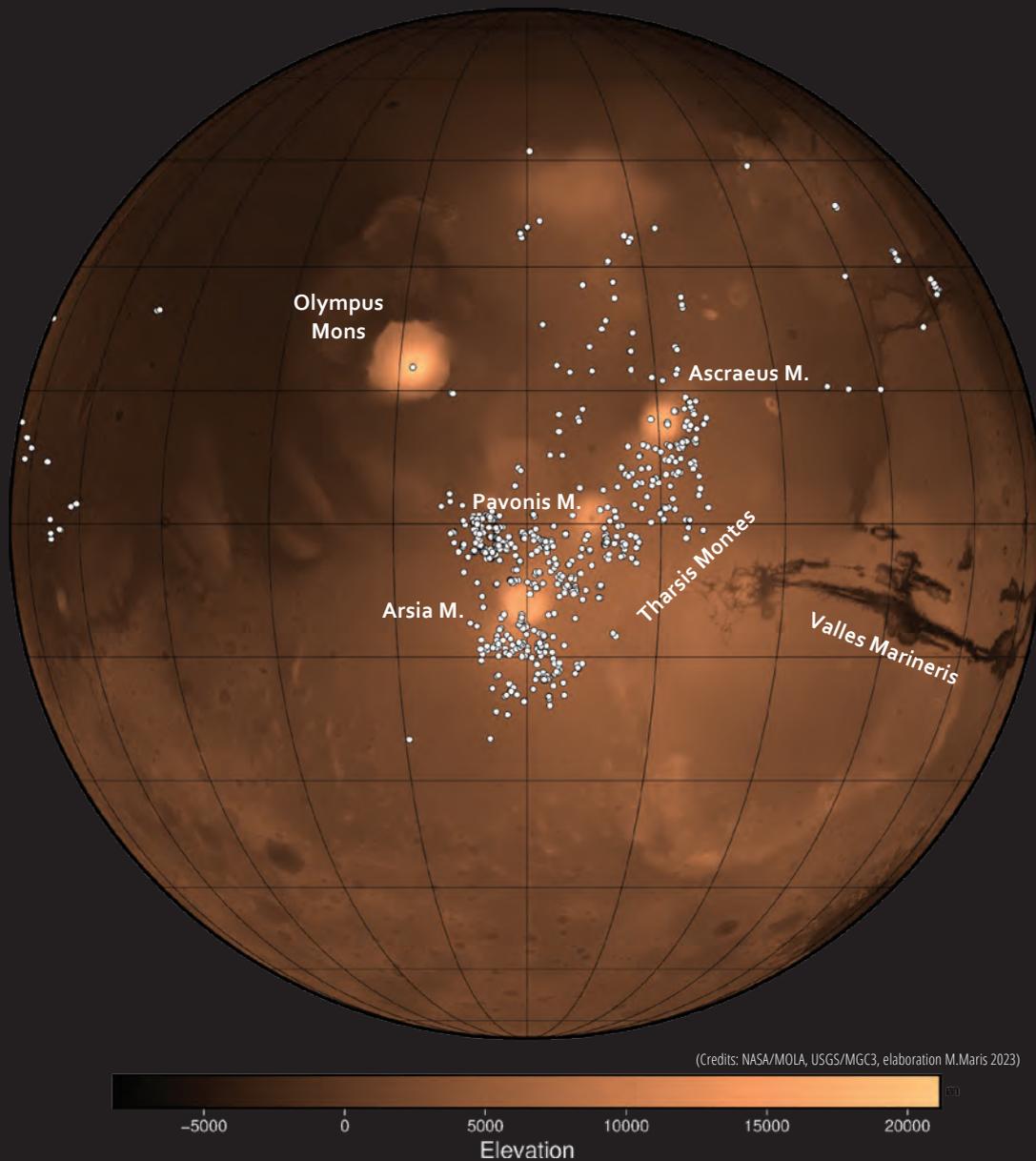
NASV/PL-Caltech/Arizona

ALGARES TIGELA E CRATERAS ATÍPICAS EM MARTE

Na Terra, as entradas das grutas são frequentemente encontradas em depressões. Por muito tempo, imagens de satélite de Marte revelaram depressões em forma de tigela como as da imagem A, conhecidas como crateras bowl pit. Essas depressões são relativamente rasas em comparação ao seu diâmetro que pode chegar a cinco quilômetros. Frequentemente formam cadeias com vários quilômetros de comprimento e estão localizadas dentro de falhas ou outras estruturas geológicas. Não se espera que possuam grutas que possam ser exploradas. Nos últimos vinte anos novos satélites revelaram aberturas redondas, escuras e solitárias muito menores no solo, como aquela no norte de Arsia Mons, mostrada na figura B. Elas são frequentemente encontradas longe de qualquer estrutura geológica, mesmo em terrenos quase planos, e em relação ao seu diâmetro são mais profundas e verticais do que os Algares em tigela. Em homenagem à sua peculiaridade, são chamadas de Crateras atípicas e são consideradas as principais candidatas à entrada de tubos de lava em Marte.

BOWL PITS AND ATYPICAL PITS ON MARS

On Earth, cave entrances are often found in depressions. By long time satellite images of Mars revealed bowl-shaped depressions as those in the image A, known as bowl pit craters. These depressions are relatively shallow in comparison to their diameter, which can be as large as five kilometers. They often form chains several kilometers long and are frequently located within faults or other geological structures. They are not expected to host caves which can be explored. In the last twenty years new satellites revealed much smaller solitary, dark, round apertures in the ground like the one at North of Arsia Mons shown in the figure B. They are often found far from any geological structure, even on nearly flat terrains, and relative to their diameter they are deeper and more vertical than bowl pit craters. In honour to their peculiarity they are referred to as Atypical Pit Craters and are considered the primary candidates for lava tube entrances on Mars.



ENTRADAS POTENCIAIS DE GRUTAS NA REGIÃO DE THARSIS

Este mapa altimétrico está centrado na região de Tharsis, uma região vulcânica jovem e complexa que inclui os Montes Tharsis e o gigante Olympus Mons. Tharsis abriga cerca de três quartos das potenciais entradas conhecidas, marcadas com círculos brancos no mapa.

CANDIDATE CAVES ENTRANCES IN THE THARSIS REGION

This elevation map is centered on the *Tharsis region*, a young and complex volcanic region that includes the Tharsis Montes and the giant Olympus Mons. Tharsis hosts about three quarters of the known caves candidate entrances, marked with white circles on the map.

AS CRATERAS ATÍPICAS DE MARTE

THE ATYPICAL PITS OF MARS

FORMA DAS CRATERAS ATÍPICAS DE MARTE

Segundo Cushing e seus colegas, os tipos mais frequentes de algares, com potencial com possível entradas de grutas, podem ser classificados em três tipos observando-se o diâmetro em relação à profundidade, o formato das paredes e a quantidade de detritos no fundo. É possível que esses três tipos representem três estágios de evolução de um algar. Nesse caso, um algar recém-nascido seria do tipo TI. Com o tempo rochas instáveis se separariam e cairiam, criando um TII ou, com o tempo, um TIII. (Créditos: Cushing et al 2015)

SHAPES OF ATYPICAL MARS PITS

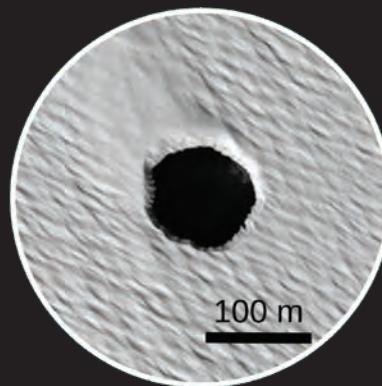
According to Cushing and colleagues, the most frequent kind of pits which are candidate cave entrances can be classified in three types by looking at their diameter relative to their depth, at the shape of the walls and at the amount of debris at their bottom. It is possible that those three types could represent three stages of evolution of a pit. If so a newly born pit would be of TI type. With time unstable rocks would detach and fall creating a TII or, with time a TIII pit. (Credits: Cushing et al 2015)

ALGARES TI

Esses são algares em forma de cinto. Têm diâmetro menor que o TII e o TIII, mas têm maior profundidade.

TI PITS

Those are belt shaped pits. They are smaller in diameter than the TII and TIII but they have greater depth.

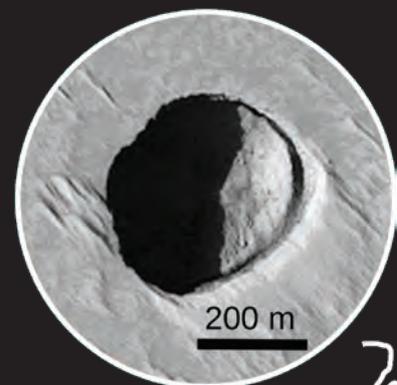


ALGARES TIII

Apresentam paredes verticais estreitando na parte inferior. Eles têm o maior diâmetro e a menor profundidade. O chão está completamente cheio de detritos.

TIII PITS

They have only vertical walls declining at the bottom. They have the largest diameter and most shallow depth. Their floor is completely filled of debris.

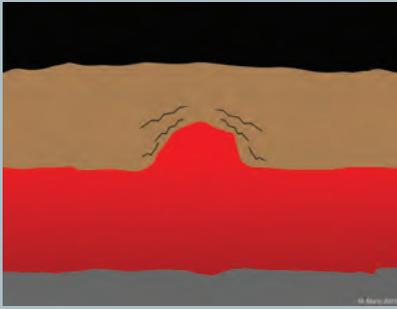


ALGARES TII

Possuem paredes mais verticais, profundidade e diâmetro intermédios entre TI e TIII, e muitos detritos no fundo.

TII PITS

They have more vertical walls, Depth and diameter are intermediate between TI and TIII. They have mounds of debris at their bottom.

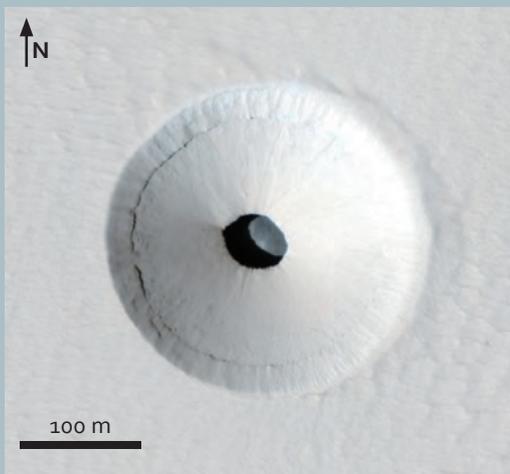


UMA POSSÍVEL ORIGEM PARA AS CRATERAS ATÍPICAS EM MARTE

G. E. Cushing, C. H. Okubo e T. N. Titus em 2015 sugeriram uma possível origem das crateras atípicas marcianas. A intrusão de magma no teto de um tubo lávico subterrâneo cria uma cavidade instável (esquerda). Quando o magma escoava fica um vazio com cobertura instável (centro). Pedras caem do teto alargando o vazio até este irromper à superfície formando um Algar do tipo TI (direita).

A POSSIBLE ORIGIN OF ATYPICAL MARS PITS

G. E. Cushing, C. H. Okubo and T. N. Titus in 2015 suggested a possible origin of the Atypical Martian pits. The intrusion of magma toward the ceiling of an underground lavatube creates a cavity (left). When magma floods away a void is left with an unstable ceiling (center). Rocks fall from the ceiling widening the void until it breaks to surface forming a pit of kind TI (right).



ALGAR PAVONIS MONS

À esquerda o famoso e belo algar no flanco leste do Pavonis Mons. O funil tem um diâmetro externo de 195 m. Em abaixo está uma reconstrução hipotética da sua seção, a partir dos poucos dados disponíveis. A profundidade estimada é de 90 m.

PAVONIS MONS PIT

At left the famous and beautiful pit on the East flank of Pavonis Mons. The funnel has an outer diameter of 195 m. An hypothetical reconstruction of its section from the few data available is shown below. The estimated depth is 90 m.

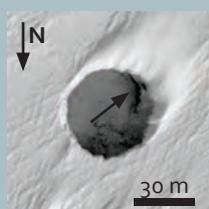


UMA GRUTA REVELADA?

Não sabemos se ou quais dos algares marcianos que se abrem para vazios hipogeuos. No entanto, este algar TI, localizado a sudoeste de Arsia Mons nas proximidades de uma longa cadeia de algares, parece ter uma abertura que poderia fornecer acesso a um espaço subterrâneo.

A CAVE REVEALED?

We do not know if, or which, Martian pits open into larger hypogean voids. However, this TI pit, located to the southwest of Arsia Mons in the vicinity of a long chain of bowl pits, appears to have an opening that could provide access to an underground space.

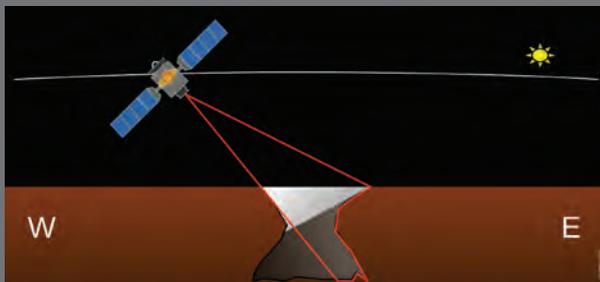


DESCOBRINDO GRUTAS EXTRATERRESTRES

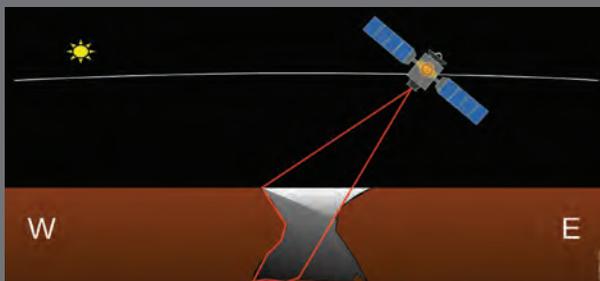
DISCOVERING EXTRATERRESTRIAL CAVES

Hoje a única maneira de descobrir grutas em Marte ou na Lua é descobrir a sua presença a partir dos satélites que as orbitam. O método mais importante é combinar imagens de satélite, mas outros métodos como radares, imagens térmicas e gravimetria podem ser utilizados.

Today, the only way to discover caves on Mars or the Moon is to find their presence from satellites orbiting them. The most important method is to combine satellite images, but other methods as radars, thermal imaging and gravimetry can be used.



Morning



Afternoon

IMAGENS DE SATÉLITE

Quando um satélite sobrevoa a entrada de uma gruta ele observa apenas parte do que está dentro. Diferentes pontos de vista e iluminações podem ser obtidos observando a abertura em diferentes posições e momentos do dia.

SATELLITE IMAGES

When a satellite flies over a cave entrance, it may observe only part of what is inside. Different points of view and illuminations can be obtained by observing the pit from different positions and in different parts of the day.

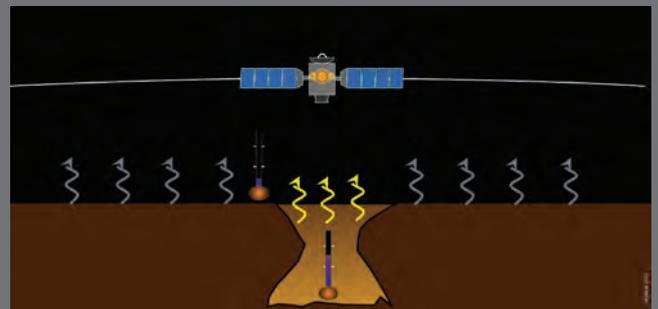
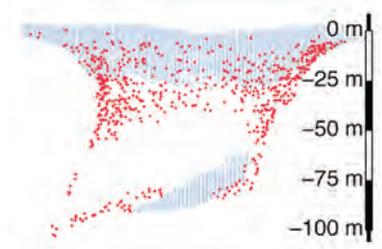
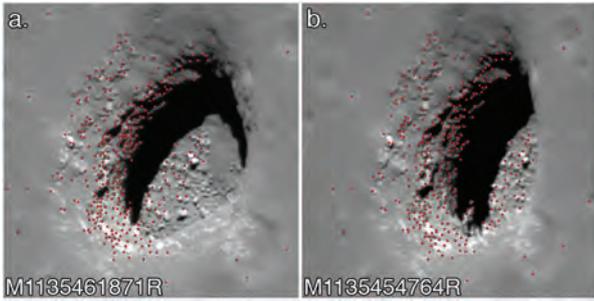


IMAGEM TÉRMICA INFRAVERMELHA

A temperatura dentro de uma gruta permanece estável ao longo do tempo. Uma gruta parece fria quando o exterior está quente e quente quando o exterior está frio, uma das razões mais importantes pelas quais as grutas podem servir como bons abrigos. Portanto, um satélite equipado com uma câmara de infravermelhos à noite irá ver a entrada de uma gruta como um ponto brilhante contra um fundo escuro.

INFRARED THERMAL IMAGE

The temperature inside a cave remains stable over time. A cave seems cold when the outside is warm and warm when the outside is cold. This is one of the most important reasons why caves can serve as good shelters. Therefore, a satellite equipped with an infrared camera looking at night will see a cave entrance as a bright spot against a dark background.

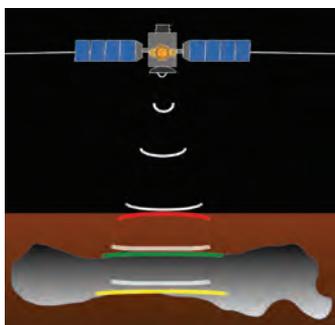


PERFIL DO ALGAR DE MARE INGENII

Ao combinar diferentes imagens, incluindo as duas no topo, os planetologistas inferiram a forma e as dimensões do algar Mare Ingenii na Lua, conforme mostrado abaixo. A nuvem de pontos vermelhos são marcadores utilizados para a reconstrução.

PROFILE OF THE MARE INGENII PIT

By combining different images, including the two at the top, planetologists inferred the shape and dimensions of the Mare Ingenii Pit on the Moon, as shown below. The cloud of red points are markers used for the reconstruction.



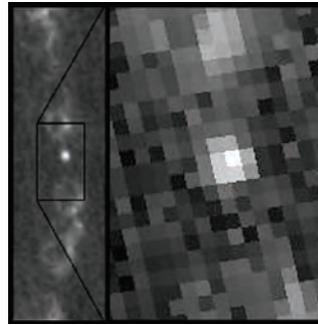
RADAR

Uma caverna pode ser detectada usando um radar de penetração no solo. Parte da emissão do radar é refletida de volta para o satélite a partir da superfície (a linha vermelha na figura). Outra parte

se propaga no subsolo, se existirem descontinuidades subterrâneas, como o teto (verde) ou o chão (amarelo) de uma gruta, são produzidos ecos de radar mais fracos, mas característicos.

RADAR

A caves can be detected by using a ground penetrating radar. Part of a radar pulse reflects back to the satellite from the surface (the red line in the figure). Another part propagates underground, if subterranean discontinuities exist, such as the ceiling (green) or the floor (yellow) of a cave, weaker but characteristic radar echoes are produced.



(Credits: THEMIS/ Cushing, Okubo, Titus 2015)

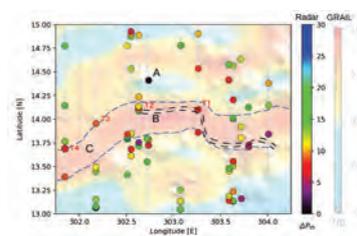
O ALGAR QUENTE DE THARSIS

Uma cratera atípica ao norte de Arsia Mons em Marte observada com a câmara de infravermelhos THEMIS (Thermal Emission Imaging System) a bordo da missão Mars Odyssey. A imagem foi tirada pouco antes do

amanhecer, quando o solo ao redor do algar está mais frio. O algar é o ponto brilhante no centro da imagem. Observe a cadeia de aberturas em forma de tigela que são ligeiramente mais quentes que o solo.

THE WARM ARSIA MONS PIT

An Atypical Pit Crater north of Arsia Mons on Mars observed with the THEMIS (Thermal Emission Imaging System) infrared camera onboard the Mars Odyssey Mission. The image has been taken just before dawn, when the ground surrounding the pit is colder. The Pit is the bright spot at the center of the image. Note the chain of bowl shaped pit which are just slightly warmer than the ground.



SISTEMA MARIUS HILLS

Em 2017, usando o Lunar Radar Sounder a bordo da sonda japonesa SELENE, T. Kaku e seus colaboradores

identificaram um sistema potencial de tubos de lava na região de Marius Hills na Lua, perto do Marius Hills Hole (A). Os círculos vermelhos no mapa são locais onde o SELENE detectou ecos de radar significativos. Eles estão alinhados com canais sinuosos na superfície lunar (B). Nesta mesma região, a sonda americana GRAIL mapeou uma redução local na gravidade lunar, a faixa vermelha clara (C), que é outra indicação potencial da presença de grandes cavidades.

MARIUS HILLS SYSTEM

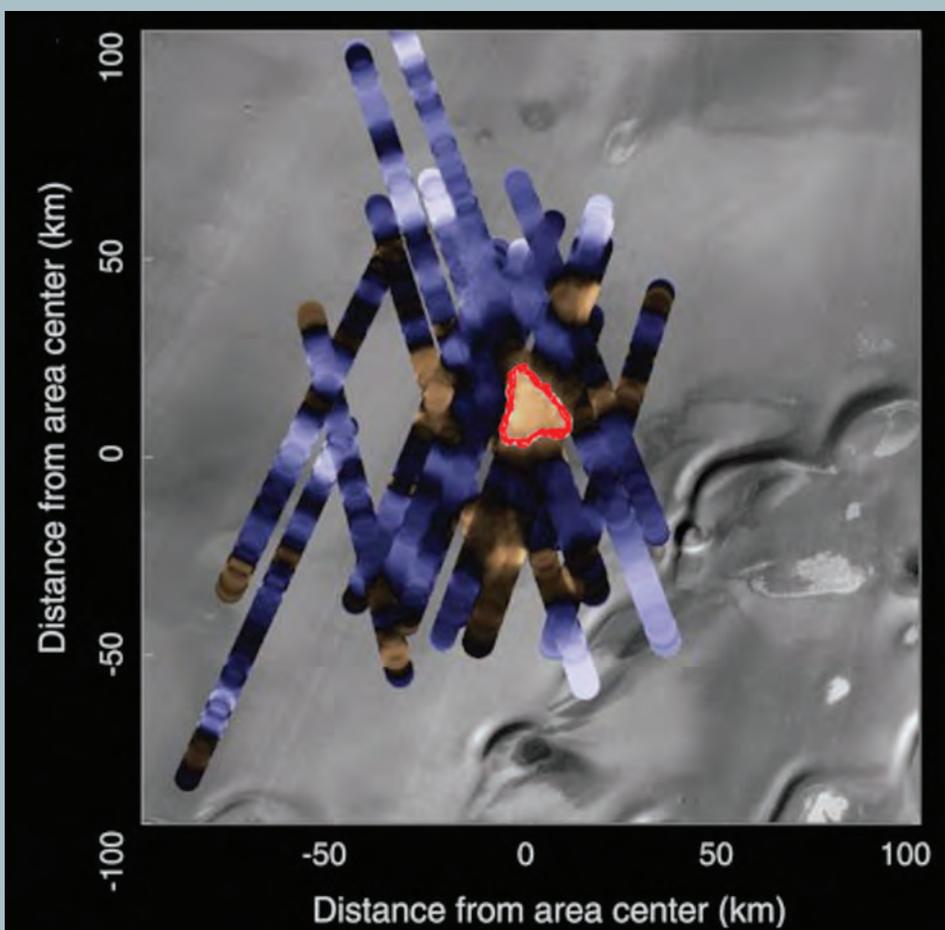
In 2017, using the Lunar Radar Sounder onboard the Japanese SELENE probe, T. Kaku and his collaborators identified a potential system of lava tubes in the Marius Hills region on the Moon, near the Marius Hills Hole (A). The red circles in the map are locations where SELENE detected significant radar echoes. They are aligned with sinuous rilles on the lunar surface (B). In this same region, the American GRAIL probe mapped a local reductions in lunar gravity, the light red band (C), which is another potential indication of the presence of large cavities.

UM LAGO ENTERRADO EM MARTE?

A BURIED LAKE ON MARS?

O mundo hipogeu não se limita às grutas. Em 2018, pela primeira vez na história da exploração de Marte, o radar italo-americano MARSIS a bordo da missão Mars-EXPRESS da ESA revelou a possível presença de uma massa de água líquida 1,5 km abaixo da superfície. O MARSIS, capaz de penetrar 4 ou 5 km no terreno marciano, detetou um eco de radar inulgarmente forte sob a calota polar sul marciana. O eco pode ser explicado pela presença de um corpo subglacial de água líquida numa área de cerca de 20 quilômetros quadrados. A sua temperatura é estimada entre -20 °C e -10 °C e a água provavelmente não congela devido à presença de sais de perclorato, que atuam como anticongelante. Lagos semelhantes existem sob os mantos de gelo do Ártico e da Antártida, sendo o mais famoso o Lago Vostok, na Antártida.

The hypogean world is not limited to caves. In 2018, for the first time in the history of Mars exploration, the Italian-American MARSIS radar aboard the ESA Mars-EXPRESS mission revealed the possible presence of a body of liquid water 1.5 km beneath the surface. MARSIS, capable of penetrating the Martian terrain for 4 or 5 km, detected an unusually strong radar echo under the Martian south polar cap. The echo can be explained by the presence of a subglacial body of liquid water in an area of about 20 square km. Its temperature is estimated to be between -20 °C and -10 °C, and water likely does not freeze due to the presence of perchlorate salts, which act as antifreeze. Similar lakes exist beneath the Arctic and Antarctic ice sheets, with the most famous one being Lake Vostok in Antarctica.



As listras sobrepostas a este mapa topográfico de Marte são varreduras do radar MARSIS a bordo da Mars Express. A cor azul indica um eco de radar fraco, enquanto a cor amarela representa um eco forte. Os limites do possível lago estão representados em vermelho.

The stripes overlaid on a topographic map of Mars are scans from the MARSIS radar on board Mars Express. The blue color indicates a weak radar echo, while the yellow color represents a strong echo. The boundaries of the possible lake are depicted in red.

EXPLORANDO GRUTAS

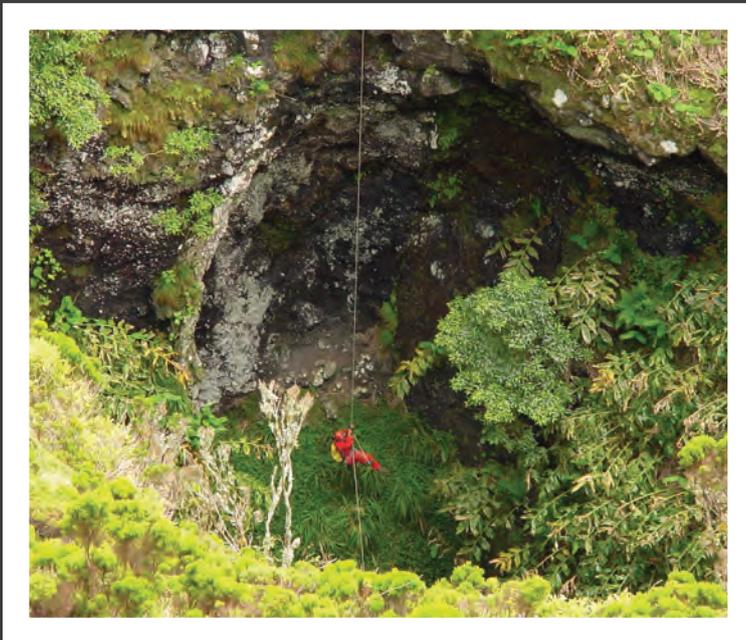
EXPLORING CAVES

DESAFIOS

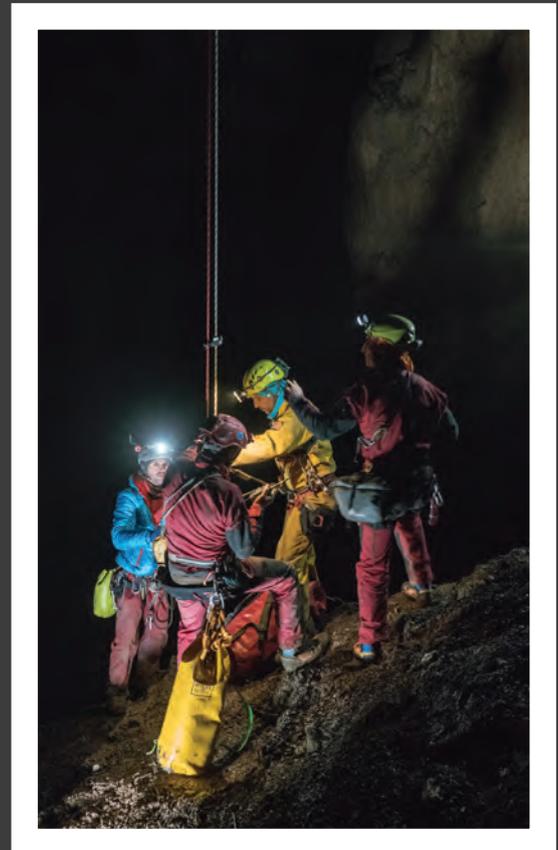
A exploração subterrânea implica enfrentar inúmeros desafios, incluindo a escuridão, a queda de pedras, os poços verticais, o isolamento, a falta de comunicação, de alimentos e de energia, e o facto de não existirem máquinas que substituam o trabalho dos músculos humanos. Em suma, a espeleologia não é uma actividade individual, mas requer uma equipa bem motivada e experiente para fazer progressos significativos e seguros. Aqui mostramos alguns desses desafios deles.

CHALLENGES

Underground exploration entails confronting numerous challenges, including darkness, falling rocks, vertical pits, isolation, lack of communication, food and energy, and the fact that there are no machines to replace the work of human muscles. In short, speleology is not a one-person activity but requires a well-motivated and experienced team to make significant and safe progress. Here we show some of them.



Associação Os Montanheiros





Associação Os Montanheiros, 1962



SSI, 1998

VERTICALIDADE

A profundidade é o parâmetro chave na descrição imediata de uma gruta, muitas vezes expressa em centenas de metros de algares e passagens verticais. Os espeleólogos tiveram de encontrar maneiras de se mover verticalmente. Inicialmente, foram empregues cordas de cânhamo, escadas de corda e outros sistemas de fabrico próprio. No entanto, estes materiais eram pesados, difíceis de transportar, muitas vezes deterioravam-se rapidamente, exigiam a assistência de várias pessoas e dificultavam o estabelecimento de padrões de segurança. Na década de 1970 a introdução da técnica de corda única reduziu o tempo necessário para descer um algar de cem metros, de horas a minutos, permitindo que os indivíduos avancem sozinhos, de forma autónoma, ou em pequenos grupos e tornando a espeleologia incomparavelmente mais segura.

VERTICALITY

Depth is a key parameter in describing a cave in a snapshot, often expressed in hundreds of meters of vertical pits and passages. Speleologists have had to find ways to move vertically. Initially, hemp ropes, rope ladders, and other self-made systems were employed. However, these materials were heavy to transport, often rapidly deteriorated, required the aid of people from outside, and hindered the establishment of safety standards. In the 1970s, the introduction of the single rope technique reduced the time it took to traverse a hundred-meter pit from hours to minutes, enabling individuals to move alone or in small groups and making speleology incomparably safer.



ESCURIDÃO

Poucos metros após a entrada as grutas tornam-se escuras. Os espeleólogos dependem inteiramente de fontes de luz artificial, fazendo com que se assemelhem a uma bolha de luz suspensa num mar de escuridão. Até ao advento das luzes individuais baseadas em LED, até há menos de duas décadas foi o icónico farol de metal duro que serviu como fonte primária de luz, durante mais de um século. Agora, cada espeleólogo carrega luz suficiente para iluminar vazios subterrâneos com centenas de metros de largura.

DARKNESS

A few meters after their entrance, caves become dark. Speleologists rely entirely on artificial light sources, making a speleologist resemble a bubble of light suspended in a sea of darkness. Until the advent of individual LED-based lights less than two decades ago, the iconic carbide headlamp had served as the primary source of light for over a century. Now, each speleologist carries enough light to illuminate underground voids hundreds of meters wide.



(CNSAS 2022)

SALVAMENTO

Por vezes, na exploração de grutas, as coisas podem dar errado. Os espeleólogos são treinados para se salvarem a si próprios durante as expedições. Porém, quando as coisas ficam muito difíceis, um Serviço de Resgate Espeleológico altamente especializado, capaz de operar em grutas com até milhares de metros de profundidade, é a única forma de garantir que o ferido volte para casa.

RESCUE

Sometimes in cave exploration, things may go wrong. Speleologists are trained to self-rescue while exploring. However, when things become too difficult, a highly specialized Speleological Rescue Service, capable of operating in caves even thousands of meters deep, is the only way to ensure an injured speleologist to back home.



GARGALOS

No espaço de algumas dezenas de metros, o caminho numa gruta pode transformar-se sem aviso prévio numa sucessão de grandes algares verticais ou numa série de túneis estreitos e sinuosos que forçam o espeleólogo a rastejar através de lama, pedras ou rocha áspera, muitas vezes para no final perceber que saiu no cimo de uma parede altíssima, ou que o túnel não tem continuação.

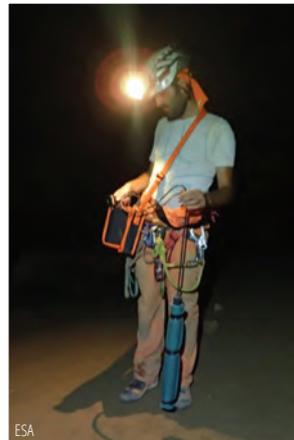


BOTTLENECKS

In the span of just a few tens of meters, the path inside a cave can unexpectedly change from a vertical shaft to a narrow, winding tunnel. This transformation may require speleologists to halt their vertiginous descent along the rope and crawl through mud and stones. However, it is not impossible that at the end of such a narrow passage, they will find themselves hanging from the ceiling of a very high hall



SLOVAČKA JAMA, Credits: Dalibor Paar



ESA

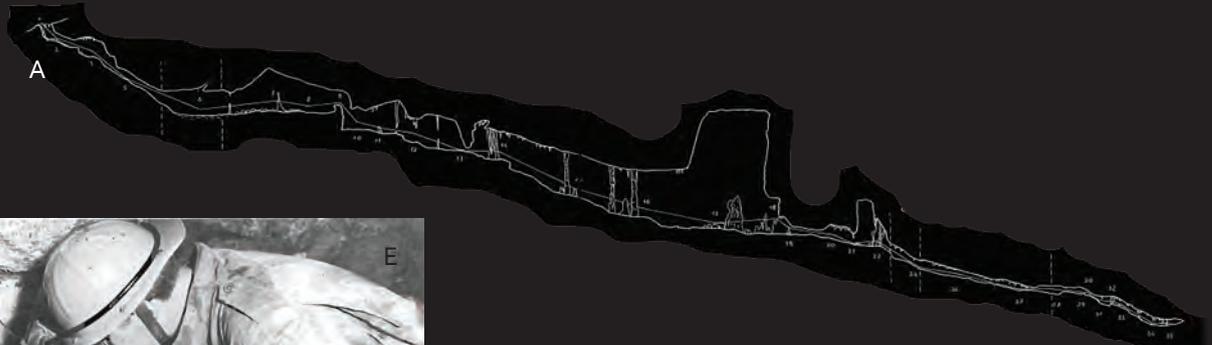
COMUNICAÇÃO EM GRUTAS

A maioria dos sistemas de comunicação de alta tecnologia que usamos hoje simplesmente não funciona em grutas, pois as ondas de rádio dificilmente se propagam através da rocha. Ainda hoje, na maioria dos casos, a única maneira de enviar comunicações para a superfície é mandar alguém sair. A antiga tecnologia de telefones de campo conectados entre a gruta e a superfície continua competitiva (em cima, à esquerda), embora alguns sistemas de rádio especiais também possam ser usados (em cima, à direita).

COMMUNICATION IN CAVES

Most of the hi-tech communication systems we use these days simply do not work in caves, as radio waves hardly propagate in the rock. Even today, in most cases, the only way to send communications to the surface is to have someone go outside. The old technology of field telephones wired between the cave and the surface remains competitive (above, on the left), although some special radio systems can also be used (above, on the right).

Entrada / Entrance



Grotta Paranco, FVG Servizio Geologico (1984)



MAPEANDO UMA GRUTA

Uma gruta não pode ser considerada como explorada até que uma topografia detalhada do seu interior seja produzida. No entanto, o GPS não funciona em grutas. A única forma de mapear uma gruta é registrando o caminho percorrido pelo espeleólogo ao explorá-la. Portanto, um espeleólogo deve anotar a orientação de seu caminho em relação ao norte, a inclinação e a distância percorrida. Estas três medidas devem ser registradas a cada curva, subida ou descida. Ao combinar muitos destes segmentos, torna-se possível criar um perfil vertical da gruta, como em (A), ou um mapa. Antigamente, essas informações eram obtidas por meio de uma fita métrica (B), uma bússola (C), um clinómetro (D), cordas para indicar a direção (E) e um caderno de papel. Hoje em dia utiliza-se o mesmo método, mas com o auxílio de dispositivos eletrônicos que permitem a recolha e armazenamento dessas três medidas básicas (F) ou, mais recentemente, com o uso de scanners LASER especializados (G).

MAPPING A CAVE

A cave cannot be considered explored until a detailed topography of its contents is produced. However, GPS does not work in caves. The only way to map of a cave is by recording the path followed by the speleologist exploring it. So a speleologist has to annotate the orientation of its path with respect to the north, the inclination, and the distance covered. These three measures must be recorded at each turn, climb, or descent. By combining many of these segments, it becomes possible to create a vertical section of the cave as in (A) or a map. In the past, this information was obtained using a flexible yardstick (B), a compass (C), an inclinometer (D), ropes to indicate direction (E), and a paper notebook. Nowadays, the same method is used, but with the assistance of electronic devices that allow for the collection and storage of these three basic measurements (F), or more recently, with the use of specialized LASER scanners (G).



ASTROSPELEOROBÔS

ASTROSPELEOBOTS



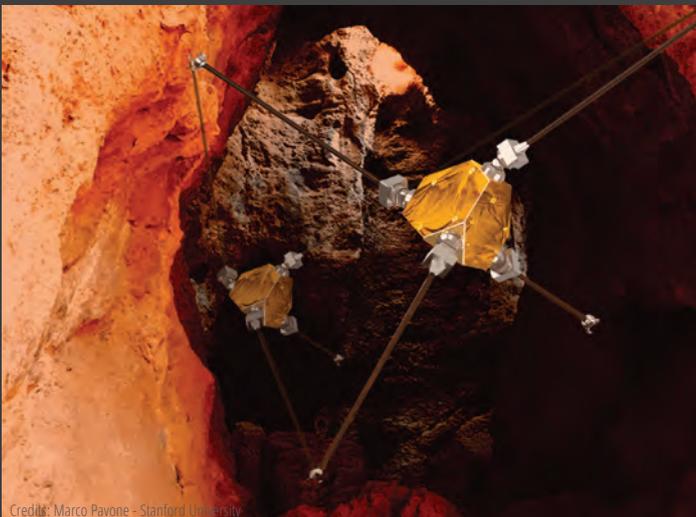
Credits: NASA/JPL-Caltech

EXPLORANDO GRUTAS ET

Além dos desafios da espeleologia da Terra, a espeleologia espacial acrescenta as emoções da exploração espacial: vácuo, radiação, micrometeoritos e uma distância de milhões de quilômetros de casa. A exploração de grutas extraterrestres será conduzida principalmente por enxames de robôs que auxiliam uns aos outros com o mínimo de intervenção humana, já que é impossível imaginar um astronauta vestindo um traje espacial rígido escalando um algar. O sucesso nesta nova fronteira da exploração espacial exige soluções criativas, por vezes inspiradas na evolução biológica. As novas tecnologias emergentes deste esforço levarão a aplicações inesperadas na Terra.

EXPLORING ET CAVES

In addition to the challenges of speleology on Earth, space speleology adds the thrills of space exploration: vacuum, radiation, micrometeorites, and millions of kilometers from home. The exploration of extraterrestrial caves will be conducted primarily by swarms of robots that assist each other with minimal human intervention, as it is impossible to envision an astronaut wearing a rigid spacesuit climbing a pit. Success in this new frontier of space exploration requires creative solutions, sometimes inspired by biological evolution. The new technologies emerging from this effort will lead to unexpected applications on Earth.



Credits: Marco Pavone - Stanford University

REACHBOTS

Alguns "ReachBots:" exploram um algar estreito. Esses robôs são pequenos escaladores livres, equipados com pernas expansíveis e pequenos ganchos nas extremidades, permitindo-lhes agarrar-se às superfícies nas grutas.

A couple of "ReachBots:" explore a narrow pit. Those robots are small free climbers, equipped with expandable legs with tiny hooks at their ends, allowing them to grip onto cave surfaces.



LEMUR 3

É outro robô escalador livre. O robô usa pinças microespinhais, que empregam milhares de ganchos afiados que se prendem nas superfícies ásperas.

Is another free climber robot. The robot uses microspine grippers, which employ thousands of sharp hooks that grip rough surface areas.

Credits: NASA/JPL-Caltech



DAEDALUS

Este robô em estudo pela ESA é baixado para dentro da gruta por um veículo espacial equipado com um guindaste. Quando o robô chega ao chão da gruta ele é libertado do cabo. A conexão com a superfície é mantida através de um Sistema WiFi colocado na ponta do cabo.

This is a crane bot under study by ESA. The bot is lowered into the cave by a surface rover equipped with a crane. When the bot reaches the cave floor it is released from the cable. The connection with the surface is maintained through a WiFi hosted at the head of the cable.



Credits: NASA/JPL-Caltech



Credits: NASA/JPL-Caltech

EELS

As cobras não têm pernas, ganchos ou mãos (para não falar em rodas), mas são muito hábeis em se mover em espaços pequenos e passagens estreitas. Isso inspirou o Exobiology Extant Life Surveyor (EELS), que foi projetado para a exploração de aberturas estreitas em gelo.

Snakes have no legs, hooks or hands (not too say of wheels), but they are very adept at moving within small spaces and narrow conduits. This inspired the Exobiology Extant Life Surveyor (EELS), which is designed for the exploration of narrow ice pits.

ESPELEOTEMAS

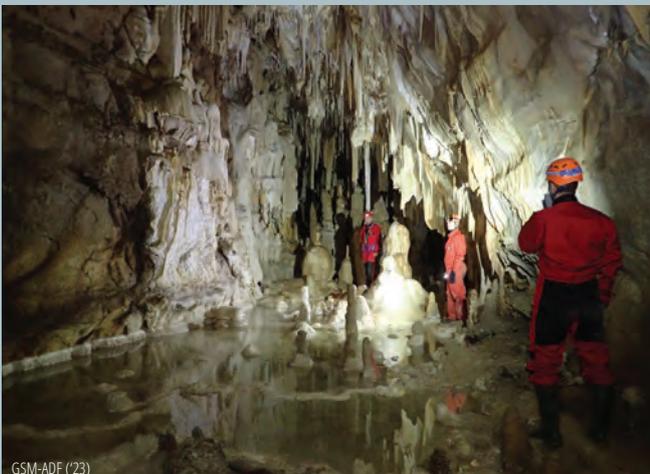
SPELEOTHEMS

OS TESOUROS ESCONDIDOS DAS GRUTAS

Espeleotemas são formações minerais comumente encontradas em gruta. Em nossa opinião, a palavra “gruta” é frequentemente associada a estalactites e estalagmites, que estão entre os tipos de espeleotemas mais conhecidos. A maioria dos mais de trezentos tipos de espeleotemas atualmente conhecidos tem origem na deposição de minerais deixados por fluidos nas grutas ou na solidificação de rochas fundidas. Nalguns casos resultam da atividade biológica ou humana. Dada a sua onipresença nas grutas terrestres, não há razão para excluir a possibilidade de encontrar alguns espeleotemas em grutas extraterrestres. Se forem descobertos em grutas lunares ou marcianas fornecerão informações valiosas sobre a história desses lugares.

HIDDEN TREASURES OF CAVES

Speleothems are mineral formations commonly found in caves. In our minds, the word ‘cave’ is often associated with stalactites and stalagmites, which are among the best-known types of speleothems. Most of the over three hundred kinds of speleothems presently known originate from the deposition of minerals left by fluids in the caves or from the solidification of molten rocks. In some cases, they result from biological or human activities. Given their ubiquity in Earth caves, there is no reason to exclude the possibility to found some speleothems in extraterrestrial caves. If they will be discovered in lunar or martian caves, they will provide valuable insights into the history of those places.



Estalactites e estalagmites calcárias (Gruta Savi, Itália).
Limestone stalactites and stalagmites. (Grotta Savi, Italy).



Estalactites calcárias tipo “palhinha” (Gruta Savi, Itália).
Soda straw tubular stalactites (Grotta Savi, Italy).

ESTALACTITES, ESTALAGMITES E COLUNAS

As estalactites formam-se quando água ou outros fluidos atravessam o teto da gruta. A evaporação e as reações químicas com o ar levam à deposição de minerais onde se formam as gotas. Gotas caindo da estalactite depositam minerais abaixo dela, permitindo a formação de uma estalagmite. Se uma estalactite se juntar a uma estalagmite ou ao fundo da caverna, ela formará uma coluna.

STALACTITES, STALAGMITES AND STALAGNATES

Stalactites form when water or other fluids percolate from the ceiling. Evaporation and chemical reactions with the air lead to the deposition of minerals where the drops form. Drops falling from the stalactite deposit minerals below it, allowing the formation of a stalagmite. If a stalactite joins a stalagmite or the floor of the cave, it forms a column also called stalagnate.



Os Montanheiros

Estalactites e estalagmites de depósito de ferro (Gruta dos Buracos, ilha Terceira, Açores)
Stalactites, stalagmites of iron oxide. (Gruta dos Buracos, Terceira island, azores)



Os Montanheiros

Estalactites siliciosas. (Algar do Carvão, Ilha Terceira, Açores)
Silicatic stalactites. (Algar do Carvão, Terceira island, Azores)



Os Montanheiros

Estalactites siliciosas. (Algar do Carvão, Ilha Terceira, Açores)
Silicatic stalactites. (Algar do Carvão, Terceira island, Azores)



Os Montanheiros

ESPELEOTEMAS DE LAVA

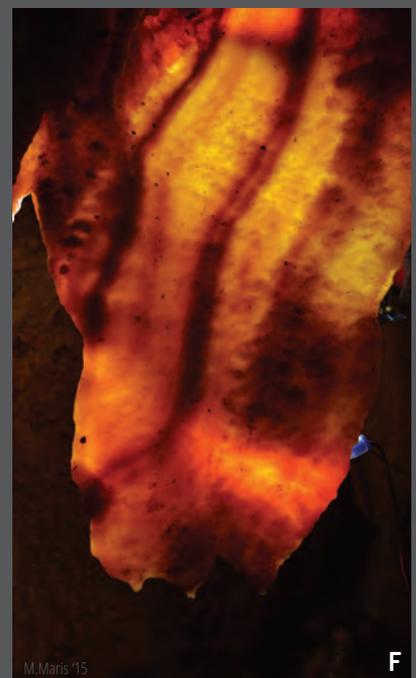
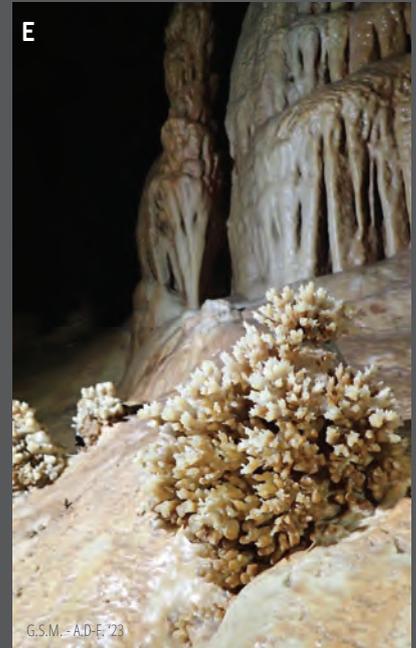
Os espeleotemas não são produzidos apenas pela água. A própria lava pode produzir espeleotemas como estalactites e estalagmites durante o processo de solidificação. À esquerda uma estalagmite lávica e à direita estalactites lávicas, na Gruta do Canto da Serra (ilha do Pico, Açores),

LAVA SPELEOTHEMS

Speleothems are not produced solely by water; even lava can produce speleothems such as stalactites and stalagmites during its solidification. At left a lava stalagmite, while at right a lava stalactite in Gruta do Canto da Serra (Pico island, Azores).



Os Montanheiros



NÃO APENAS VERTICAIS

Os espeleotemas podem ter uma grande variedade de formas fora das estruturas verticais das estalactites e estalagmites. Tais formas surgem da interação de forças adicionais, como flutuação, capilaridade, vento e assim por diante. Em (A) uma “pipoca” ou espeleotema coralóide numa gruta vulcânica, (B) véus de calcita flutuando num lago em *Grotta delle Margherite* (Itália), (C) uma “banheira” na *Grotta Lindner* (Itália), (D) uma pequena flor de cristais de sílica numa gruta vulcânica, (E) flores de calcite na *Grotta Tom* (Itália), (E) uma cortina de calcite iluminada por trás na *Grotta Gabrovizza* (Itália).

NOT ONLY VERTICAL

Speleothems may have a large variety of shapes outside the vertical structures of stalactites and stalagmites. Such shapes arise from the interplay of additional forces such as flotation, capillarity, wind, and so on. In (A) a “popcorn” or coralloid speleothem in a volcanic cave, (B) veils of calcite floating a pond in *Grotta delle Margherite* (Italy), (C) a “bathtub” in the *Lindner Cave* (Italy), (D) a small flower of silica crystals in a volcanic cave, (E) flowers of calcite in the *Grotta Tom* (Italy), (E) a curtain of calcite illuminated from back in *Gabrovizza Cave* (Italy).



O ARQUIVO DO ESPELEOTEMA

A maioria dos espeleotemas tem uma estrutura em camadas, semelhante aos anéis de uma árvore. Cada camada regista as condições da gruta no momento em que está a ser formada. Espeleotemas bem preservados podem conter um registo de milhares de anos de história das grutas.

THE SPELEOTHEM ARCHIVE

Most speleothems have a layered structure, similar to the rings in a tree. Each layer records the conditions of the cave at the time of its formation. Well-preserved speleothems could contain a record of thousands of years of cave history.



ESPELEOTEMA URBANO

A formação de espeleotemas é tão onipresente que mesmo um arco exposto à chuva poderia produzir uma estalactite.

URBAN SPELEOTHEM

The formation of speleothems is so ubiquitous, that even an arch exposed to rain could produce a stalactite.



FÓSSEIS

Fósseis podem ser encontrados em grutas, por vezes em excelentes condições, como estes fósseis de crinóides pendurados no teto da gruta *Campo dei Fiori* (Itália).

FOSSILS

Fossils can be found in caves, sometimes in excellent condition, as in the case of the photo showing fossilized crinoids hanging from the ceiling of the *Campo dei Fiori* Cave in Italy.



ESPELEOTEMAS BIOGÉNICOS

A atividade biológica de bactérias e outros organismos que vivem em grutas leva à formação de espeleotemas específicos como a formação de vermiculita nesta imagem tirada na *Gruta Frasassi*, na Itália.

BIOGENIC SPELEOTHEMS

The biological activity of bacteria and other organisms living in caves leads to the formation of specific speleothems as the vermiculite formation in this image taken in the *Frasassi Cave* in Italy.

DE VOLTA ÀS GRUTAS?

BACK TO CAVERNS?



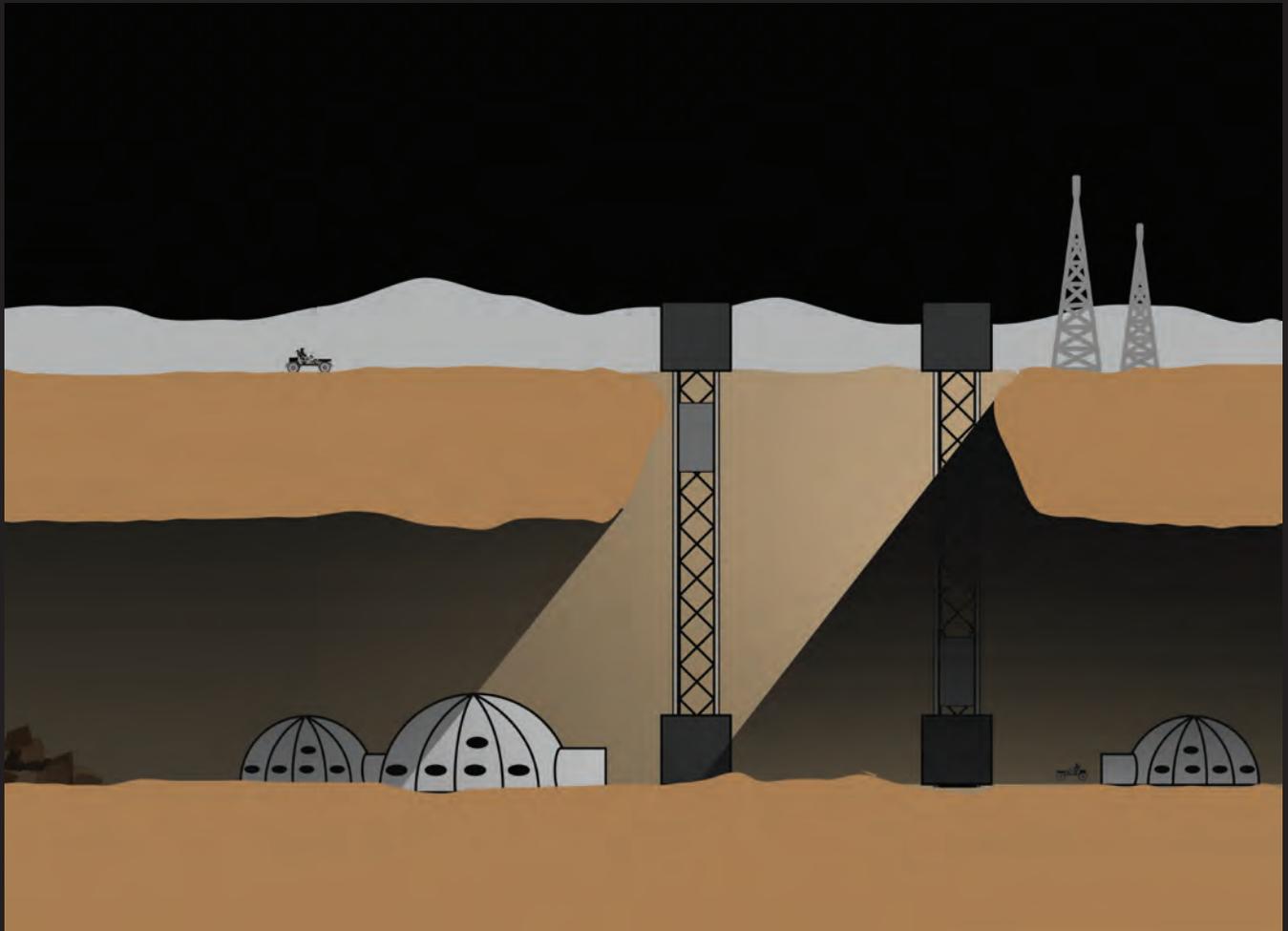
Uma visão artística de uma possível base subterrânea em Marte.
An artistic view of a possible Mars underground base.

GRUTAS COMO BASES ESPACIAIS

Desde o início da sua história, os humanos usaram espaços hipogeus, como grutas, para viverem. As grutas oferecem proteção e um clima constante durante todo o ano. Na Lua, as temperaturas podem variar entre -130°C e 120°C , enquanto em Marte, variam entre -153°C e 20°C . Além disso, Marte e a Lua são constantemente bombardeados por micrometeoritos e radiações mortais. Uma base localizada numa gruta estaria protegida contra estas condições adversas. A baixa gravidade em Marte e na Lua permite a potencial formação e preservação de enormes tubos de lava, com quilômetros de largura e quilômetros de comprimento.

CAVES AS SPACE BASES

From the beginning of their history, humans have used hypogean spaces such as caves as places to live. Caves offer protection and a constant climate throughout the year. On the Moon, temperatures may vary between -130°C and 120°C , while on Mars, they range between -153°C and 20°C . Additionally, Mars and the Moon are constantly bombarded by micrometeorites and deadly radiations. A base located in a cave would be protected against these harsh conditions. The low gravity on Mars and the Moon allows for the potential formation and preservation of huge lava tubes, even on kilometer wide and kilometers long.



Uma visão artística de uma possível base subterrânea em Marte.
An artistic view of a possible Mars underground base.

GRUTAS COMO BASES ESPACIAIS

Desde o início da sua história, os humanos usaram espaços hipogeus, como grutas, para viverem. As grutas oferecem proteção e um clima constante durante todo o ano. Na Lua, as temperaturas podem variar entre -130°C e 120°C , enquanto em Marte, variam entre -153°C e 20°C . Além disso, Marte e a Lua são constantemente bombardeados por micrometeoritos e radiações mortais. Uma base localizada numa gruta estaria protegida contra estas condições adversas. A baixa gravidade em Marte e na Lua permite a potencial formação e preservação de enormes tubos de lava, com quilômetros de largura e quilômetros de comprimento.

CAVES AS SPACE BASES

From the beginning of their history, humans have used hypogean spaces such as caves as places to live. Caves offer protection and a constant climate throughout the year. On the Moon, temperatures may vary between -130°C and 120°C , while on Mars, they range between -153°C and 20°C . Additionally, Mars and the Moon are constantly bombarded by micrometeorites and deadly radiations. A base located in a cave would be protected against these harsh conditions. The low gravity on Mars and the Moon allows for the potential formation and preservation of huge lava tubes, even on kilometer wide and kilometers long.

TREINANDO ASTRONAUTAS

TRAINING ASTRONAUTS



Credits: ESA - A. Romeo



O ESA CAVES* E O PANGAEA**

A exploração de ambientes hipógeos partilha muitas semelhanças com a exploração espacial. É por isso que os astronautas da Agência Espacial Europeia (ESA) recebem parte da sua formação em cavernas através das iniciativas ESA CAVES e PANGAEA. Esses programas, que muitas vezes também recebem astronautas convidados de outras agências espaciais, combinam o treinamento espeleológico com o treinamento em geologia de campo e ciências. Os cursos são organizados como missões onde os astronautas têm que explorar um grande sistema de cavernas durante dias, com a tarefa de realizar pesquisas reais, coletar dados e amostras e testar equipamentos e procedimentos.

THE ESA CAVES* AND PANGAEA**

The exploration of hypogean environments shares many similarities with space exploration. This is why astronauts from the European Space Agency (ESA) receive part of their training in caves through the ESA CAVES and PANGAEA initiatives. These programs, which often also host guest astronauts from other space agencies, combine speleological training with field geology and science training. Courses are organized as missions where astronauts have to explore a large cave system for days, with the task of conducting real research, collecting data and samples, and testing equipment and procedures.

* CAVES: Cooperative Adventure for Valuing and Exercising human behaviour and performance Skills | Experiência de Cooperação para Valorizar e Exercitar o Comportamento Humano e Desempenho de Habilidades

** PANGAE: Planetary Analogue Geological and Astrobiological Exercise for Astronauts | Análogo Planetário Geológico e Astrobiológico para Exercício de Astronautas



Credits: ESA – A. Romeo



Credits: ESA, V. Crobu



Credits: ESA – R. DeLuca

HIPOGEUS CONGELADOS

FROZEN HYPOGEANS



A) Geiseres em erupção no Polo Sul de Encélado. // Geisera erupting from the Enceladus South Pole.

SOB OS GELOS DE PEQUENOS MUNDOS

Não é apenas Marte e a Lua que têm um mundo hipogeu. Temos provas de que satélites congelados podem hospedar oceanos subterrâneos de água líquida. Em 2005 foi descoberto pela Missão Cassini da ESA/NASA que em Encélado (A), o quinto satélite de Saturno em ordem de diâmetro, irrompem geiseres de algumas fissuras do polo sul, que se estendem por centenas de quilômetros. O calor necessário para manter a água líquida sob o gelo vem das marés que o satélite sofre enquanto orbita Saturno. O mesmo mecanismo permite que o satélite Europa (B) de Júpiter tenha um oceano subglacial. Moléculas orgânicas presentes no gelo enriquecem o oceano. Se o oceano repousar sobre uma base rochosa poderá haver um ambiente capaz de abrigar vida. Outros corpos como o asteroide Ceres (C) e o planeta anão Plutão (D) no passado poderiam ter tido um corpo de água líquida sob suas superfícies, como sugerido pela presença de criovulcões. O Lago Vostok, abaixo dos gelos da Antártica, é um modelo terrestre para esses ambientes.

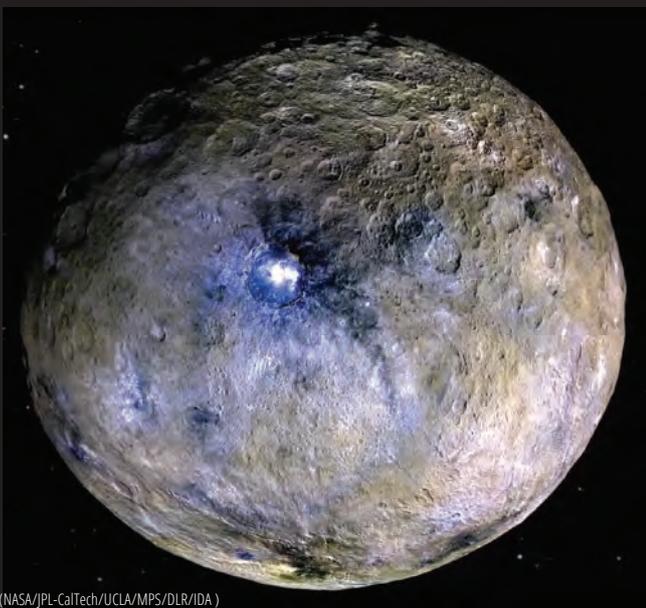
UNDER THE ICES OF SMALL WORLDS

Not just Mars and the Moon have an hypogean world. We have proofs that frozen satellites may host underground oceans of liquid water. Enceladus (A), the fifth satellite of Saturn in order of diameter, erupts from some fissures of the south pole geysers that extend for hundreds of km as discovered in 2005 by the ESA / NASA Cassini mission. The heat necessary to keep the water liquid under the ice comes from the tides that the satellite undergoes as it orbits around Saturn. The same mechanism allows Jupiter's satellite Europa (B) to have a subglacial ocean. Organic molecules present in the ice enrich the ocean. If the ocean rests on a rocky base, there could be an environment capable of hosting life. Other bodies as the asteroid Ceres (C) and the dwarf planet Pluto (D) in the past could have had a body of liquid water under their surfaces as suggested by the presence of cryovolcanos. Lake Vostok below the ices of Antarctica is a terrestrial model for these environments.



Credits: ESA/NASA/JPL

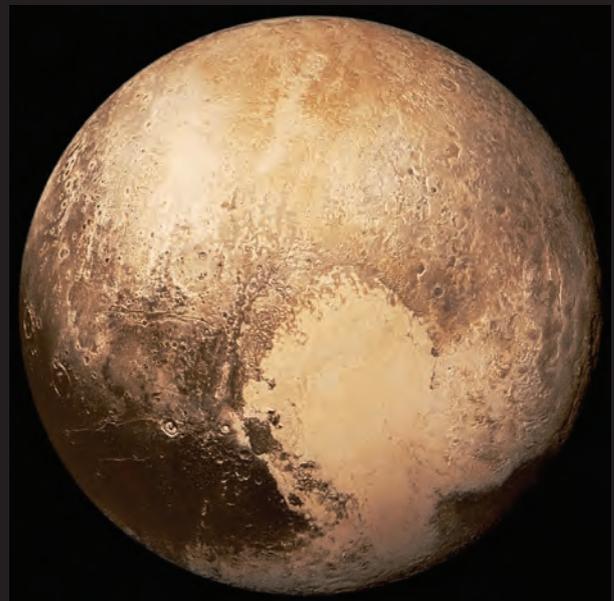
B) Fissuras na superfície gelada de Europa coloridas por materiais orgânicos.
Fissures on the icy surface of Europa colored by organic materials.



(NASA/JPL-CalTech/UCLA/MPS/DLR/IDA)

C) O asteroide Ceres visto pela missão DAWN. O ponto brilhante é provavelmente um resíduo de sais deixado pela erupção de um antigo criovulcão.

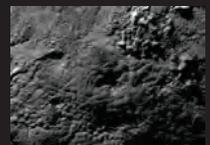
The Ceres asteroid as seen by the DAWN mission. The bright spot is probably a residual of salts left by the eruption of an ancient cryovolcano.



(Credits: NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/Southwest Research Institute)

D) Plutão visto pela sonda New Horizons e pelo Wright Mons, um de seus criovulcões.

Pluto as seen by the New Horizons probe and the Wright Mons, one of its cryovolcanos.



NASA/JHUAPL/SWRI

CONCLUSÃO

CONCLUSION



Espeleólogos trabalhando para limpar resíduos do interior de uma gruta.
Speleologists at work to clean up waste from a cave.



Esterilização do Lander Schiaparelli da ESA antes do seu lançamento em Marte.
Sterilization of the ESA Lander Schiaparelli before its launch to Mars.

PROTEGENDO AS GRUTAS E O ESPAÇO

A consciência de como a nossa vida superficial está ligada ao mundo subterrâneo é talvez o resultado mais significativo de dois séculos de exploração espeleológica. A destruição e a poluição do subsolo podem ter efeitos de longo alcance na vida à superfície, sendo a perda de reservas de água doce o mais óbvio. Por essa razão, regras para a proteção do mundo hipogeu foram emitidas nos últimos anos por países e administrações regionais, juntamente com iniciativas como o *Ano Internacional das Grutas*, em 2021, promovidas para chamar a atenção do público para esta questão. Poderia a proteção das grutas ser inspirada e inspirar a proteção dos corpos do Sistema Solar? O impulso da recém-nascida Economia Espacial promete revolucionar a exploração do sistema solar. Mas como gerir adequadamente esse processo? Por exemplo: vestígios de atividade humana na Lua poderão persistir durante milhares de milhões de anos. A contaminação de Marte por missões espaciais poderia potencialmente destruir qualquer vestígio de vida existente ou passada, impossibilitando qualquer descoberta. Potenciais formas de vida de outros corpos do sistema solar podem ser perigosas para a Terra. Como administrar esses problemas é o tema da *Proteção Planetária*. Em geral o acesso ao espaço extraterrestre é actualmente regido pelo *Tratado do Espaço Exterior*, que afirma que os corpos do sistema solar pertencem à humanidade. No entanto, as pressões económicas e políticas conduzirão inevitavelmente à revisão deste tratado no futuro, conduzindo a um novo conjunto de regras. Garantir um acesso não colonial, equitativo e inclusivo ao espaço para as gerações futuras será sem dúvida o maior desafio nas próximas décadas.

PROTECTING CAVES AND SPACE

The awareness of how our surface life is connected to the underground world is perhaps the most significant result of two centuries of speleological exploration. Destruction and pollution of the underground can have far-reaching effects on surface life, the loss of freshwater reserves to cite the most obvious. In acknowledgment of this, rules for the protection of the hypogean world have been issued in recent years by states and regional administrations, together with Initiatives like the *International Year of Caves 2021* promoted to bring this issue to the attention of the general public. Could cave protection be inspired and inspire the protection of Solar System bodies? The push of the newborn Space Economy promises to revolutionize the exploration of the solar system. But how to properly manage this process? As an example: traces of human activity on the Moon could persist for billions of years. Contamination of Mars by space missions could destroy any trace of a potentially existing or past life, making impossible any discover. Potential lifeforms from other solar system bodies could be dangerous for the Earth. How to manage those problems is the subject of *Planetary Protection*. More in general the access to the extraterrestrial space is currently governed by the *Outer Space Treaty* which states that solar system bodies belong to mankind. Yet, economic and political pressures will inevitably lead to the revision of this treaty in the future leading to a new set of rules. Ensuring a non-colonial, equitable, and inclusive access to space for future generations will arguably be the greatest challenge in the decades to come.