

Parte 2

O evento do Curuçá: a queda de bólidos em 13 de agosto de 1930

Ramiro de la Reza (ON/MCTI)

Henrique Lins de Barros (CBPF/MCTI)

Paulo Roberto Martini (INPE/MCTI)

O evento do Curuçá se refere à queda de importantes bólidos perto desse rio, na região amazônica brasileira próxima à fronteira com o Peru, na manhã de 13 de agosto de 1930. O único relato desse evento foi feito pelo frei Fidelis D'Alviano, publicado na Europa em 1931. Um primeiro estudo realizado por Bailey *et al.* (1995) chamou esse evento de “Tunguska Brasileiro”. Neste texto é apresentado um estudo dos diferentes aspectos físicos e sociológicos desse evento e mostra-se que, mesmo diferente daquele de Tunguska, de 1908, o evento do Curuçá é junto com aquele, um dos mais importantes impactos acontecidos sobre o Planeta no século 20.

Introdução

A presença de numerosas cicatrizes nas superfícies de diferentes planetas do tipo terrestre do sistema solar, assim como da Lua, é o resultado de intenso bombardeio por objetos menores, com tamanho da ordem de quilômetros, chamados **planetesimais**. Se o sistema solar foi formado há 4,57 Ga (1 Ga = 1 bilhão de anos), um maior bombardeio episódico aconteceu entre 3,5 e 3,9 Ga, ou seja, muito tempo depois dos primeiros 100 Ma (1 Ma = 1 milhão de anos) nos quais teriam se formado os diferentes planetas. Se na Lua e nos outros planetas próximos do tipo terrestre a presença atual de grande quantidade de crateras de impacto é indicação clara dessa época singular conhecida na literatura como o Bombardeio Pesado Tardio ou LHB (*Late Heavy Bombardment*), este não é o caso da Terra, onde praticamente nenhuma cratera dessa época foi conservada (ver “Crateras de impacto meteorítico no Brasil” neste Capítulo). No entanto, já que a Terra tem massa maior que a da Lua e de outros planetas terrestres, seria de se esperar que a Terra estivesse completamente coberta de crateras. Diversos mecanismos relacionados à **tectônica de placas**, à ação erosiva da hidrosfera, atmosfera e massas de gelo e a outros fenômenos que ocorrem em um planeta ativo como a Terra, agiram de forma a apagar as crateras de impacto terrestres daquela época. Atualmente somente rochas sedimentares na Groenlândia datam dessa época e conservam informação mineralógica e química do LHB (Grão-Jorgensen *et al.*, 2009).

Por que existiu o LHB? Quais foram os principais agentes do bombardeio: **asteroides** ou cometas? Estes são atualmente temas de estudo e debates. Provavelmente o modelo que melhor explica a ocorrência do LHB é o modelo dinâmico do sistema solar (Gomes *et al.*, 2005), no qual processos de migração dos quatro planetas gigantes do sistema solar levaram a uma rápida ruptura da arquitetura de todo o sistema planetário produzindo esse bombardeio. Para esse modelo, a contribuição dos **asteroides** seria fundamental. Ao contrário, para Grão-Jorgensen *et al.* (2009), a maior concentração do elemento irídio em camadas sedimentares, supostamente depositadas após impactos de grandes objetos extraterrestres, indicaria que os cometas teriam sido os principais agentes desse bombardeio, produzindo ao mesmo tempo importante parte da massa oceânica da Terra.

Depois da ocorrência do LHB, de natureza caótica, o sistema solar teria alcançado o estado de equilíbrio atual, onde os raros bombardeios que acontecem desde o LHB até hoje, respondem a outros tipos de perturbações dinâmicas no sistema solar, de origem local.

É importante sublinhar o provável papel do LHB na origem da vida na Terra. De fato, os primeiros sinais da vida aparecem justo depois do LHB. Porém, os maiores e mais raros impactos, sejam de cometas ou **asteroides**, provocaram extinções biológicas massivas, como aquela que acabou com os dinossauros há 65 Ma na extinção K-T do Cretáceo-Terciário.

Das 139 crateras e estruturas de impacto catalogadas na Terra, por exemplo, por Hodge (1994), vemos que a grande maioria tem idades menores que ~500 Ma. Somente três crateras com diâmetros excepcionalmente grandes (maiores que 100 km) de 160, 140 e 200 km, aconteceram nas respectivas idades do passado de > 570 Ma, 1.850 Ma e 1.970 Ma. Não há relação direta do diâmetro das crateras com a sua idade, já que quatro enormes crateras com diâmetro entre 80 e 200 km foram formadas durante os últimos 200 Ma. Uma delas é a famosa Chicxulub, com idade de 65 Ma, relacionada com a extinção K-T acima mencionada.

Hoje nossa civilização tem como maior risco a colisão com um eventual objeto grande que, mesmo raro, não nos exige de estarmos alerta. Como a probabilidade aumenta inversamente com o tamanho dos **bólidos** impactantes, devemos também nos preocupar com a queda de objetos na faixa de algumas dezenas de metros. Mais que as massas, são as altas velocidades, de algumas dezenas de km/s, que tornam esses objetos perigosos.

O evento de 15 de fevereiro de 2013 na Rússia

Quando este texto estava sendo escrito, a população terrestre foi surpreendida com o evento que aconteceu na cidade russa de Chelyabinsk. Era a primeira vez na história da humanidade que a queda de um **bólido** produzia, de maneira confirmada, ferimentos em uma população de 1.500 pessoas. Esses ferimentos foram provocados indiretamente por estilhaços de vidro produzidos pela frente de uma onda de choque que atingiu essa cidade. Um detalhamento desse recente evento ajudará mais tarde a entendermos vários aspectos físicos do evento de Curuçá em 13 de agosto de 1930, mesmo que, em princípio, sejam de natureza diferente.

Dois tipos de **bólidos** podem cair na Terra. De um tipo são os asteroidais, ou seja, objetos de consistência dura, formados por rochas ou metais. Do outro tipo são os objetos frágeis como cometas, formados por gelo sujo com poeira primordial. De um modo geral as órbitas dos **asteroides** não são bem conhecidas e ainda não se tem informação suficiente que permita prever o momento e o local da queda de um desses objetos na superfície terrestre. Podem cair em

qualquer data, em qualquer hora e em qualquer lugar. Ao contrário, boa parte dos objetos de natureza cometária pode cair em qualquer lugar da superfície terrestre como os **asteroides**, mas a data da queda pode ser prevista. Essa data coincide com a data anual da passagem da Terra, em seu movimento orbital ao redor do Sol, pela trajetória de cometas periódicos¹.

Foi confirmado que o objeto da recente queda na Rússia era asteroidal, isto é, de natureza rochosa com 10% de ferro. O mais extraordinário foi que nessa mesma data, por pura coincidência, um **asteroide** de 45 m passava a uma distância bem próxima da Terra em termos astronômicos, de 27.700 km. Mas a passagem desse objeto denominado 2012 DA14 estava prevista, enquanto que a daquele que caiu na Rússia no mesmo dia, por ser menor, não estava previsto. Todavia deve ficar claro que não havia relação entre esses dois objetos, já que suas órbitas eram diferentes e opostas (Figura 1).

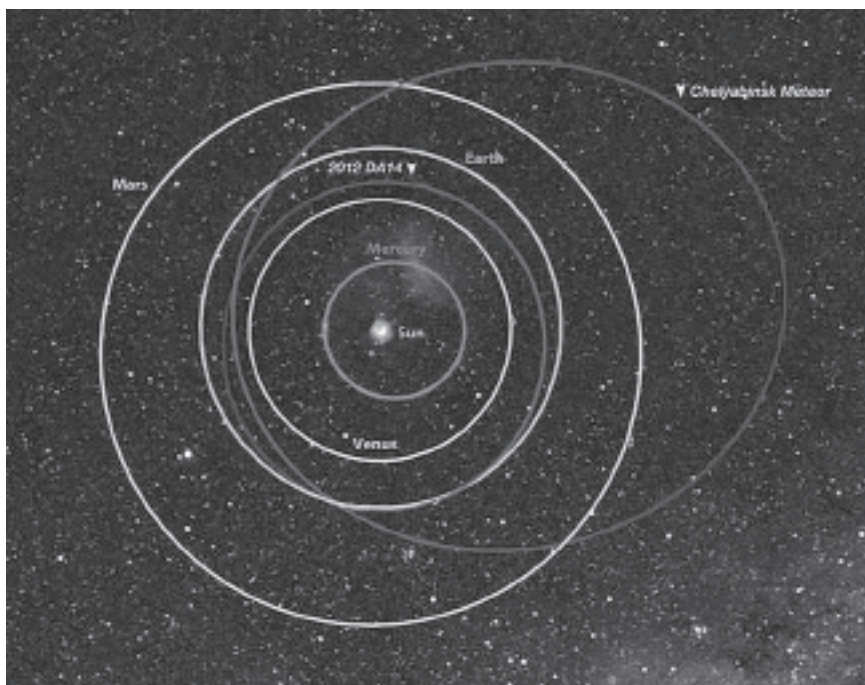


Figura 1. Órbita do **asteroide** 2012 DA14 e do objeto de Chelyabinsk cruzando a órbita terrestre (parte inferior da Figura). As órbitas dos planetas Mercúrio, Vênus e Marte também são mostradas (ilustração da NASA de domínio público)

¹ Costuma-se classificar um cometa como periódico quando o seu período orbital é inferior a 200 anos.

Mesmo não prevista, a queda do objeto na Rússia foi amplamente filmada e diferentes partes da trajetória inclinada de queda foram monitoradas por câmaras de tráfego. Segundo modelos, trata-se de um objeto de 17 a 20 m pesando cerca de 11 mil t, entrando a 15 km/s na alta atmosfera (termosfera, acima de 80 km) até chegar ao solo com pequenos resíduos materiais. Alguns **meteoritos** com menos de 1 cm de tamanho foram encontrados primeiramente. Segundo pesquisadores russos, três explosões teriam ocorrido nesse caminho. Uma primeira, a mais importante, com energia equivalente a 0,5 Mt de TNT entre 70 e 30 km. A desintegração final teria se produzido numa altitude de 15 a 25 km, ou seja, no limite superior da estratosfera (aviões comerciais utilizam a faixa em volta de 10 km). Os últimos pedaços teriam provocado cratera de 6 m de diâmetro na superfície congelada do lago Chebarkul, onde a maioria de pequenos **meteoritos** foi encontrada. Durante a queda, foi a cidade de Chelyabinsk que recebeu a onda de choque produzida no espaço e, ao mesmo tempo, sofreu impacto sísmico de magnitude 2,7 na escala Richter. Mas o verdadeiro sofrimento das 1.500 pessoas que ficaram feridas foi causado pelos efeitos da alta pressão da intensa onda de choque ocasionada pela detonação na atmosfera. Recentemente, em outubro de 2013, foi recuperado do fundo do lago de Chebarkul o **meteorito** principal do evento pesando 570 kg.

Impacton

Os cometas são originários das regiões mais afastadas do centro do sistema solar, portanto dos confins mais frios. Ao contrário, a maioria dos **asteroides** provém do cinturão dos **asteroides** (Figura 2) entre Marte e Júpiter. Como a Terra está mais perto do Sol, estamos felizmente em uma posição favorável para observar esses objetos quando eles se aproximam da Terra, pelo efeito da reflexão da luz solar. Assim podemos seguir seus movimentos, calcular suas órbitas, analisar os possíveis riscos e classificá-los como perigosos ou não. Os eventuais objetos ou **asteroides** residuais que se encontram entre o Sol e a Terra, ou seja, em órbitas internas à da Terra, são potencialmente mais perigosos porque não podem ser observados ou monitorados facilmente.

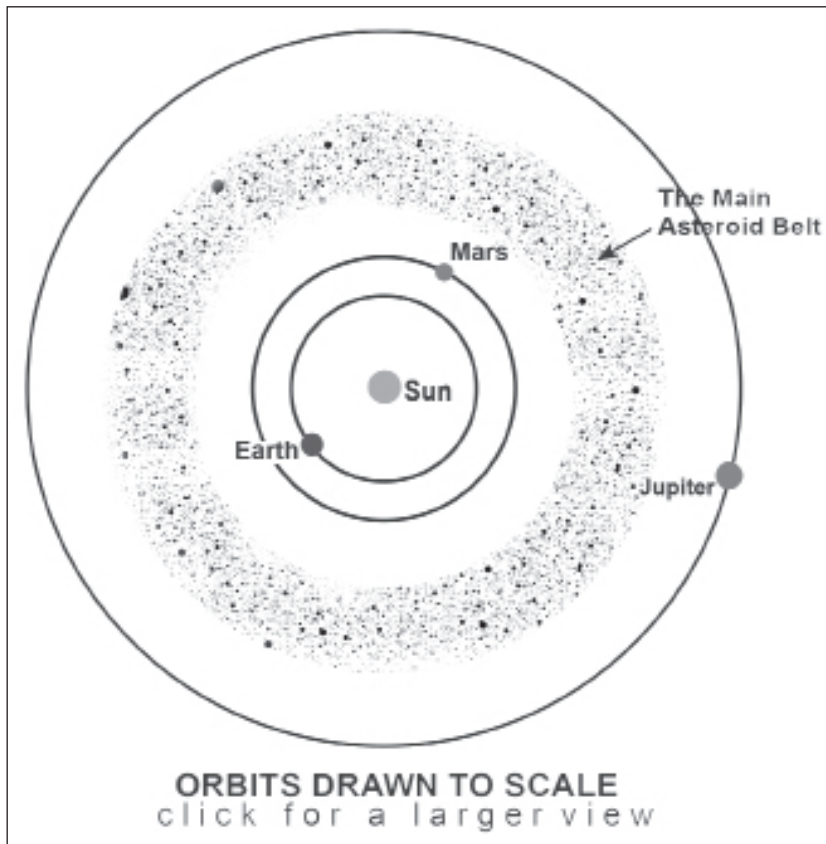


Figura 2. O cinturão de **asteroides** entre as órbitas de Marte e Júpiter. As órbitas dos planetas estão em escala (ilustração tirada de *The Harmony of the World* em www.keplersdiscovery.com)

Existe um grupo de objetos denominados *Near Earth Objects* (NEOs) que, por efeito de alguma perturbação gravitacional, entram na vizinhança da Terra. O cálculo matemático das órbitas em três dimensões é um processo complexo utilizando técnicas matemáticas sofisticadas. Esses cálculos são alimentados por informações colhidas nas observações dos NEOs ao longo do tempo. Para sistematizar o patrulhamento de objetos perigosos, o centro da IAU (sigla em inglês da União Astronômica Internacional) conhecido como *Minor Planet Center* (MPC) sediado em Cambridge, MA, recebe as observações de NEOs e calcula a sua probabilidade de impacto. Em casos de pouca certeza, com ajuda de poderosos computadores são feitos cálculos numéricos para um grande número de **asteroides** virtuais, fazendo-se pequenas variações

em torno dos valores médios dos elementos orbitais² do NEO em exame. Se, por exemplo, há 100 mil **asteroides** virtuais e o cálculo do movimento futuro predisser que 4 entre eles colidirão com a Terra, a probabilidade de o **asteroide** colidir com a Terra será de 4/100.000 ou 1/25.000.

O projeto Impacton do Observatório Nacional (ON), recentemente implantado, conta com telescópio robotizado de 1 m de diâmetro instalado no município de Itacuruba, PE (latitude 8°47'32,1" S e longitude 38°41'18,7" O), e tem como objetivo, não propriamente a descoberta de novos NEOs, mas o monitoramento e a caracterização física de objetos pré-selecionados nas cercanias da Terra. Esta iniciativa do ON faz com que o Brasil integre os programas internacionais de monitoramento, contribuindo com observações no hemisfério sul e o estudo de características físicas de **asteroides** e cometas em risco de colisão com a Terra.

O evento do Curuçá

Este trabalho aborda um evento importante relativamente recente, que ocorreu em território brasileiro na manhã de 13 de agosto de 1930, conhecido como o “evento do Curuçá”. Segundo Napier e Asher (2009) este evento com o conhecido evento de Tunguska em 1908 e um terceiro, muito pouco estudado, que aconteceu na Guiana Inglesa em 1935 (Korff, 1939), teriam sido os casos de queda de **bólidos** mais importantes do século 20.

Diferentemente das estruturas pré-históricas de impacto no Brasil descritas neste livro (ver “Crateras de impacto meteorítico no Brasil” neste Capítulo), o evento do Curuçá e sua estrutura de impacto, por ser episódio recente, está acompanhado de relatos e medições, especialmente do tipo sismológico. Como será visto mais adiante, uma expedição realizada em 1997 ao possível lugar de queda forneceu informações adicionais à lista das outras indicações de que dispomos.

Relato

Todo o conhecimento inicial deste evento está concentrado num relato que foi publicado pela primeira vez pela agência *Fides* de notícias em 1931 no jornal oficial do Vaticano, *L'Osservatore Romano*. Das repercussões desta notícia na Europa só se tem conhecimento daquela do jornal *The Daily Telegraph* de Lon-

² São seis os elementos orbitais, que são os parâmetros necessários para determinar uma órbita de forma única.

dres naquele mesmo ano (Bailey *et al.*, 1995; Steel, 1995). Trata-se de relato feito pelo frei Fidelis D'Alviano, da Ordem dos Franciscanos, que realizava seu trabalho de catequese no rio Curuçá. Foi justamente perto deste rio que aconteceu este evento que pode ser considerado planetário, e do qual o frei Fidelis se tornará o único emissário para o mundo.

Frei Fidelis chegou ao rio Curuçá, rio que desemboca no Javari (divisa com o Peru), por volta de 18 de agosto de 1930, cinco dias após o estranho e terrível fenômeno. Mesmo cinco dias depois, a população, principalmente de seringueiros, ainda estava apavorada. No dia 13, vários **bóldos** tinham caído do céu produzindo três grandes estrondos e um tremor de terra. O frei fez relatório inteligente desse evento entrevistando perto de uma centena de seringueiros da região, e fazendo um resumo. Melhor ainda, ele produziu texto objetivo, sem nenhuma conotação religiosa. Esta objetividade não é surpreendente se considerarmos os vários aspectos pessoais do frei. Além de exercer suas atividades pastorais com os índios Ticuna por muitos anos, ele sempre trabalhou com uma atitude científica como etnógrafo e linguista. Eis suas publicações mais conhecidas: D'Alviano, 1943: 6-36 e 1945. Para descrição mais geral das atividades do frei ver em de la Reza e Faulhaber (2012).

A Europa já tinha ficado intrigada em 1908 com a queda de enorme **bóldo** na Sibéria, evento hoje conhecido como o de Tunguska. Além das evidências sísmicas, também o céu europeu registrou este evento. Durante um tempo o céu ficou com as cores avermelhadas, características da presença de grandes quantidades de poeira em suspensão na atmosfera. Somente 15 anos depois um conhecido geofísico russo, Leonid A. Kulik, teve a determinação de organizar uma expedição a fim de encontrar o lugar da queda. Foi tarefa difícil, já que essa região estava sendo ocultada pelos habitantes de Tunguska como sendo lugar sagrado. Kulik não encontrou nenhuma cratera, mas sim, enorme região de cerca de 2 mil km² de floresta devastada. Isto motivou grande número de estudos, mas até hoje permanece envolto por alguns mistérios. No entanto, a interpretação mais aceita é de que um corpo de cerca de 60 a 100 m teria explodido na atmosfera em um fenômeno de detonação, produzindo violenta onda de choque que destruiu a floresta.

O astrônomo inglês Mark E. Bailey encontrou em 1995 artigo de cientistas russos citando trabalho passado de Kulik, em que ele mencionava que em 1930 teria acontecido um evento similar ao de Tunguska, na floresta amazônica. Bailey encontrou essa notícia no jornal inglês *The Daily Telegraph* publicado em 1931, mencionando o evento da Amazônia com um tom sensacionalista, referindo-se também ao perigo que teria corrido a nossa civilização. Bailey decidiu então procurar o artigo fonte que estaria no Vaticano. Com dois estudantes

partiu à procura desse artigo nos arquivos de *L'Osservatore Romano*. Mas um astrônomo amador italiano, Roberto Gorelli, também teve conhecimento desse relatório de forma independente (Gorelli, 1995).

Grande e boa foi a surpresa de Bailey ao encontrar o relato do frei Fidelis. Primeiro, como foi mencionado antes, pela objetividade do relato e segundo, porque o evento teria acontecido na manhã de 13 de agosto. Bailey publicou artigo no magazine inglês *The Observatory* em 1995 e propôs a hipótese de que os **bólidos** seriam provenientes do cometa *Swift-Tuttle*. De fato, esse cometa periódico (período orbital de 120 anos) conhecido desde os tempos de Cristo, é aquele que produz a **chuva de meteoros** que acontece todos os anos entre 11 e 13 de agosto, muito conhecida no hemisfério norte como a chuva das Perseidas. A seguir é apresentada a tradução para o português (de la Reza e Faulhaber, 2012) do relato do frei Fidelis, tal como apareceu em *L'Osservatore Romano* (Bailey *et al.*, 1995):

A QUEDA DE TRÊS **BÓLIDOS** NO AMAZONAS. ESTRANHO E ATERRADOR FENÔMENO (Agência *Fides*)

São Paulo de Olivença (Amazonas, Brasil). Nas florestas do rio Curuçá, afluente do rio Javari, este mesmo grande afluente do rio Amazonas no Alto Solimões, no dia 13 de agosto de 1930 caíram três grandes **bólidos** das alturas do espaço. Esse estranho evento foi seguido por uma tal combinação de fenômenos naturais e convulsões que os seringueiros, que são os homens que trabalhando na floresta, extraem a borracha, pensaram que eram testemunhas de um cataclismo pressentindo o fim do mundo: deixaram tudo com que estavam trabalhando e correram angustiados para suas cabanas para se unirem a seus entes queridos pela última vez e morrerem juntos. Outros fugiram para as margens do rio no coração da floresta, caindo de joelhos, se encomendando a Deus numa última oração. Cinco dias depois do evento, quando o padre Fidelis de Alviano partiu em sua missão apostólica entre a população do rio Curuçá, pessoas pobres estavam ainda fora de si, tomadas por terror e consternação. Com lágrimas e tremendo contaram ao missionário o que aconteceu e pediram uma explicação. Uma vez passado o medo trágico de que o mundo teria acabado, houve rumores de que teria sido manifestação de uma guerra entre Brasil e Peru e de que o terrível fenômeno seria explicado como efeitos de gases venenosos e de enormes bombas jogadas por aviões voando a grande altitude. O padre Fidelis descreveu o conhecido fenômeno dos **bólidos** e aerólitos (ver **Me-teorito**), mas esta explicação científica não deixou satisfeitas aquelas pessoas que foram testemunhas aterrorizadas do horrível fenômeno. Durante sua estada nas margens do rio Curuçá, o padre Fedele (*sic*) D'Alviano visitou vários sítios ao longo do rio e teve a oportunidade de escutar pacientemente e com uma curiosidade cien-

tífica centenas de testemunhas, todas com diferentes níveis de educação e inteligência. Ele nos enviou uma descrição detalhada do que aconteceu naquela manhã de 13 de agosto, que estamos agora reportando, mesmo que ela se refira a eventos que aconteceram há vários meses, isto porque acreditamos que estes detalhes do evento ainda não chegaram à Europa.

Na manhã do dia 13 de agosto o céu estava claro e o glorioso sol equatorial já tinha se levantado para guiar o novo dia. Os seringueiros tinham começado seu trabalho diário se aventurando no coração da floresta, pescadores já estavam jogando suas redes no rio, e mulheres nas margens do rio as poucas roupas que são necessárias nestes lugares. De repente, perto das 8 horas, o sol tornou-se vermelho sangue e a escuridão distribuiu-se em todo lugar, como se uma nuvem opaca tivesse interceptado os raios solares, mas não havia nuvem... somente a aparência de uma poeira avermelhada na atmosfera, dando a impressão de que um imenso fogo teria reduzido a cinzas todos os elementos da natureza. Um finas cinzas começaram a cair acima das plantas da floresta e sobre as águas do rio... quando um sibilo ruidoso e múltiplo foi escutado como vindo das alturas, soando como bombas de artilharia e o ruído do sibilo aproximava-se mais e mais da terra tornando-se mais e mais aterrador de modo que as crianças, colocando as mãos nas cabeças, correram para se esconder nos becos mais escondidos de suas cabanas gritando “Mamãe, Mamãe”. Os habitantes simples da floresta, petrificados pelo que estava acontecendo, não tiveram, a essas alturas, nem mesmo a coragem ou a presença de espírito de levantar os olhos na direção do céu e ver o que estava acontecendo. Alguns pescadores tiveram esta coragem e quando estavam no meio do rio levantaram seus olhos para o céu e viram grandes bolas de fogo que caíram do céu como trovões. Elas aterrissaram no meio da floresta com um triplo choque, similar ao tremor do trovão e a luminosidade do raio. Ocorreram três distintas explosões, cada uma mais forte que a outra, causando um tremor de terra similar a um terremoto. Uma chuva fina de cinzas continuou a cair por algumas horas e o sol ficou velado até o meio-dia. As explosões dos corpos foram escutadas a centenas de quilômetros de distância. Em Remate dos Males e Esperança o fenômeno não foi visto, mas as explosões foram claramente escutadas e a população pensou que estavam testando novos canhões e bombas no Forte de Tabatinga.

Eis as evidências físicas a partir do texto do frei Fidelis: 1) queda de cinzas antes e depois dos estrondos; 2) bolas de fogo foram vistas; 3) estrondos devido à queda de corpos na floresta; 4) o fenômeno foi visto e ouvido ao mesmo tempo; 5) tremor de terra local; 6) os estrondos foram ouvidos em localidades distantes algumas centenas de km; 7) o evento aconteceu perto das 8 h da manhã de 13 de agosto de 1930. É interessante notar que o frei não menciona ne-

nhuma explosão na atmosfera, nem a existência de incêndio e nem a chegada de efeito térmico como ondas de calor.

Resumidamente podemos destacar em relação às evidências citadas acima, os seguintes pontos: a existência de poeira antes dos estrondos, mencionada por Bailey *et al.* (1995), como algo difícil de ser explicado, já que em princípio se esperaria a presença de poeira somente depois da queda. Mas de la Reza *et al.* (2004) propuseram que, se os **bólidos** são efetivamente fragmentos provenientes do cometa *Swift-Tuttle*, como tinha sido mencionado por Bailey *et al.* (1995), o corpo primário deveria ter sofrido, como se espera de corpos de baixa densidade, como é o caso de corpos cometários feitos de gelo sujo com poeira cósmica, fragmentação inicial na alta estratosfera. Isso teria produzido pedaços, sendo que apenas três deles teriam atingido o solo. Pelo menos o fragmento maior teria sido capaz de produzir o astroblema (uma cicatriz da queda no solo; ver a nota de rodapé 2 em “Crateras de impacto meteorítico no Brasil”, neste Capítulo) que foi visitado em 1997 por expedição à floresta do vale do Javari, a 25 km do rio Curuçá.

Além disso, o tremor de terra produzido pelo impacto maior ou pelo conjunto de impactos, foi registrado e medido no Observatório Sismológico de San Calixto (OSC) em La Paz, Bolívia, às 7 horas locais a uma distância de 1.300 km do ponto de impacto (Vega, 1996). A aparente diferença de 1 hora, como se verá depois, pode ser devida à utilização de um fuso horário diferente pelos seringueiros. O fato relatado pelo frei, de que o impacto foi ouvido a distâncias da ordem de algumas centenas de km levou Bailey *et al.* (1995) a propor que a energia do evento do Curuçá, inicialmente chamado “Tunguska Brasileiro”, seria cerca de dez vezes menor que a de Tunguska. Esta ordem de grandeza foi confirmada pelos estudos dos autores deste texto, como será visto mais adiante.

Pesquisas iniciais

Assim que os autores deste texto tomaram conhecimento do artigo de Bailey *et al.* (1995), começaram uma série de estudos a esse respeito em várias direções. Deve-se notar que no Brasil se tratava de assunto completamente novo e inexplorado. Em outras palavras, o evento aconteceu em território brasileiro, mas fora da pequena população de seringueiros que testemunharam o evento, ninguém mais soube disto no país. As direções mencionadas eram, de um lado, científicas e, de outro lado, sociológicas. Do lado da física, a primeira evidência foi a detecção sismológica mencionada. Também foram examinados os registros geomagnéticos do ON na data e horário do evento, mas não foi encontrado registro de tempestade magnética associada. Graças ao apoio logístico do

INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) foi possível detectar por meio de fotografias do satélite Landsat, uma única estrutura semicircular localizada a cerca de 25 km do rio Curuçá que foi acima denominada astroblema. Esse tipo de estrutura pode ser uma cratera de impacto, mas pode também ter origem vulcânica. Essa imagem do Landsat foi depois comparada com imagens complementares de radar: imagens do projeto Radam (realizadas nos anos 60 por via aérea) e do satélite SPOT-XS. Posteriormente fotografias aéreas foram feitas do astroblema usando uma aeronave do INPE.

Do lado sociológico, foi procurado sem sucesso o eventual diário do frei Fidelis. Também sem sucesso buscou-se um eventual registro independente dos estrondos do evento no Forte Militar de Tabatinga. Hoje desativado, esse forte sofreu enchente em 1932 e não se sabe nem mesmo se tais registros um dia existiram, foram conservados ou se perderam. Foi procurada, também sem sucesso, alguma testemunha confiável, ainda viva, entre a população de seringueiros da época. Várias destas iniciativas preliminares (antes da expedição ao local) estão descritas em Huygue (1996) e no filme *Three minutes to impact* do canal *Discovery Channel* de 1996.

Expedição

Em junho de 1997 foi realizada a única expedição³ à região do rio Curuçá. Partindo de Tabatinga foi realizada uma viagem de dois dias e meio pelos rios Javari (Figura 3) e Curuçá até a boca do igarapé Esperança (5° 04' 28" S e 71° 49' 10" O), que levaria até o astroblema (Figura 4). Antes de chegar a esse ponto foi explorada uma zona na beira do rio Curuçá apresentando um desflorestamento importante de 11 km x 3 km. Investigações posteriores mostraram que essa zona não tinha nenhuma relação com o evento de 13 de agosto de 1930, mas tinha sido formada mais recentemente por fortes rajadas de ventos de tempestades com baixas nuvens *cumulus-nimbus*.

³ A expedição de junho de 1997 foi financiada pelas seguintes organizações: TV Globo (programa Fantástico) e TV ABC da Austrália que participaram da expedição e Sociedade Histórica e Geográfica da Bahia. Contou com o apoio logístico da FUNAI (Fundação Nacional do Índio) e foi chefiada pelo sertanista Sidney Possuelo. Teve a participação de um dos autores deste texto (PRM), geólogo do INPE e Arno Brichta, geólogo da Universidade da Bahia, do especialista em meteoritos Wilson Carvalho da Sociedade Histórica e Geográfica da Bahia e de outro autor deste texto (RR), astrofísico do ON. Ela foi apresentada no segundo filme do *Discovery Channel*, *Rumble in the Jungle*.



Figura 3. Navegando no rio Javari no início da expedição. O guia e chefe logístico da expedição, o sertanista Sidney Possuelo testa um GPS (Foto Ramiro de la Reza)



Figura 4. Neste mapa de uma parte do vale do Javari no Brasil são mostradas a moderna cidade de Tabatinga (ponto inicial da expedição), o rio Javari que limita com o Peru e seu afluente o rio Curuçá, a desembocadura do igarapé Esperança, a cidade de Atalaia do Norte, a mais povoada na época do evento (6) e o suposto ponto de impacto. As diferentes localidades que existiam somente nos anos 30 também são mostradas: cinco pequenas localidades numeradas de 1 a 5 eram ocupadas por seringueiros: (1) Santo Antonio, (2) Algemeiro, (3) Botafogo, (4) São Bento e (5) Cajueiro

O trajeto fluvial no igarapé Esperança foi muito difícil e foi logo abandonado. A viagem prosseguiu com uma caminhada na floresta de cerca de 20 km até o astroblema. Como apoio para o itinerário realizado com GPS foram utilizadas: (1) as coordenadas da imagem Landsat (escala 250.000, gravada em 1º de agosto de 1994); (2) imagem SPOT-XS, escala 100.000, gravada em 23 de agosto de 1995 como referência de detalhes da região.

Perto das coordenadas 5° 10' 34" S e 71° 38' 34" O a expedição subiu cristas bem íngremes indicando o ingresso na cicatriz. O bordo inicial da crista a noroeste teria altura de 20 m em relação ao terreno circundante e, dentro da estrutura, observou-se declive com altura estimada da ordem de 40 m. O ponto central do astroblema determinado com base na imagem SPOT é 5° 10' 53" S e 71° 38' 27" O. Entre o primeiro ponto dentro da estrutura e o ponto central não foi encontrado nenhum declive importante. Isto caracterizaria a estrutura da cratera como sendo de pouca profundidade, talvez da ordem de 50 m. Toda a região do astroblema apresentava do ponto de vista da drenagem, característica peculiar e diferente da zona circundante. Já a vegetação em geral não se diferenciava da vegetação próxima, o que é compatível com o período característico da recuperação vegetal amazônica, por exemplo, em caso de incêndio, que é da ordem de 20 a 30 anos (d'Oliveira *et al.*, 2011).

A superfície do solo nesta região amazônica é caracterizada principalmente por arenitos e argilas, sem a presença em geral de estruturas duras ou rochosas. No entanto, nas cristas foram encontradas algumas amostras de argila compactada. Mesmo que, como será visto depois com a interpretação física do modelo de impacto, as velocidades terminais dos **bólidos** não sejam muito elevadas (explicando a ausência de material impactado fundido), não se pode caracterizar essas amostras como sendo produzidas pelo impacto do **bólido**. De fato, elas podem ter resultado de uma compactação pelo peso em camadas internas e sido removidas do interior pelo impacto.

A uns 2—3 km do centro da estrutura, agora considerada cratera, na direção sudoeste, foi encontrada entre outras, uma amostra maior, do tamanho de uma bola de futebol de massa rochoso-argilosa, pouco consolidada e friável, com aparência de bauxita. Ela mostrou ter a composição típica do solo. Pelo tamanho essas amostras poderiam ser comparadas a tectitas, que são rochas que podem ter a forma esférica e são formadas do material fundido pelo impacto e depois ejetadas e esfriadas. No entanto, já que as velocidades finais dos corpos preditas pelo modelo não são muito elevadas, seria de se esperar a ausência de material fundido. Concluímos então que esses corpos não poderiam ser tectitas. Todavia, como foram encontrados muito perto da cratera, mas fora dela, e considerando a ausência geral de rochas nessa região do Amazonas, é possível

que esses corpos esféricos tenham se originado no evento, mas o mecanismo de formação é desconhecido no momento.

A geometria da cratera não é simples. Nas imagens dos diferentes satélites se encontra uma forma aparente de ferradura com uma zona aberta com clara ausência de paredes na direção sul (Figura 5). Essa forma pode ser característica de crateras de impacto produzidas por quedas de **bólidos** com ângulos baixos menores que $\sim 30^\circ$ (Gault and Wedekind, 1978; Schultz and Anderson, 1996). Essa situação favorece a hipótese cometária, na qual o **bólido** estaria vindo do norte, da **constelação** de Perseu, já que as Perseidas são associadas ao cometa *Swift-Tuttle*. No caso de **bólidos** caindo no sentido N-S, os seringueiros que na década de 30 povoavam as localidades às margens do rio Curuçá a ~ 25 km ao norte do ponto de impacto (Figura 4), teriam melhores condições de observação. Mesmo em se tratando de fenômeno muito rápido, eles veriam as “bolas de fogo” tais como descritas no relatório do frei Fidelis, passando praticamente acima deles e indo na direção da floresta 25 km ao sul.

Existem também evidências de cristas centrais, infelizmente com alturas não medidas. Uma medida grosseira feita a partir das imagens fornece diâmetro aparente de 1 km. No entanto, a falta de visita no local à parte sudeste não permite confirmar a presença de paredes nessa região, tal como foi feito no noroeste. Assim, não se tem medida confiável do diâmetro, de borda a borda.

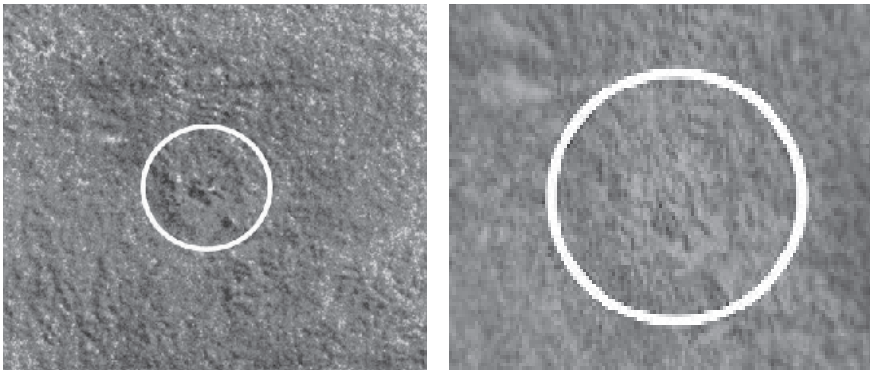


Figura 5. O astroblema (no interior dos círculos) em duas diferentes imagens: (a) do satélite Landsat entre o visível e o infravermelho próximo e (b) do satélite SPOT-XS. Em ambas as imagens N para cima e a parte aberta da cratera sugerindo a forma de ferradura se encontra na parte de baixo da figura

Dados sismológicos

O OSC em La Paz detectou o evento do Curuçá a uma distância de 1.300 km. Graças a isso foi possível estimar a magnitude na escala Richter de $4,7 \pm 0,2$, a energia sísmica igual a $7,1 \times 10^{11}$ J e o instante do tremor de terra descrito pelo frei D'Alviano. Vários fatores favoráveis contribuíram para esse registro. De um lado o OSC, que faz parte de importante rede sismológica desde 1913, tinha inaugurado em 1930 um novo sismógrafo Galitzin. Os detalhes das medidas do evento estão em Vega (1996), no entanto será feita aqui exposição dos elementos mais importantes.

Na Figura 6 é mostrado o registro histórico que contém o sinal típico de um evento sísmico de superfície, de ondas geradas por reflexões múltiplas de onda aprisionada numa camada granítica. Essas ondas geralmente são transmitidas até distâncias de 6 mil km, com velocidade de $3,51 \pm 0,07$ km/s com períodos entre 0,5 e 6,0 s. O encontro com montanhas ou depósitos de água pode perturbar essa transmissão. Mas no caso do Curuçá as circunstâncias foram muito favoráveis, já que a viagem da onda sísmica de 1.300 km desde o provável ponto de impacto até o sismógrafo em La Paz foi feita dentro da região sísmica conhecida como o Escudo Brasileiro, paralelamente à cordilheira dos Andes. Por outro lado, Minaya *et al.* (1989) tinham anteriormente registrado no OSC vários eventos sísmicos de superfície provenientes da região entre o Peru e o Brasil (caso do evento do Curuçá) e concluído que a transmissão de ondas era, nessas condições, muito eficiente. Infelizmente nenhuma outra estação sismológica na região do evento estava em funcionamento na época, o que teria permitido localizar sismicamente a fonte, ou seja, a região de impacto.

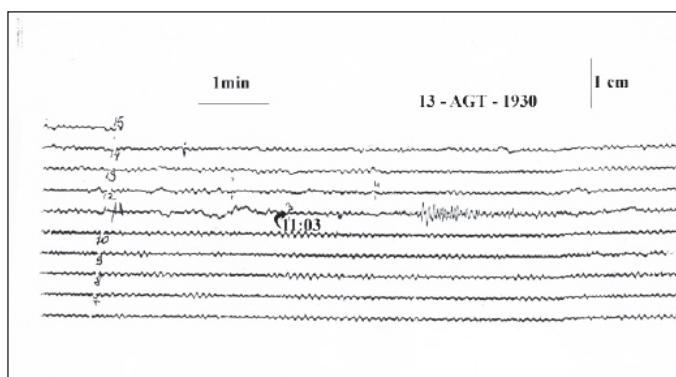


Figura 6. Sismograma do OSC de 13 de agosto de 1930 obtido com o detector Galitzin-Wilip (adaptado de Vega, 2006). A hora universal está indicada. As amplitudes correspondentes aos períodos curtos (< 3 s) estão bastante atenuadas, mas as correspondentes a períodos mais longos aparecem bem desenvolvidas

Na Figura 6 está indicado o início do registro perto de 11h em hora universal, que corresponde a 7h 5m 13,2s em hora local. Considerando-se a velocidade da onda sísmica pode-se calcular o instante do evento no Curuçá que estaria entre 6h 59m 7s e 6h 59m 45s de 13 de agosto de 1930 no OSC. A diferença deste horário com a hora aproximada de 8h no relato do frei D’Alviano pode ser explicada pela diferença de uma hora do fuso horário entre o ponto de observação no Amazonas e a localização do sismógrafo em La Paz.

Interpretação física

Durante a penetração de um corpo cósmico na atmosfera terrestre, um conjunto de processos físicos produz uma série de fenômenos de grande complexidade. Se o corpo é muito pequeno, a **ablação** faz com que ele desapareça. Este é o processo que dá origem às estrelas cadentes ou **meteoros**. Isso não acontece com corpos com mais de alguns metros de diâmetro.

O estudo da queda de um corpo específico requer uma série de simulações ou modelagens numéricas. Mas neste trabalho foi feita análise geral, válida para qualquer corpo de tamanho médio ou maior atravessando a atmosfera terrestre. Foi usado o programa de computador de Collins, Melosh and Marcus (2005), CMM05, o mais completo e prático conhecido até agora. A partir de dados de entrada como tamanho, densidade, velocidade do corpo impactante, direção da queda (ângulo de **altura** em relação à horizontal), a densidade do solo (alvo do impacto) e a distância do ponto de impacto em que se pretende fazer o estudo, é possível analisar todo o processo de queda. Quase sempre, de uma forma ou de outra, se produz fragmentação do corpo inicial. Essa fragmentação é produzida pela pressão da atmosfera na face de entrada do corpo. O destino do corpo vai depender de sua densidade e de sua composição química, o que se traduz numa maior ou menor resistência mecânica à fragmentação do corpo. Quanto maior ou menor a densidade inicial do corpo impactante, menor ou maior fragmentação ocorrerá. Também, dependendo da maior ou menor fragmentação, dois tipos diferentes de eventos podem ocorrer, a depender da altura em que ocorre a maior dissipação da energia cinética do corpo.

Se a fragmentação é maior na direção transversal à direção da queda, em certas condições ocorre o fenômeno explosivo da detonação (Chyba *et al.*, 1993). Neste caso nenhuma cratera é formada. Uma onda de choque é produzida na atmosfera, que pode atingir a superfície terrestre produzindo importantes efeitos térmicos em uma zona ao redor do local do impacto, dependendo do valor da energia cinética dissipada na atmosfera. O evento de Tunguska é

o exemplo mais notório deste caso em que a detonação teria se produzido a uma altura de 5.700 m destruindo, pelo efeito da mencionada onda de choque, uma superfície de 2 mil km² da floresta na Sibéria (Napier and Asher, 2009). Outro exemplo similar é o ocorrido recentemente em 15 de fevereiro de 2013 na Rússia e que foi descrito acima.

Ao contrário, se a fragmentação for inferior a um certo valor crítico, não ocorrerá detonação e os fragmentos, grandes no caso, poderão produzir crateras, sendo a maior cratera formada pelo fragmento maior. É o caso do evento do Curuçá. No entanto, a esta altura da pesquisa, não se sabe a natureza do corpo impactante. Este pode ser tanto de natureza asteroidal quanto cometária. As duas possibilidades serão consideradas aqui na tentativa de se chegar a alguma conclusão.

Hipótese cometária

No hemisfério norte é popular a **chuva de meteoros** Perseidas, cujo máximo ocorre em 11-13 de agosto de cada ano. Alguns historiadores consideram que esse fenômeno ajudou muito a popularizar a astronomia nos séculos 19 e 20. Os corpos que causam os **meteoros** caem na Terra com velocidade da ordem de 59 km/s e parecem vir da **constelação** de Perseu, que dá o nome a essa **chuva**. A **chuva** é produzida nessas datas pelo encontro anual da Terra em sua órbita ao redor do Sol, com a órbita do cometa Swift-Tuttle, sendo esta órbita quase perpendicular ao plano da eclíptica. Este tipo de órbita é peculiar e não se aplica à maioria dos cometas de curto período (período orbital < 200 anos) como o Swift-Tuttle. Os fragmentos que caem na Terra são a matéria deixada pela passagem do cometa. Diferentemente da cauda bem conhecida dos cometas, formada pela sublimação do gelo cometário e cuja direção é sempre oposta ao Sol, estes fragmentos preenchem uma espécie de tubo anular que envolve a órbita desse cometa de período de 120 anos. Devido ao fato de que o corte transversal desse tubo é significativamente maior que a Terra, esta só recebe pequena porcentagem dos fragmentos deixados pelo cometa durante não mais que 160 mil anos, o que corresponde a 1.200 órbitas do cometa (Harris *et al.*, 1995).

Especulou-se sobre a possibilidade de colisão da Terra com o corpo principal desse cometa durante a **chuva de meteoros**, o que constituiria perigo real para a nossa civilização. Cálculos da órbita futura mostram que no dia 5 de agosto de 2126 esse cometa passará a somente 0,153 UA da Terra (UA: Unidade Astronômica é a distância média da Terra ao Sol, cerca de 150 milhões km) e que em 2261 a menor distância será de 0,147 UA. Em ambos os casos nosso Planeta estaria a salvo (Yau *et al.*, 1994; Chambers, 1995).

Certa fração dos cometas sofre ruptura (Boehnhardt, 2004) levando, seja à sua destruição total, seja também à formação de cometas menores. Vários mecanismos de ruptura são estudados, mas só no caso da destruição recentemente observada do cometa Shoemaker-Levy é que a verdadeira causa é conhecida. Efeitos de maré⁴ causados por Júpiter o levaram à fragmentação em cerca de 20 pedaços que acabaram colidindo com aquele planeta. No evento do Curuçá um fragmento inerte, isto é, sem vaporização tipicamente cometária teria se separado do corpo principal do cometa em algum lugar de sua órbita e caído na Terra na manhã de 13 de agosto de 1930. Como será visto mais adiante, o tamanho desse fragmento seria, segundo nosso modelo, da ordem de 340 m ao entrar na alta atmosfera, o que é relativamente pequeno se compararmos ao diâmetro do corpo principal do cometa que é da ordem de 23 km (Boehnhardt *et al.*, 1996). Exemplos de separação de fragmentos importantes foram observados em muitos outros cometas.

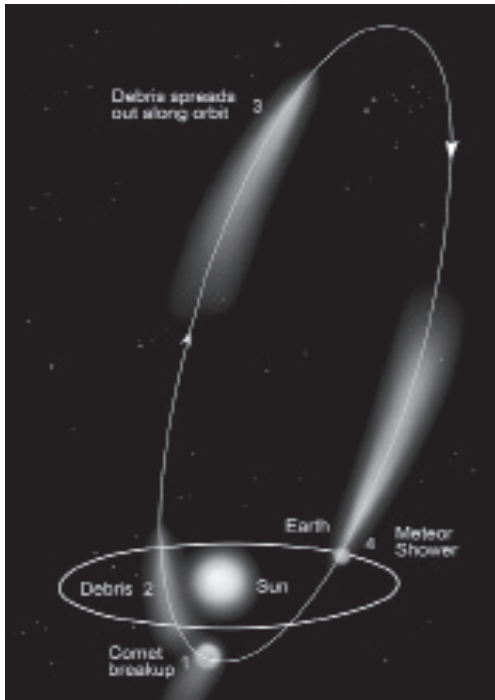


Figura 7. Desenho ilustrativo da órbita de um cometa como o Swift-Tuttle e da Terra ao redor do Sol. Também são mostrados esquematicamente os resíduos cometários que produzem **chuvas de meteoros** na atmosfera da Terra (<http://lifeng.lamost.org/courses/astrotoday/CHAISSON/AT314/HTML/AT31403.HTM>)

⁴ A atração gravitacional exercida por um corpo sobre outro é mais intensa nas partes mais próximas e menos intensa nas partes mais afastadas. Isso é mais pronunciado quando dois corpos se aproximam muito. Podem ocorrer então deformações, como as marés oceânicas provocadas na Terra pela Lua mas, às vezes, até mesmo ruptura e desintegração, como de cometas que se aproximam demais de Júpiter.

Para a análise e simulação da queda ocorrida em Curuçá foi utilizada uma série de valores para os parâmetros de entrada requeridos pelo programa CMM05. Como condição de contorno foram consideradas somente simulações que produzissem magnitude sísmica igual à observada no evento. Para o diâmetro inicial do corpo impactante foram explorados tamanhos desde algumas dezenas de metros até mais que 400 m, mas foram escolhidos somente os valores que não resultassem na ocorrência de uma denotação na atmosfera, pois tal fenômeno não foi observado no caso. A densidade do corpo impactante foi considerada ser igual à de um cometa, de 500 kg/m^3 (Jewitt, 1996). Esta pequena densidade é compatível com a grande atividade apresentada pelo cometa Swift-Tuttle e é intermediária entre os valores cometários típicos entre 100 e $\sim 1.000 \text{ kg/m}^3$. Para a velocidade do corpo impactante foi utilizada velocidade muito próxima da velocidade do cometa no periélio, de 42 km/s (Harris *et al.*, 1995). Tendo em conta que a órbita do cometa é quase perpendicular à da Terra ao redor do Sol, a velocidade da Terra não foi considerada no impacto. Para o cálculo do ângulo de impacto considerou-se que o corpo fizesse parte da **chuva de meteoros** Perseidas, portanto tomou-se a posição do **radiante** das Perseidas: (ascensão reta) $\alpha = 46,4^\circ$ e (**declinação**) $\delta = 57,8^\circ$ (Harris *et al.*, 1995). Para as coordenadas geográficas do ponto de impacto, perto do rio Curuçá: $5,18^\circ \text{ S}$ e $71,65^\circ \text{ O}$, o valor calculado do ângulo de **altura** do **radiante** das Perseidas às 7h da manhã foi $26,7^\circ$ e do **azimute**, 355° , ou seja, o corpo vinha praticamente do Norte. Para a latitude em questão a **altura** máxima do **radiante** das Perseidas é 27° de modo que, no momento do impacto, o **radiante** estava bastante perto do seu valor máximo. Nas simulações foram também explorados ângulos de **altura** um pouco menores, caso o corpo tivesse algum desvio em relação à **chuva de meteoros**. Para a densidade do solo (alvo) foi adotado o valor de 2.500 kg/m^3 correspondente à rocha sedimentar. Talvez valores pouco menores como 2.100 kg/m^3 sejam mais característicos do Amazonas. Mas essas diferenças não produzem variações importantes no tamanho das crateras formadas pelo impacto. Foi considerada a distância de 25 km para o estudo dos efeitos do impacto como o tremor de terra, a onda de choque e os efeitos térmicos. Essa é a distância média do ponto de impacto ao rio Curuçá, junto ao qual a população de seringueiros e testemunhas habitavam em 1930.

Com esses dados de entrada, o projétil teria começado a se desintegrar em alturas entre 102 e 111 km e atingido a superfície já desintegrado com velocidade entre 0,7 e 1,5 km/s e energia de impacto entre 0,64 e 3,3 Mt.

Nessas condições o programa previu que os fragmentos seriam distribuídos em área elíptica de $5,5 \text{ km} \times 2,2 \text{ km}$. Foi assegurado que esses resultados produzem efeito sísmico de magnitude $4,7 \pm 0,2$ na escala Richter (valor observado

no OSC em La Paz). A 25 km do ponto de impacto, seus efeitos teriam sido sentidos pelos habitantes sem que eles sofressem maiores danos.

Devido à fragmentação, o resultado do impacto não produziria uma só cratera. O programa de CMM05 não calcula a distribuição dos tamanhos dos fragmentos e suas respectivas crateras, mas só a cratera produzida pelo maior fragmento que teria atingido o solo. A predição foi de uma cratera simples com diâmetro de ~500 m e profundidade média de 85 m.

Como não ocorreu detonação na atmosfera, nenhuma radiação térmica importante foi emitida. De fato, o relatório do frei Fidelis não menciona efeitos térmicos. Também, como a velocidade de impacto foi da ordem de apenas 1,2 km/s, pouca fusão devida ao impacto teria se produzido no alvo terrestre. Velocidades maiores que 12 km/s seriam necessárias para produzir fusão de rochas.

Rigorosamente em caso de impacto, a onda de choque no ar tem três fontes: (1) o ar empurrado pelos corpos impactantes; (2) o ar acelerado pela expansão radial da cratera e (3) o ar deslocado pelos fragmentos ejetados. O programa de CMM05 calcula o efeito total, ou seja, a onda de choque total utilizando resultados de explosões nucleares muito próximas do solo ou no solo (Glasstone and Dolan, 1977). No caso do Curuçá a onda de choque teria chegado ao local de observação 1,2 min depois do impacto, com excesso de pressão entre 0,02 e 0,04 da pressão atmosférica e velocidade máxima do vento entre 5,0 e 9,7 m/s, produzindo intensidades do som da ordem de 70 dB (apenas o ruído de tráfego pesado de carros). Este excesso de pressão é insuficiente para produzir danos. A título de exemplo, se precisaria um excesso de pressão quatro vezes maior para derrubar uma parede de tijolos. A velocidade máxima do vento também foi insuficiente para produzir danos na floresta. Experiências nucleares mostram que somente ventos com mais de 40 m/s derrubam cerca de 30% das árvores (Glasstone and Dolan, 1977: 97).

Hipótese asteroidal

Diferentemente do caso cometário discutido anteriormente, no caso asteroidal não temos tantos parâmetros a considerar. As velocidades de impacto são tipicamente de 12—20 m/s (Bottke Jr. *et al.*, 1994: 337-357) e o ângulo de impacto mais provável é 45° (Shoemaker, 1962: 283-359). Também a queda de **asteroide** sobre a Terra pode acontecer em qualquer momento. Nestas condições foram exploradas soluções com **asteroides** de diâmetros variáveis que produzissem, como anteriormente, magnitude sísmica $4,7 \pm 0,2$.

Foram examinados três tipos de corpos rochosos: rocha porosa, rocha densa e ferro com densidades de 1.500, 3.000 e 8.000 kg/m³, respectivamente. As

velocidades ficaram dentro dos limites citados sendo que 11 km/s constituíram o limite inferior. Os ângulos de impacto puderam variar de 30° até 80°. A densidade do alvo terrestre foi a mesma considerada anteriormente, igual a 2.500 kg/m³. Poucas soluções satisfatórias foram encontradas. Nenhuma foi encontrada para corpos porosos. Também, como anteriormente, foram eliminadas soluções que prediziam detonação na atmosfera. Dois tamanhos foram selecionados para o corpo impactante: 85 m se fosse rocha densa e 35 m se fosse constituído de ferro. Os **bólidos** do primeiro tipo começam a se desintegrar a 54 km de altura e os do segundo tipo a 9 km e a velocidade de impacto é de 4,0 e 9,0 km/s, respectivamente. As energias de impacto neste caso estão entre 0,7 Mt e 3,3 Mt. É interessante notar que estes valores são similares aos do caso cometário. As áreas impactadas pelos projéteis são de 0,8 x 0,6 km para o **bólido** de 85 m e de 0,1 x 0,1 km para aquele de 35 m. Para distância de 25 km, os valores da onda de choque são parecidos ao do caso cometário. O provável intervalo de tempo para a queda do primeiro tipo de **bólidos** é de 38 mil anos e de 800 anos para o segundo tipo.

Simulação versus relato do frei Fidelis

Os resultados da simulação considerados mais realistas são aqueles que satisfizeram o valor da energia sísmica total. O programa de CMM05 considera que a eficiência sísmica, ou seja, a fração da energia de impacto convertida em energia da onda sísmica é da ordem de 10⁻⁴. No caso de Curuçá a energia da onda sísmica é 7,1 x 10¹¹ J. Esta energia sísmica, se comparada com as energias de impacto mais realistas do evento (no caso cometário entre 0,6 Mt e 3,3 Mt e 0,7 Mt e 3,3Mt para o caso asteroidal), produzirá eficiências médias de 2,8x10⁻⁴ e 0,5x10⁻⁴, respectivamente.

O fato relatado pelo frei, que sibilos foram ouvidos ao mesmo tempo em que foram vistos os **bólidos**, é um fenômeno esporádico conhecido como eletrofonia, geralmente associado a **meteoros** importantes. Esse fenômeno não usual permaneceu um mistério por quase dois séculos. O famoso astrônomo Edmond Halley (1656-1742) o teria atribuído a efeito psicológico. Somente com os trabalhos de C. S. Keay em 1980 apareceu uma explicação plausível que foi replicada em laboratório (Keay, 1980 e 1995). Quando um **bólido** cai, ele interage com o campo magnético terrestre que fica aprisionado no plasma turbulento atrás do **bólido**. Quando o plasma ionizado pela alta temperatura é subsequentemente neutralizado, emite radiação eletromagnética de baixa frequência. As testemunhas escutam um som porque estas ondas de baixa frequência são transduzidas

em ondas acústicas em objetos próximos a elas, que podem ser folhas, cabelos etc., até mesmo óculos. O interesse deste fenômeno no caso de Curuçá é que o som tem maior duração (é mais ouvido), quanto mais rasante é a queda do **bólide** (Keay, 1995). Isto favorece a interpretação cometária do evento.

Conclusões

Em princípio o evento de Curuçá poderia ser explicado pela queda de dois tipos completamente diferentes de **bólidos**. De um lado, por fragmento do cometa Swift-Tuttle e, por outro, por **asteroide** de muito maior densidade. Quais são os argumentos pró e contra cada uma dessas alternativas? Eis os argumentos a favor da hipótese cometária: 1) a data e o horário do evento coincidem com o máximo da passagem da Terra pela órbita do cometa Swift-Tuttle; 2) a eletrografia favorece a queda em ângulos baixos, caso de fragmentos cometários; 3) a baixa profundidade encontrada no astroblema é compatível com o caso cometário; com efeito, para uma mesma energia de impacto, as baixas densidades cometárias favorecem crateras menos profundas, já que a baixa resistência mecânica do material cometário favorece a deposição de energia relativamente perto da superfície do alvo (Rahe *et al.*, 1994: 597 — 634); 4) a cratera indica uma queda no sentido N-S, que é compatível com um **bólide** vindo das Perseidas. A distribuição das diferentes localidades de seringueiros que moravam ao longo do rio Curuçá nos anos 30 (Figura 3) mostra que todas as localidades estão ao norte do ponto de impacto. Nessa condição, as testemunhas poderiam muito melhor observar os **bólidos** do que se, ao contrário, viessem do sul.

Como argumento contrário teríamos que o diâmetro da cratera segundo a simulação seria aproximadamente metade do diâmetro aparente do astroblema. No entanto, pode ser que não disponhamos de medida realista do diâmetro da cratera. Durante a exploração foi constatada a baixa profundidade (~50 m), o que é bastante característico das chamadas crateras complexas. Assim a região circular vista, por exemplo, na Figura 5 (a), pode indicar a borda final da cratera, mas a verdadeira cratera pode ter um diâmetro < 1 km. Uma imagem típica deste tipo de estrutura pode ser vista na Figura 1.6 de Osinski and Pierazzo, 2012: 1-17.

Para a hipótese asteroidal o tamanho calculado da cratera final de ~1 km seria compatível com o diâmetro aparente observado pelos satélites, mas a profundidade da cratera deveria ser, pelo menos, quatro vezes maior que a observada. Um maior número de argumentos favorecendo a hipótese cometária pode ser visto em de la Reza *et al.* (2013).

Com base nesta análise a hipótese cometária leva vantagem e a ela se pode juntar ainda o fato mencionado por Napier and Asher (2009), de que os três maiores eventos do século 20 (Tunguska, Curuçá e da Guiana Inglesa) aconteceram nas datas de importantes **chuvas de meteoros** de origem cometária (Tabela 1). No entanto, se a origem de Tunguska ainda é debatida, o caso da Guiana ainda não tem estudo físico detalhado.

EVENTO	DATA	CHUVA METEOROS	PICO	OBJETO ASSOCIADO
Tunguska	30 Jun 1908	β Táuridas	30 Jun	Cometa Encke
Curuçá	13 Ago 1930	Perseidas	12 Ago	Cometa Swift-Tuttle
Guiana Inglesa	11 Dez 1935	Geminidas	13 Dez	3200 Phaethon (asteroide com características cometárias)

Tabela 1. Os eventos de impacto mais importantes do século 20 segundo Napier and Asher (2009)

O caso de Curuçá aqui analisado não envolve explosão na atmosfera como o de Tunguska, senão uma queda de **bólidos** na superfície do Planeta que, felizmente pelo local do impacto, não ocasionou maiores danos.

Referências

- Bailey, M. E.; Markham, D. J.; Massai, S. and Scriven, J. E. (1995), The 1930 August 13 'Brazilian Tunguska' event, *The Observatory*, 115, 250-253.
- Boehnhardt, H. (2004), Split comets in Michel C. Festou, H. Uwe Keller and Harold A. Weaver (Eds.), *Comets II*, 301-316, Tucson, AZ: The University of Arizona Press.
- Boehnhardt, H.; Birkle, K. and Osterloh, M. (1996), Nucleus and tail studies of Comet P/ Swift-Tuttle, *Earth, Moon and Planets*, 73, 51-70.
- Bottke Jr., W. F.; Nolan, M. C.; Greenberg, R. and Kolvoord, R. A. (1994), Collisional lifetimes and impact statistics of Near Earth asteroids in T. Gehrels (Ed.), *Hazards due to comets and asteroids*, Tucson, Az: The University of Arizona Press.
- Chambers, J. E. (1995), The long-term dynamical evolution of Comet Swift-Tuttle, *Icarus*, 114, 372—386.
- Chyba, C. F.; Thomas, P. J. and Zhanle, K. J. (1993), The 1908 Tunguska explosion: Atmospheric disruption of a stony asteroid, *Nature*, 361, 40-44.

Collins, G. S.; Melosh, H. J. and Marcus, R. A. (2005), Earth impact effects program: A web-based computer program for calculating the regional environmental consequences of a meteoroid impact on Earth, *Meteoritics & Planetary Science*, 40, 817-840.

D'Alviano, F. (1943), “Notas etnográficas sobre os Tikunas do Alto Solimões”, *Revista do Instituto Histórico Brasileiro*, Rio de Janeiro, 180-181.

D'Alviano, F. (1945), *Gramática, dicionário, verbos, frases e vocabulário prático da língua dos índios Ticuna*, Rio de Janeiro: Editora IHGB.

de la Reza, R. e Faulhaber, P. (2012), “A mensagem cósmica de Frei Fidelis de Alviano” in P. Faulhaber, H. M. Bertol Domingues e L. C. Borges (Orgs.), *Ciências e Fronteiras*, 163-174, Rio de Janeiro: MAST.

de la Reza, R.; Lins de Barros, H. and Martini, P. R. (2013), trabalho submetido para *Meteoritics & Planetary Science*.

de la Reza, R.; Martini, P. R.; Brichta, A.; Lins de Barros, H. e Serra, P. R. M. (2004), The event near the Curuçá river, *Meteoritics & Planetary Science*, 39, Supplement, Abstract N° 5150.

d'Oliveira, M. V. N.; Alvarado, E. C.; Santos, J. C. and Carvalho Jr., J. A. (2011), Forest natural regeneration and biomass production after slash and burn in a seasonally dry forest in the Southern Brazilian Amazon, *Forest Ecology and Management*, 261, 9, May, 1490-1498.

Gault, D. E. and Wedekind, J. A. (1978), Experimental studies of oblique impacts, *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf.*, 9, 3843-3875.

Glasstone, S. and Dolan, P. J. (1977), *The effects of nuclear weapons*, 3rd ed., Washington D.C.: U.S. Department of Defense and Department of Energy.

Gomes, R.; Levison, H. F.; Tsiganis, K. e Morbidelli, A. (2005), Origin of the cataclysmic late heavy bombardment period of terrestrial planets, *Nature*, 435, 466-469.

Gorelli, R. (1995), The rio Curuçá event, *Meteorite!*, August, 26.

Gråe-Jorgensen, U.; Appel, P. W. U.; Hatsukawa, Y.; Frei, R.; Oshima, M.; Toh, Y. and Kimura, A. (2009), The Earth-Moon system during the late heavy bombardment period. Geochemical support for impacts dominated by comets, *Icarus*, 204, 368-380.

Harris, N. W.; Yau, K. K. C. and Hughes, D. W. W. (1995), The true extent of the nodal distribution of the Perseid meteoroid stream, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 273, 999-1015.

Hodge, P. (1994), *Meteorite craters and Impact structures of the Earth*, Cambridge University Press.

Huygue, P. (1996), Incident at Curuçá, *The Sciences*, 14-17, New York Academy of Sciences, March-April.

- Jewitt, D. C. (1996), Debris from Comet P/Swift-Tuttle, *The Astronomical Journal*, 111, 1713-1717.
- Keay, C. S. L. (1980), Anomalous sounds from the entry of meteors fireballs, *Science*, 210, 11-15.
- Keay, C. S. L. (1995), Continuous progress in electrophonic fireball investigations, *Earth, Moon and Planets*, 68, 361-368.
- Korff, S. A. (1939), Tornado or meteor crash?, *The Sky*, September, 8 — 10 and 24.
- Minaya, E.; Ayala, R.; Alcócer, L. and Cabré, R. S. J. (1989), Ondas Lg de sismos sudamericanos, *Revista Geofísica*, 31, 115-146.
- Napier, B. and Asher, D. (2009), The Tunguska impact and beyond, *Astronomy & Geophysics*, 50, 1, 1.18-1.26.
- Osinsky, G. R. and Pierazzo, E. (2012), *Impact Cratering: Processes and Products*, Wiley and Blackwell.
- Rahe, J.; Vanysek, V. and Weissman, P. R. (1994), Properties of cometary nuclei in T. Gehrels (Ed.), *Hazards due to Comets and Asteroids*, Tucson, AZ: The University of Arizona Press.
- Schultz, P. H. and Anderson, R. R. (1996), Asymmetry of the Manson impact structure: evidence for impact angle and direction, *Geolog. Soc. Am. Spec. Pap.*, 302, 397-417.
- Shoemaker, E. M. (1962), Interpretation of lunar craters in Z. Kopal (Ed.), *Physics astronomy of the Moon*, New York Academy Press.
- Steel, D. (1995), Two “Tunguskas” in South America in the 1930s?, *WGN, The Journal of IMO*, 23, 6, 207 — 209.
- Vega, A. (1996), Posible evidencia sísmica del evento ‘Tunguska’ del 13 de Agosto de 1930, ocurrido en Brasil, *Revista Geofísica*, Instituto Pan-Americano de Geografía e História, 44, 201-211.
- Yau, K.; Yeomans, D. and Weissman, P. (1994), The past and future motion of Comet P/Swift-Tuttle, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 266, 305 — 316.