

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
**"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"**  
**CAMPUS DE GUARATINGUETÁ**

**MILLENA CASTRO GUIMARÃES**

**Estudo da dinâmica orbital no processo de envelhecimento de NEAs**

Guaratinguetá

2021

**Millena Castro Guimarães**

**Estudo da dinâmica orbital no processo de envelhecimento de NEAs**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Física Bacharelado da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Física Bacharelado .

Orientador: Profº Dr. Rosana Aparecida Nogueira de Araújo

Coorientador: Profº Dr. Othon Cabo Winter

Guaratinguetá

2021

G963e Guimarães, Millena Castro  
Estudo da dinâmica orbital no processo de envelhecimento de NEAs /  
Millena Castro Guimarães – Guaratinguetá, 2021.  
39 f : il.  
Bibliografia: f. 38-39

Trabalho de Graduação em Física (Bacharelado) – Universidade  
Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2021.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Rosana Aparecida Nogueira de Araújo  
Coorientador: Prof. Dr. Othon Cabo Winter

1. Asteróides. 2. Órbitas. 3. Radiação solar. I. Título.

CDU 523.4

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
**"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"**  
**CAMPUS DE GUARATINGUETÁ**

**MILLENA CASTRO GUIMARÃES**

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE "GRADUANDO EM FÍSICA BACHARELADO "

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE GRADUAÇÃO EM FÍSICA BACHARELADO

Profº Dr. JULIO MARNY HOFF DA SILVA  
Coordenador

**BANCA EXAMINADORA:**



Profº Dr. Rosana Aparecida Nogueira de Araújo  
Orientador/INPE



Profº Dr. Rafael Sfair de Oliveira  
UNESP-FEG



Profº Dr. Daniela Cardozo Mourão  
UNESP-FEG

Março , 2021

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) - Processo: 2019/12829-6.

## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo computar a radiação solar devida a uma aproximação com o Sol e a radiação acumulada na superfície de um asteroide desde o momento em que ele se torna um *Near-Earth Asteroid* (NEA) até o presente momento, de modo que se possa estimar o seu grau de envelhecimento espacial (*space weathering*). Nesta pesquisa, o asteroide escolhido foi o (162173) Ryugu, o qual foi alvo da missão Hayabusa2, tendo sido verificado, na ocasião, que ele apresenta um grau de envelhecimento em sua superfície. Desta forma, este trabalho busca verificar a evolução orbital de Ryugu e a possibilidade de ele ter sofrido encontros próximos com o Sol, além de computar a radiação acumulada em sua superfície. Esta questão foi abordado por meio de integrações numéricas do problema gravitacional de N-corpos, em que foram selecionados 7.000 clones partindo da vizinhança da ressonância  $\nu_6$ , verificando-se quais chegaram na órbita atual de Ryugu. Foi então analisada a evolução orbital dos clones que obtiveram êxito. Verificou-se que alguns clones chegaram a uma distância muito perto do Sol, recebendo uma grande quantidade de radiação de uma única vez, podendo tal radiação ter modificado sua superfície em um único evento pontual. Observaram-se também as radiações acumuladas ao longo de sua vida.

**PALAVRAS-CHAVE:** *Near-Earth Asteroid. Space Weathering. (162173) Ryugu.*

## ABSTRACT

This work aims to calculate the solar radiation due to an approximation with the Sun and the accumulated radiation on the surface of an asteroid from the moment it becomes a Near-Earth Asteroid (NEA) until the present moment, in order to estimate the fraction of the space weathering. The asteroid chosen was (162173) Ryugu, the target of the Hayabusa2 mission, which has verified that it has traces of space weathering on its surface. In this way, this work seeks to verify Ryugu's orbital evolution and the possibility that it has undergone close encounters with the Sun, in addition to computing the radiation accumulated on its surface. This issue was approached through numerical integration of the gravitational problem of N-bodies, in which 7.000 clones were selected from the region of the  $\nu_6$  resonance, verifying which arrived in Ryugu's current orbit. It was then analyzed the orbital evolution of the clones that succeeded. It was found that some clones arrived at a distance very close to the Sun, receiving a large amount of radiation at once, and such radiation may have modified their surface in a single event. The accumulated radiation over their lifetime was also analyzed.

**KEYWORDS:** Near-Earth Asteroid. Space Weathering. (162173) Ryugu.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Parâmetros Orbitais	12
Figura 2	Representação das órbitas de NEAs	13
Figura 3	Ilustração esquemática da evolução de Ryugu por (MOROTA et al., 2020)	20
Figura 4	Condições iniciais - Ressonância secular $\nu_6$	22
Figura 5	Sequência de Comandos Python	24
Figura 6	Sequência de Comandos C	24
Figura 7	Distância do Sol	29
Figura 8	Distância do Sol	30
Figura 9	Distância do Sol	31
Figura 10	Parcela da Radiação Acumulada	33
Figura 11	Parcela da Radiação Acumulada	34
Figura 12	Parcela da Radiação Acumulada	35



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Elementos Orbitais de Ryugu na época 2455800.5 (27 de Agosto de 2011) . . . . .	18
Tabela 2 – Quantidade de Clones . . . . .	25
Tabela 3 – Dados dos 16 Clones . . . . .	27

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

NEA	<i>Near-Earth Asteroids</i>
NEO	<i>Near-Earth Objects</i>
PHO	<i>Potentially Hazardous Objects</i>
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
UA	Unidade Astronômica
UNESP	Universidade Estadual Paulista

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\alpha$	Letra Grega Alfa
$\beta$	Letra grega Beta
$\gamma$	Letra grega Gama
$e$	Excentricidade
$a$	Semieixo maior
$\Omega$	Longitude do nó ascendente
$\omega$	Argumento do Pericentro
$f$	Anomalia verdadeira
$\varpi$	Longitude do Pericentro
$\theta$	Longitude Verdadeira
$M$	Anomalias média
$E$	Anomalia excêntrica
$Ma$	Milhões de anos

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>11</b>
1.1	NEAs - <i>NEAR-EARTH ASTEROIDS</i>	11
1.1.1	Classificação	12
1.1.2	Origem	14
1.1.3	Composição	15
1.2	<i>SPACE WEATHERING</i> - ENVELHECIMENTO ESPACIAL	16
1.3	ASTEROIDE 162173 - RYUGU	17
<b>2</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>21</b>
2.1	CONDIÇÕES INICIAIS E INTEGRADOR NUMÉRICO	21
2.2	FILTRANDO OS DADOS - PROGRAMA PYTHON	23
2.3	CÁLCULO DA RADIAÇÃO ACUMULADA - PROGRAMA C	23
<b>3</b>	<b>EVOLUÇÃO ORBITAL</b>	<b>25</b>
<b>4</b>	<b>DISTÂNCIA DO SOL</b>	<b>28</b>
<b>5</b>	<b>EFEITO ACUMULATIVO</b>	<b>33</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>37</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>38</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os asteroides são corpos que orbitam o Sol, podendo receber diferentes classificações de acordo com suas características orbitais, físicas, químicas e mineralógicas. Por serem exemplares de objetos primordiais, podem contribuir no entendimento do processo da formação do Sistema Solar. Sabe-se que tão importante quanto o estudo da evolução dinâmica da órbita, está a caracterização da composição destes corpos.

Esta pesquisa visa contribuir para esta caracterização, levando-se em conta que a superfície de um asteroide pode ser modificada pela ação da radiação solar e que esta ação é dependente de sua evolução orbital. Tal efeito é conhecido como envelhecimento espacial (*space weathering*).

Iremos estudar o asteroide (162173) Ryugu em específico, porque recentemente a missão espacial Hayabusa2 retornou com amostras de sua superfície, na qual foi detectada a presença deste efeito.

Portanto, mostra-se interessante estudar a radiação solar recebida na superfície dos asteroides desde o momento em que eles se tornam um *Near-Earth Asteroid* (NEA) até o presente momento, de modo que se possa inferir o grau de envelhecimento espacial (*space weathering*) da superfície. Para tanto, pretende-se combinar dados observacionais reais com a evolução dinâmica passada destes corpos.

Então, por se tratar de um asteroide pertencente ao NEA, será feita uma revisão desse grupo de asteroides. Também será estudado o que é esse efeito de envelhecimento espacial, sendo abordados os dados do asteroide em específico, como suas características e os últimos dados coletados das amostras recebidas.

Por conseguinte, como queremos estudar a radiação que Ryugu recebeu, será mostrada, no Capítulo 2, toda a metodologia realizada para poder compreender sua evolução orbital e verificar sua órbita, possibilitando assim calcular a radiação.

No Capítulo 3, serão então discutidos os resultados obtidos dos estudos da evolução orbital. No Capítulo 4, discorre-se acerca da distância mínima que o asteroide chegou do Sol, para verificar se houve uma radiação extrema em um determinado instante. No Capítulo 5, será estudada a quantidade de radiação acumulada durante sua vida como NEA. Na Conclusão, serão colocados os resultados e as conclusões advindas destes.

### 1.1 NEAS - NEAR-EARTH ASTEROIDS

Os *Near-Earth Objects* (NEOs), como o nome diz, são os objetos próximos da Terra. Consistem em corpos astronômicos que estão em órbita perto da Terra, são os cometas (ativos e extintos), os asteroides e os corpos precursores do meteorito (GLADMAN; MICHEL; FROESCHLÉ, 2000)(BOTTKE et al., 2002)(BINZEL et al., 2002). Os NEOs compõem o grupo dos menores objetos observados no Sistema Solar e, como sua órbita é próxima da Terra, existe um potencial de se chocarem. Por isso, eles são bastante estudados. São também analisados por serem os remanescentes da formação do Sistema Solar.

Desta forma, como os NEOs compõem o grupo de corpos celestes que representa ameaça para a vida na Terra, existe um interesse para conhecer a quantidade de NEOs existentes. Também é

importante entender a composição e as características destes corpos, assim como compreender o processo que dá origem a eles e analisar como evoluem dinamicamente (ARAÚJO, 2011).

### 1.1.1 Classificação

Os NEAs podem ser classificados de acordo com suas formas, seus tamanhos e suas características orbitais e de rotação (SPACE STUDIES BOARD, 1998).

Em termos orbitais, pela mecânica clássica, sabe-se que o problema de dois corpos tem a solução analítica considerando o movimento relativo dos corpos, sendo um corpo com movimento elíptico e o outro situado em um dos focos da elipse. Como a maior parte da massa do Sistema Solar está localizada no Sol, é válido retratar que, aproximadamente, o movimento de todos os corpos ao redor do Sol estão se movendo em uma elipse, em que o Sol está no foco (MURRAY; DERMOTT, 1999).

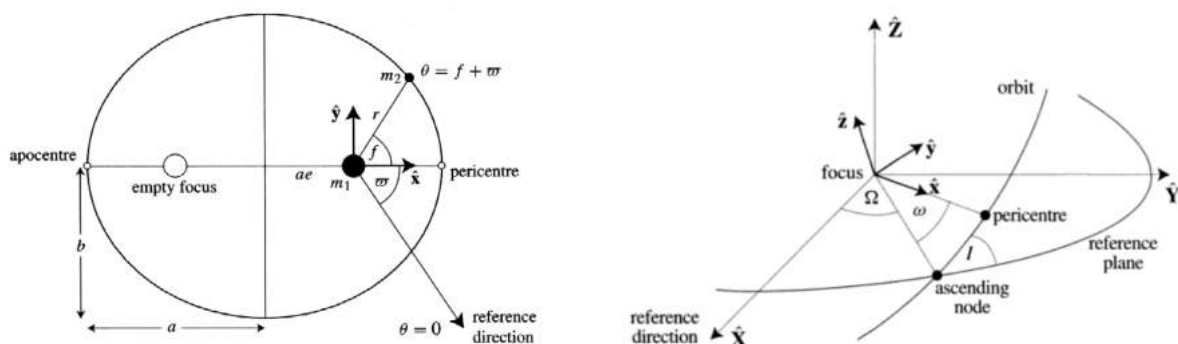
Uma órbita no espaço pode ser descrita, em princípio, por cinco parâmetros:

- Semieixo maior -  $a$ ;
- Excentricidade -  $e$ ;
- Longitude do nó ascendente -  $\Omega$ ;
- Argumento do Pericentro -  $\omega$ ;
- Anomalia verdadeira -  $f$ .

Adicionalmente pode-se considerar outros parâmetros derivados destes, como:

- Longitude do Pericentro -  $\varpi$ ;
- Longitude Verdadeira -  $\theta$ ;
- Anomalias média e excêntrica -  $M$  e  $E$

Figura 1 – Parâmetros Orbitais



Representação de uma órbita no plano (esquerda) e no espaço (direita) e os parâmetros orbitais

Fonte: (MURRAY; DERMOTT, 1999)

Com esses parâmetros, a distância do periélio pode ser escrita como  $q = a(1 - e)$  (menor distância entre a órbita e o Sol), e a distância do afélio, como  $Q = a(1 + e)$  (maior distância entre a órbita e o Sol). Observe-se que essas duas distâncias podem se relacionar:  $q = 2a - Q$ .

É possível agora classificar os NEOs, segundo a sua distância do Sol. Consistem em cometas e asteroides que possuem a distância do periélio de  $q < 1,3$  UA.

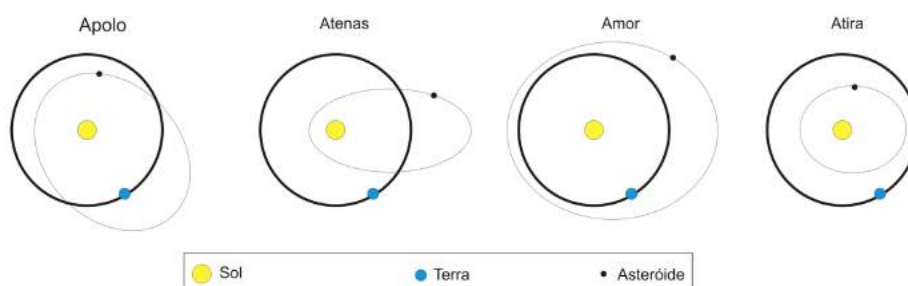
Os NEOs são divididos em dois grupos:

- *Near-Earth Comets* (NECs): são objetos nas proximidades da órbita da Terra com um núcleo rodeado por uma atmosfera tênue (coma). São cometas de curto período;
- *Near-Earth Asteroids* (NEAs): são objetos que podem cruzar, ou se aproximar, das órbitas da Terra. Eles são divididos em classes de acordo com suas características orbitais, [Figura 2](#), dadas especificamente pelo periélio ( $q$ ), pelo afélio ( $Q$ ) e pelo semieixo maior de suas respectivas órbitas:

- Apolo:  $a \geq 1$  UA e  $q \leq 1,0167$  UA;
- Atenas:  $a \leq 1$  UA e  $Q \geq 0,983$  UA;
- Amor:  $1,0167 < q \leq 1,3$  UA,  $a > 1,0$  UA;
- Atiras:  $a < 1$  UA e  $Q < 0,983$  UA.

Apolo e Atenas são chamados de cruzadores da Terra (*Earth-crossers*) e, como o nome diz, eles cruzam a órbita da Terra. Os do tipo Amor são chamados de quase cruzadores da Terra (*Nearly-Earth crossers*), eles quase cruzam com a órbita da Terra, mas podem evoluir em *Earth-crossers*, em períodos de tempo relativamente curtos ([BOTTKE et al., 2002](#)). Os Atiras são os NEAs que têm as órbitas inteiramente dentro da órbita da Terra, sem cruzá-las.

Figura 2 – Representação das órbitas de NEAs



Representação das órbitas de NEAs dos grupos apoli, Atenas, Amor, Atira

Fonte: [\(ARAUJO, 2011\)](#)

Como dito anteriormente, uma parcela dos NEOS apresenta riscos para a vida na Terra e, desta forma, eles também são classificados como objetos potencialmente perigosos, (*Potentially Hazardous Objects* - PHOs). Isso ocorre quando sua distância de intersecção mínima orbital (*minimum orbital intersection distance* - MOID) é menor que o da Terra, que é de 0,05 UA ([\(GRANVIK et al., 2018\)](#)).

Estatisticamente, os NEOs são compostos majoritariamente por NEAs. Logo, para se distinguir entre os NEAs e NECs, precisa-se identificar as regiões dominantes das quais se originam os objetos (BOTTKE et al., 2002). Desta forma, a próxima seção irá tratar sobre a suas origens.

### 1.1.2 Origem

Sabe-se que a idade do Sistema Solar é da ordem de bilhões de anos, mas o tempo de vida dos NEOs é muito mais curto. Segundo Gladman, Michel, Froeschlé (2000) mostraram que a vida média de uma amostra de um asteroide é de 10Ma. Assim, constata-se que a população dos NEOs atuais não é formada por corpos residuais que permaneceram orbitando entre os planetas internos desde o início do Sistema Solar, mas sim que vem sendo frequentemente reabastecida por corpos provenientes de outras regiões (ARAUJO, 2011)(BINZEL et al., 2002).

Um forte candidato para o realimento dos NEAs é a região do cinturão principal de asteroides, situado entre as órbitas de Marte e de Júpiter. Observe-se que estudos realizados por Binzel et al.(2002) comparando um asteroide do NEOs e um similar do cinturão principal sugerem que as propriedades físicas (por exemplo, estados de rotação, configurações, cores espectrais, dispersão de superfície) do NEOs podem ser representativas do cinturão principal de asteroides.

Outro estudo sobre o tema foi realizado por Bottke et al. (2002) e observaram-se outras fontes da população NEO, além do cinturão principal: a população de asteroides troianos de Júpiter, a região transneptuniana e a nuvem de Oort.

No passado, não havia muitos estudos sobre objetos que migravam do cinturão principal para as proximidades da Terra. Um tempo depois, iniciaram-se estudos que indicavam que as ações de ressonâncias podem levar asteroides do cinturão principal a ter órbitas que cruzam planetas. Após várias pesquisas, segundo Morbidelli et al. (2002) e Bottke et al. (2002), foi constatado que para os asteroides se tornarem cruzadores dos planetas terrestres, precisa-se aumentar a excentricidade orbital sob a ação de uma variedade de fenômenos ressonantes.

Desta forma, pressupõe-se que, constantemente, ações colisionais no cinturão principal fragmentam grandes asteroides e, por um combinação de força termal de Yarkovsky e outras ressonâncias, estas fazem com que eles sejam introduzidos dentro da região dos NEAs(MORBIDELLI et al., 2002).

Entre essas forças e ressonâncias, duas são as mais conhecidas:

- A ressonância de movimento médio 3:1 com Júpiter, que ocorre quando o período do objeto é um terço do período de Júpiter, e sua largura é uma função crescente da excentricidade. Ela acontece em  $\pm 2,5$ UA. O objeto se torna um cruzador da órbita da Terra por volta de 1 Ma e seu tempo de vida médio é de 2 Ma. O estado final do objeto é ser ejetado do Sistema Solar ( $\sim 28\%$ ) ou uma colisão com o Sol ( $\sim 70\%$ ) (BOTTKE et al., 2002).
- A ressonância de movimento secular  $\nu_6$ , que define o limite do cinturão principal interno e é alimentado pelo material adjacente a este limite. Os asteroides nessa configuração fazem movimentos ressonantes aos de Saturno, o que significa que a frequência associada com o período de revolução do pericentro dos asteroides é igual à frequência de precessão do pericentro do planeta. Análises realizadas mostram que os asteroides do cinturão principal que entram



na ressonância secular  $\nu_6$  atingem as órbitas que cruzam a Terra em  $\sim 0,5$ Ma e a vida média dinâmica dos corpos iniciados na ressonância secular  $\nu_6$  é de  $\sim 2$ Ma. O estado final do objeto é ser ejetado do Sistema Solar ( $\sim 12\%$ ) ou colisão com o Sol ( $\sim 80\%$ ) (MORBIDELLI et al., 2002) (BOTTKE et al., 2002).

Quando o asteroide tem encontros próximos dos planetas rochosos, esses encontros perturbam a órbita dos asteroides, mudando o estado do seu spin, aumentando ou diminuindo seu momento angular, o que resulta em um novo estado de rotação e em uma órbita caótica (ARAUJO; WINTER, 2014) (GLADMAN; MICHEL; FROESCHLÉ, 2000).

### 1.1.3 Composição

Outra característica importante dos NEOs é sua composição, uma vez que muitos corpos mantêm características primordiais. Assim, os estudos de classificação visam entender as variações composicionais, compreendendo também sua origem e evolução (SPACE STUDIES BOARD, 1998). Consequentemente, esse é um campo de pesquisa atual em que se estuda a interação geral da superfície de pequenos corpos com o meio ambiente do Sistema Solar.

A população dos NEOs também pode ser dividida de acordo com seu espectro:

- Os tipos C: São meteoritos condritos carbonáceos, são os asteroides do tipo mais conhecidos, cerca de três quartos dos asteroides. Os asteroides de classe C são bastante escuros e do tipo não reflexivo de asteroide.
- Os tipos S: São os meteoritos rochosos, cerca de 17% dos asteroides são desse tipo. Têm um brilho moderado, são do tipo ligeiramente avermelhado e acredita-se serem compostos por minerais de silicato
- Os tipos M: São os meteoritos de ferro. Asteroides moderadamente brilhantes e reflexivos, compostos sobretudo de ferro metálico e níquel. É o terceiro grupo mais populoso.

Para entender a composição e a estrutura fina de um asteroide, estuda-se seu albedo, sua reflexão espectral e sua densidade. As análises de determinações químicas e composições mineralógicas dos NEOs nos fornecem restrições em sua formação e evolução (SPACE STUDIES BOARD, 1998).

Algumas características dos asteroides, como tamanho, rotação, rugosidade e composição, são estudadas por diversos aparelhos e modos. O tamanho de um asteroide é melhor determinado medindo as densidades de fluxo de infravermelho térmico e visível. Se for somente por observações visíveis, o diâmetro pode ser calculado a partir de um albedo assumido com base na classificação espectral.

Já a sua rotação é definida por repetidas observações em um único comprimento de onda, as quais fornecem uma curva de luz a partir da qual a taxa de rotação do objeto pode ser obtida. Para informações, como a forma do objeto ser esférico ou alongado, acopla-se a observações de radar ou infravermelho térmico.

Para o estudo de sua rugosidade e a forma da superfície, é utilizado um radar. Para a composição da superfície, são necessárias observações espectrofotométricas ou espectroscópicas na faixa de 0,3 a

2,5 microns. Com uma resolução mais alta, a composição mineralógica pode ser obtida para certas classes de asteroides.

Os asteroides do tipo C são vistos entre a população dos NEOs, mas os objetos mais comuns entre os NEOs são do espectro tipo S. Esses asteroides apresentam um grande conjunto de propriedades e os que se aproximam da Terra podem ajudar na compreensão da evolução térmica do asteroide e da estrutura de acréscimo. Há evidências que sugerem que o envelhecimento espacial (é um tipo de alteração ótica devida à exposição ao ambiente espacial e ao choque) modificou as propriedades espectrais das superfícies dos asteroides, camuflando suas verdadeiras composições. Esses aspectos do envelhecimento espacial podem ser determinados pela fotometria multiangular e por medições de infravermelho térmico (SPACE STUDIES BOARD, 1998).

O envelhecimento espacial também é conhecido pela exposição da superfície do asteroide à luz solar e ao vento solar, que causam mudanças em sua assinatura espectral ao longo do tempo. Esse estudo do envelhecimento de exposição de longo prazo ao espaço é interessante para a determinação de vínculo entre asteroide e meteorito (SPACE STUDIES BOARD, 1998).

Segundo Binzel et al. (2002) acredita-se que os NEOs menores do tipo S possuem propriedades espectrais pendendo cada vez mais para tipos de meteoritos condritos comuns frescos, o que é coerente com o evento do processo de envelhecimento espacial. Acredita-se que também há uma explicação dependendo do tamanho, em que NEOs menores têm superfícies mais jovens e frescas que não foram sujeitas a possíveis efeitos de envelhecimento espacial.

Nas recentes décadas, houve um avanço na compreensão do envelhecimento, entretanto ainda falta um entendimento mais completo desse processo e da velocidade com que isso ocorre.

## 1.2 SPACE WEATHERING - ENVELHECIMENTO ESPACIAL

Como visto anteriormente, os NEAs possuem uma grande variedade de propriedades físicas e dinâmicas, e estão sujeitos a encontros planetários, fortes ventos solares e efeito da radiação. Desta forma, é importante estudar os processos de superfície, porque podem levar à compreensão da origem e da evolução de objetos do Sistema Solar (MADEY; JOHNSON; ORLANDO, 2002).

Os objetos do Sistema Solar são bombardeados repetidamente por ventos solares, raios cósmicos galácticos e extragalácticos. Esses objetos absorvem essas energias, na qual a maior fonte é a radiação de fótons solares, que se encontram na forma de fótons no infravermelho e visível, causando aquecimento em sua superfície e até induzindo quimicamente o desequilíbrio nas superfícies expostas ao ambiente (MADEY; JOHNSON; ORLANDO, 2002).

Esse processo, associado à exposição direta ao ambiente espacial, é conhecido como envelhecimento espacial (*space weathering*). Esse efeito inclui processos de impactos (choque, fragmentação, aquecimento, vaporização, entre outros), alterações morfológicas, danos por radiação e efeitos do vento solar na superfície de um corpo do Sistema Solar sem atmosfera (CHAPMAN, 2004)(SHESTOPALOV; GOLUBEVA; CLOUTIS, 2013).

Diversas perguntas sobre esse efeito nos objetos ainda não foram respondidas, como, por exemplo, como esses corpos interagem com o ambiente externo e quais físicas são importantes para sua própria evolução e estrutura. Não há um entendimento por completo sobre esse processo e nem a

velocidade com que isso ocorre. Portanto, é importante estudar as características dinâmicas e físicas dos NEAs, para entender sua evolução orbital, suas perturbações gravitacionais com os planetas e outros fenômenos, incluindo o envelhecimento espacial (POPESCU et al., 2019).

Foi realizado testes em laboratório sobre asteroides do cinturão principal no qual seus espectros não corresponderam com os espectros de meteoritos comuns, no qual ocorreu o processo de envelhecimento espacial ao longo do tempo, devido ao vento solar e os impactos de micrometeoritos, modificando as propriedades ópticas da superfície desses asteroides (NESVORNÝ et al., 2010). Acridata-se que os objetos que sofreram uma grande quantidade de envelhecimento são os asteroides do tipo S, Sq e condritos comuns por terem sido expostos ao ambiente espacial por um período de tempo maior (CHAPMAN, 2004) (BINZEL et al., 2010).

O envelhecimento espacial afeta propriedades espectrofotométricas dos asteroides, dependendo de sua órbita, da idade e das propriedades físicas dos materiais de sua superfície. Um papel dominante nesse espaço interplanetário é a alteração pelo bombardeio de radiação (MADEY; JOHNSON; ORLANDO, 2002).

Esses eventos são observáveis usando telescópios terrestres, orbitais e espaçonaves. Também foi demonstrado que a inclinação espectral do asteroide pode fornecer informações sobre o grau de envelhecimento espacial (DELL'ORO; MARCHI; PAOLICCHI, 2011). Onde um efeito mais longo e/ou mais intenso do envelhecimento espacial corresponde a um espectro avermelhado, no qual a inclinação espectral aumenta. Estudos da superfície de dessorção térmica de átomos e moléculas de superfície de óxidos e de dessorção de gases condensados podem fornecer também informações sobre o efeito de envelhecimento espacial (DELL'ORO; MARCHI; PAOLICCHI, 2011).

Os processos de envelhecimento podem ser afetados pelas colisões, nos quais pode ocorrer re-accumulação do material ejetado por conta do impacto e, desta forma, o avermelhamento espectral diminui (DELL'ORO; MARCHI; PAOLICCHI, 2011). Esse efeito de 'refrescar' espectralmente a superfície é conhecido como *resurfacing* (DELL'ORO; MARCHI; PAOLICCHI, 2011). Esse efeito pode ocorrer também por conta de encontros planetários, revigorando as superfícies dos asteroides mais rapidamente do que o envelhecimento pode alterá-la (BINZEL et al., 2010).

Experimentos mostraram que o tempo que os efeitos ópticos de envelhecimento espacial de um condrito comum, para este se assemelhar à forma espectral geral de um asteroide tipo S, é cerca de  $\sim 10^6$  anos (BINZEL et al., 2010). Já para Nesvorny et al. (2010), a escala de tempo do envelhecimento espacial é maior que  $\sim 0,1$  Ma e menor que  $\sim 10$  Ma .

A intensidade do processo do envelhecimento espacial depende da distância heliocêntrica e dos efeitos ópticos das propriedades químicas e físicas das superfícies planetária (SHESTOPALOV; GOLUBEVA; CLOUTIS, 2013). Neste trabalho, iremos considerar o envelhecimento espacial como sendo a radiação solar recebida no asteroide.

### 1.3 ASTEROIDE 162173 - RYUGU

O asteroide 1999 *JU*<sub>3</sub>, conhecido como (162173) Ryugu, foi o alvo da missão de retorno de amostra da Hayabusa2 da Agência de Exploração Aeroespacial Japonesa, que foi lançada em 3 de Dezembro de 2014 e chegou em Ryugu em 27 de Junho de 2018. Foram publicadas recentemente algumas análises

realizadas sobre a superfície do asteroide. E, nesse estudo, foi observado que pode ter ocorrido o fenômeno *space weathering*, em que ocorre uma mudança espectral da superfície devida a diversos fatores. Desta forma, este asteroide foi escolhido como nosso objeto de estudo, com o objetivo de verificar se sua evolução orbital passada favorece os efeitos da radiação solar recebida, levando às alterações observadas em sua superfície, averiguar se houve alguma aproximação muito expressiva do Sol, analisar se o fenômeno *space weathering* foi devido ao acúmulo da radiação ao longo de sua vida ou à composição das duas coisas.

Ryugu é classificado como um asteroide potencialmente perigoso. Seu espectro visível e infravermelho próximo do asteroide indicam que é um asteroide do tipo C. Esse tipo de classe está presente no cinturão principal (dentro de 2,5 UA) e pressupõe-se que sejam remanescentes primitivos do sistema solar (CAMPINS et al., 2013). Contudo, como Ryugu tem um diâmetro de  $\sim 1$  km, é improvável que ele seja um objeto primordial, porque asteroides pequenos têm sua vida de colisão muito mais curta que a idade do Sistema Solar. Desta forma, Ryugu deve ser um fragmento de um objeto maior.

Os elementos orbitais de Ryugu são:

Tabela 1 – Elementos Orbitais de Ryugu na época 2455800.5 (27 de Agosto de 2011)

Distância do Afélio	1,4161 ua
Distância do Perihélio	0,9633 ua
Semieixo maior	1,1897 ua
Excentricidade	0,1903
Inclinação	5,88°
Período Orbital	1,3 anos
Anomalia Média	282,72°
Longitude do nodo Ascendente	251,62°
Argumento de Periélio	211,42°

Fonte: Elaborado pelo autor. Referência: (CAMPINS et al., 2013)

Sua origem mais provável, dentro do cinturão principal, é a região entre 2,15 e 2,5 UA e com inclinação inferior a 12°. A população de origem mais provável é um fundo de asteroide de baixo albedo (CAMPINS et al., 2013).

Segundo Campins et al. (2013) e Michel, Delbo (2010), a sua fonte mais provável é o escape do cinturão principal com a ação da ressonância  $\nu_6$ . Campins et al. (2013) verificou que sua rotação deve ser retrógrada, o que corrobora com o spin atual de Ryugu. A vida média de Ryugu é de aproximadamente 40 Ma e seu destino mais provável é a colisão com o Sol (MICHEL; DELBO, 2010).

Nas seções anteriores, foi visto que uma grande parcela da população dos NEAs pode ter sofrido a ação da radiação solar devido a baixas distâncias do periélio, o que pode alterar as propriedades primitivas de suas superfícies. Desta forma, conhecer seu comportamento dinâmico é muito importante, pois pode nos dizer por quanto tempo o objeto pode ter passado em algumas distâncias do periélio. Esse aspecto da evolução orbital do Ryugu será discutida no capítulo seguinte. Além do envelhecimento espacial, pode ocorrer também, como visto anteriormente, a renovação do regolito (*resurfacing*), que pode ser causada por diferentes processos, como agitação sísmica e/ou crateras de impacto, nos quais se reduz o tempo total a que os materiais ficam expostos. Assim, uma amostra coletada terá componentes inalterados, somente se vier de profundidade de apenas 3 a 5 cm (MICHEL; DELBO, 2010).

Michel, Delbo (2010) também verificou que o tempo em que o Ryugu ficou em pequenas distâncias do periélio é de, no máximo, 8 Ma em uma distância de 1 ua, e cerca de 1,4 Ma em distância abaixo de 0,5 ua. Ele diz que, com isso, a missão de retorno de amostras desse asteroide é coletar material inalterado termicamente. Entretanto, foi verificado, mais tarde, com a real coleta de amostra da missão de Hayabusa2, que a superfície foi sim alterada. Isto será discutido adiante.

A seguir, será discutido sobre as amostras coletadas de Ryugu pela missão Hayabusa2, que foram recolhidas em 21 de Fevereiro de 2019 (MOROTA et al., 2020).

Averiguou-se que Ryugu é um objeto carbonáceo (tipo C) primitivo, que contém minerais hidratados e moléculas orgânicas. Constatou-se também que a variação das colorações latitudinais do asteroide sugere que o avermelhamento do material da superfície exposta foi causado por aquecimento solar e/ou envelhecimento espacial (MOROTA et al., 2020).

Observações feitas indicaram que o asteroide tem uma forma e uma estrutura de *rodopile*. Em sua superfície, foi verificado que há dois tipos distintos de material com cores diferente, material mais azulado distribuído na crista equatorial e nas regiões polares, e material mais avermelhado nas regiões de latitude média. Entretanto, as causas dessas variações não são compreendidas (MOROTA et al., 2020).

As observações realizadas são compatíveis com a interpretação de que as rochas de Ryugu são originalmente mais azuis e, com os processos metamórficos de superfície, produziu materiais mais vermelhos, com o envelhecimento espacial, o metamorfismo térmico por aquecimento solar e/ou a pulverização por pequenos impactos. Notou-se que as crateras detectadas com material mais vermelho indicam que ocorreu em um curto período de tempo. Assim foi sugerido que Ryugu vivenciou anteriormente uma aproximação com o Sol (MOROTA et al., 2020).

Verificou-se que as crateras mais jovens são espectralmente mais azuis que seus arredores e que os materiais mais vermelhos estavam cobrindo os materiais mais azuis. E, em contrapartida, as crateras mais antigas tendem a ter interiores mais vermelhos e a cor do interior dessas crateras é semelhante à dos materiais circundantes. Essas variações de cor podem ser explicadas por relações estratigráficas, ou seja: as crateras mais avermelhadas formaram-se antes de o avermelhamento da superfície ocorrer, enquanto as crateras mais azuis foram formadas após o avermelhamento da superfície e os materiais azuis subjacentes foram expostos pelos impactos (MOROTA et al., 2020).

Observou-se que o material exposto ao espaço causou o avermelhamento e perda de massa das regiões do equador e polares de altitude média, expondo materiais frescos e mais azuis do subsolo, enquanto a região polar revela espectros mais azuis do que a crista equatorial, sugerindo que o processo de avermelhamento depende da iluminação do Sol (MOROTA et al., 2020).

Constatou-se que o avermelhamento da superfície não esteve ativo ao longo de toda a história de Ryugu e sim ocorreu principalmente após a formação de crateras mais vermelhas e antes da formação de crateras mais azuis. E, ainda, que a escala de tempo para o avermelhamento da superfície é maior que o ressurgimento (*resurfacing*) (MOROTA et al., 2020).

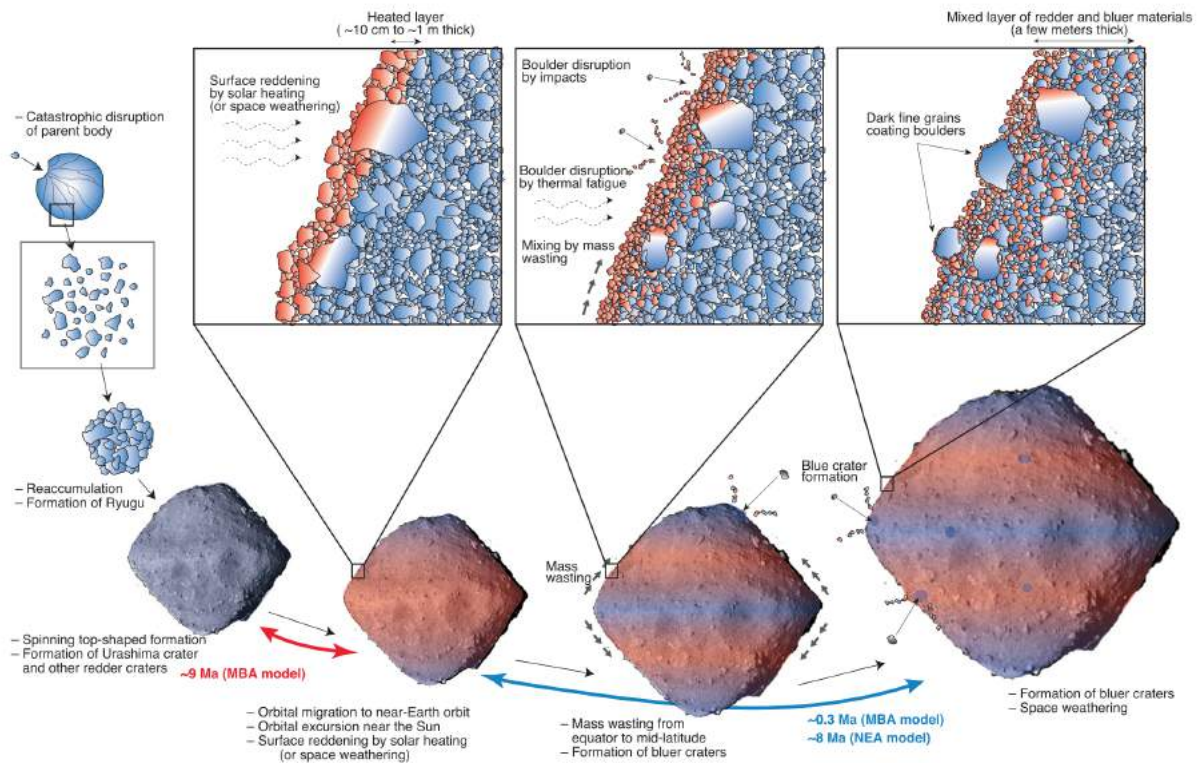
Como não são vistas muitas crateras (< 100m de diâmetro) em sua superfície, sugere-se que ocorreu um processo de apagamento de crateras, o (*resurfacing*) (MOROTA et al., 2020).

Foi estimado que o tempo entre a formação de Ryugu e o evento de avermelhamento da superfície é

de 8,5 Ma. Isso é muito mais jovem do que o tempo de separação dos asteróides pais candidatos, Eulalia e Polana [várias centenas de Ma a  $\sim 1$ Ga (bilhões de anos)], o que sugere que Ryugu é o produto de mais de uma geração de rupturas do corpo dos pais e/ou de processos globais de recapeamento. A sua forma atual de *rodopile* deve ter se formado há mais de 8,5 Ma (MOROTA et al., 2020).

Foram estimados os limites de idade superior e inferior no evento de avermelhamento da superfície, que são  $\sim 8$ Ma e  $\sim 0,3$ Ma, respectivamente. Sugeriu-se que o avermelhamento da superfície ocorreu depois que sua órbita mudou do cinturão principal para sua órbita, próximo à Terra (MOROTA et al., 2020).

Figura 3 – Ilustração esquemática da evolução de Ryugu por (MOROTA et al., 2020)



Evolução do asteroide Ryugu. Desde a fragmentação e a reacumulação, formação das crateras, começo do avermelhamento pelo aquecimento solar ou envelhecimento espacial, e formação de crateras azuis.

Fonte: (MOROTA et al., 2020)

## 2 METODOLOGIA

O objetivo do trabalho é associar a quantidade de radiação recebida pelo asteroide Ryugu, durante seu tempo de vida como NEA e com sua evolução dinâmica no passado. Portanto, o problema proposto nesta pesquisa foi abordado por meio de integrações numéricas de problemas de N-corpos, em que foram levados em consideração os campos gravitacionais do Sol, dos planetas e de uma amostra significativa de asteroides, estes assumidos como partículas sem massa.

Como queremos computar o efeito da radiação desde o momento em que o asteroide se tornou um NEA até sua órbita atual, as integrações numéricas começaram com um conjunto de condições iniciais, dados em uma região específica dentro do cinturão principal de asteroides, localizado entre as órbitas de Marte e de Júpiter. Campins et al. (2013) mostraram que Ryugu provavelmente se originou do cinturão principal de asteroide devido à ação da ressonância secular  $\nu_6$ .

Desta forma, o método adotado consistiu em integrar numericamente no tempo as órbitas das partículas testes partindo da vizinhança da ressonância  $\nu_6$  e no monitoramento daquelas que atingiram, em um dado instante, a órbita atual aproximada do asteroide Ryugu. Assim, será possível fazer uma análise estatística do passado orbital deste corpo.

Para que tudo isso seja realizado, foi utilizado o integrador Mercury (CHAMBERS, 1999), cujas rotinas computacionais foram adaptadas visando registrar a distância do asteroide ao Sol ao longo do tempo e o conseqüente cálculo da radiação na superfície do corpo, explicados neste capítulo.

Assim, os resultados destas interações serão analisados após serem convertidos em termos de radiação acumulada ao longo de vida do NEA, sendo então, em seguida, os resultados confrontados com os dados reais de observações.

### 2.1 CONDIÇÕES INICIAIS E INTEGRADOR NUMÉRICO

Para esta pesquisa, foi empregado o integrador Mercury, que é um pacote de software de propósito geral para fazer integrações de N-corpos. Ele é projetado para calcular a evolução orbital de objetos que se movem no campo gravitacional de um grande corpo central.

Neste trabalho, o Mercury foi utilizado para simular o movimento de um asteroide orbitando o Sol. No entanto, ele também pode ser usado para simular o movimento dos planetas e cometas orbitando o Sol; ou um sistema de luas orbitando um planeta; ou um sistema planetário orbitando outra estrela. Este software consiste em vários drivers e sub-rotinas, juntamente com uma série de arquivos de entrada que podem ser alterados, adequando-se ao usuário.

Nestes modelos, só foi considerado o efeito gravitacional, outros efeitos não foi levado em consideração. Não foi considerado também a perturbação da Lua.

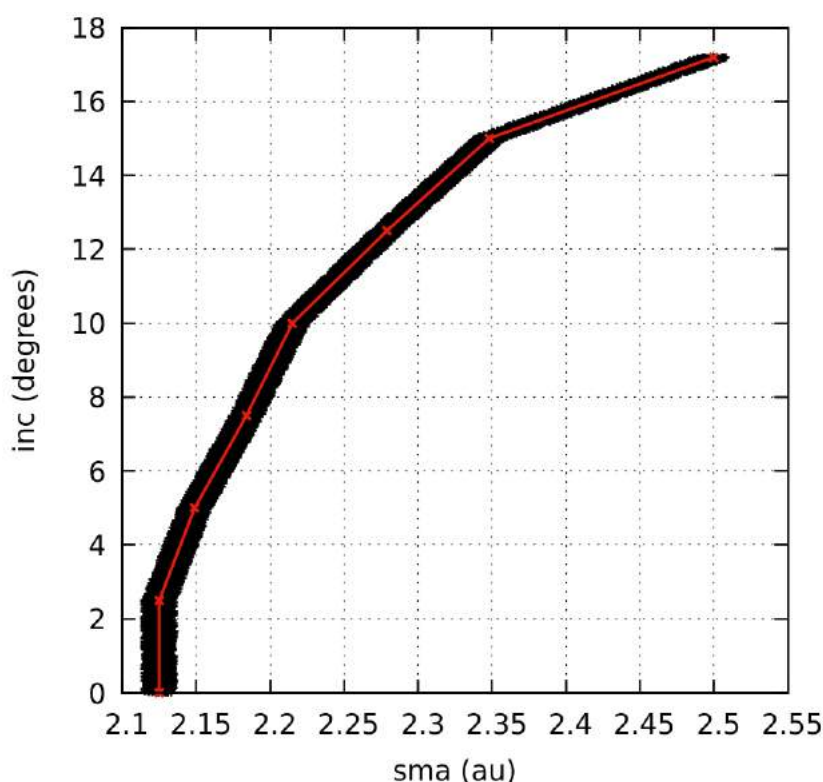
Como condições iniciais, primeiramente foram pesquisados os elementos orbitais: semieixo maior,  $a$ , excentricidade,  $e$ , inclinação,  $i$ , argumento do pericentro,  $\omega$ , longitude do nó ascendente  $\Omega$ , e anomalia média,  $M$ , dos planetas do Sistema Solar: Mercúrio, Vênus, Terra, Marte, Júpiter, Saturno, Urano e Netuno, em que esses elementos, com os respectivos planetas, foram colocados no arquivo de entrada do Mercury big.in. Estes elementos foram obtidos para uma mesma época -

58849MJD (01 de janeiro de 2020) - e foram coletados no site da NASA (NASA, 2020. Disponível em: <http://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi>. Acesso em: 15 jan. 2020).

Outra condição inicial é o próprio asteroide Ryugu. Mostrou-se que o Ryugu provavelmente se encontrava no cinturão principal interno e sofreu a ação da ressonância secular  $\nu_6$ , alcançando sua órbita atual. Desta forma, foi escolhido um grupo de 7.000 clones, inicialmente no cinturão principal interno, na região sob a influência da ressonância  $\nu_6$ . As órbitas destes clones foram integradas para o futuro por 100 milhões de anos, a fim de verificar quais deles chegariam na região atual em que se encontra o Ryugu.

Os clones foram distribuídos na vizinhança da ressonância  $\nu_6$ , sendo ela dividida em sete regiões. Na qual, cada região recebeu 1.000 clones, onde sua inclinação e semi eixo maior foi distribuídos aleatoriamente em um intervalo de até  $\Delta_a = +/ - 0,01\text{UA}$  e excentricidade igual a 0,01, como visto na figura [Figura 4](#).

Figura 4 – Condições iniciais - Ressonância secular  $\nu_6$



Condições iniciais de 7000 clones (pontos pretos) na vizinhança da ressonância  $\nu_6$  (linha vermelha). De acordo com Bottke et. al (2015), asteroides do cinturão principal com  $e=0,01$  e dentro dos seguintes limites em (a,i) devem atingir a região dos planetas terrestres: R1 (2,125 ua, 2,5°), R2 (2,149 ua, 5°), R3 (2,184 ua, 7,5°), R4 (2,215 ua, 10°), R5 (2,279 ua, 12,5°), R6 (2,348 ua, 15°) e R7 (2,5 ua, 17,2°).

Fonte: Elaborado pelo autor

Essas informações dos clones, como semieixo maior, excentricidade, inclinação, longitude do nodo ascendente, argumento do pericentro e anomalia média, foram colocadas no arquivo small.in.

Outro arquivo alterado foi o dos parâmetros, o param.in, em que foram ajustados os parâmetros necessários para poder realizar a integração, com o passo de integração para 10 dias, passo de saída de 2.000 dias, tempo total da Integração de 100 milhões de anos, distância de ejeção de 35 ua (além de Netuno), colisão para o raio físico dos corpos (planeta e Sol). Também foi alterado o element.in, em



que foram colocados os pontos de saída que desejamos, como o semieixo maior, a excentricidade, a inclinação e a distância ao Sol de todos os clones e planetas.

Após essas modificações de cada arquivo, foram divididas as sete regiões contendo 7.000 clones como sendo sete pastas, cada pasta foi dividida em outras 10 subpastas, em que cada subpasta contém 100 clones. Desta forma, foi inserido em cada subpasta, o conjunto de arquivos do pacote Mercury. Em seguida, foi colocado para rodar o algoritmo híbrido mapa simplético/Bulirsch-Stoer do Mercury, em que demorou por volta de dois dias cada subpasta para ser completamente integrado. Desse modo, ele irá gerar um arquivo com os dados necessários para poder rodar o algoritmo element6.for. Esse arquivo demorou em torno de três horas para ser rodado e gerou a evolução orbital de cada clone. Portanto, quando concluído, foi preciso verificar quais clones alcançaram a órbita desejada. Tudo demorou em torno de 1 mês para ser rodado.

Desta forma, foi desenvolvido um programa escrito em Python para analisar, após as integrações, quais clones atingiram a órbita de Ryugu. e também um programa em C para calcular a radiação acumulada.

## 2.2 FILTRANDO OS DADOS - PROGRAMA PYTHON

Com a evolução orbital de cada clone em mãos, podemos verificar quais deles alcançaram a órbita desejada. Para que isso seja realizado, foi elaborado uma rotina na linguagem Python para rodar todos os clones e separar aqueles que tiveram êxito.

Os elementos orbitais atuais de Ryugu são: semieixo maior - 1,189 ua, excentricidade - 0,190 e inclinação - 5,883° (NASA Horizons (NASA, 2020. Disponível em: <http://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi> Acesso em: 15 jan. 2020) para época - 58849MJD - 01 de janeiro de 2020).

O programa foi então composto por comandos que filtram os dados em três conjuntos de intervalo, na vizinhança da órbita de Ryugu: um grande, que abrange o semieixo maior de 1,13 a 1,25 UA, a excentricidade de 0,13 a 0,25 e a inclinação de 5,3 a 6,5 graus. O médio, que abrange o semieixo maior de 1,17 a 1,21 UA, a excentricidade de 0,17 a 0,21 e a inclinação de 5,7 a 6,1 graus. E um pequeno, que abrange o semieixo maior de 1,18 a 1,20 UA, a excentricidade de 0,18 a 0,20 e a inclinação de 5,8 a 6,0 graus. A **Figura 5** mostra a sequência de comandos deste programa.

Após analisar quais clones atingiram a órbita desejada, foram gerados gráficos dos que entraram no intervalo pequeno, de  $r \times t$  (Distância ao Sol versus Tempo). Os gráficos foram realizados com o programa Gnuplot e serão discutidos no Capítulo 4.

## 2.3 CÁLCULO DA RADIAÇÃO ACUMULADA - PROGRAMA C

A fim de saber a radiação acumulada que cada clone recebeu, foi elaborado um programa em linguagem C que computa a somatória de  $1/r^2$  em relação ao tempo decorrido até sair da órbita atual do Ryugu. Esses dados foram utilizados para gerar gráficos, de somatória  $1/r^2$  versus tempo, feitos pelo programa Gnuplot, e serão discutidos no Capítulo 5. A **Figura 6** mostra a sequência de comandos deste programa.

Todos estes programas e rotinas foram executados em um servidor da FEG-UNESP.

Figura 5 – Sequência de Comandos Python

```

import numpy as np
totalFiles = 100

t = np.loadtxt(str(i+1)+'.aei', usecols=0,unpack=False)
a = np.loadtxt(str(i+1)+'.aei', usecols=1,unpack=False)
e = np.loadtxt(str(i+1)+'.aei', usecols=2,unpack=False)
incli = np.loadtxt(str(i+1)+'.aei', usecols=3,unpack=False)
d = np.loadtxt(str(i+1)+'.aei', usecols=4,unpack=False)

outputFilep = open('outMillena/pequeno_'+str(i+1)+'.dat','w')
outputFilem = open('outMillena/medio_'+str(i+1)+'.dat','w')
outputFileg = open('outMillena/grande_'+str(i+1)+'.dat','w')

for j in range(len(t)):
    # Intervalo pequeno
    if ((a[j] >= 1.18 and a[j]<=1.20) and (e[j]>=0.18 and e[j]<=0.20) and (incli[j]>=5.8 and incli[j]<=6.0)):
        outputFilep.write("%10f %10f %10f %10f %10f\n" % (t[j], a[j], e[j], incli[j], d[j]))

    # Intervalo médio
    elif ((a[j] >= 1.17 and a[j]<=1.21) and (e[j]>=0.17 and e[j]<=0.21) and (incli[j]>=5.7 and incli[j]<=6.1)):
        outputFilem.write("%10f %10f %10f %10f %10f\n" % (t[j], a[j], e[j], incli[j], d[j]))

    #Intervalo grande
    elif ((a[j] >= 1.13 and a[j]<=1.25) and (e[j]>=0.13 and e[j]<=0.25) and (incli[j]>=5.3 and incli[j]<=6.5)):
        outputFileg.write("%10f %10f %10f %10f %10f\n" % (t[j], a[j], e[j], incli[j], d[j]))

```

Sequência de comandos para selecionar os Clones que entraram nas regiões desejadas.

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 6 – Sequência de Comandos C

```

#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>

int main(){
    FILE *fp, *fout;
    float dis, tempo, semi, excen, incli;
    float soma = 0;
    float inv = 0;
    int i = 0;
    char s[100];
    char name[100];

    printf("\n \n \t Digite o nome do arquivo que deseja analisar:");
    scanf("%s", s);

    if((fp=fopen(s, "r"))==NULL){
        printf("Impossivel abrir o arquivo %s \n", s);
        exit(1);
    }

    fout=fopen("Distancia.dat", "w");

    while(fscanf(fp,"%f%f%f%f", &tempo, &semi, &excen, &incli, &dis)!=EOF){

        inv = 1/pow(dis, 2);
        soma += inv;

        if(soma != 0){
            i++;
            fprintf(fout, "%f \t %.10f \t %.10f\n", tempo, inv, soma);
        }
        inv = 0;
    }

    fclose(fout);
    fclose(fp);
}

```

Sequência de comandos para calcular a soma do  $1/r^2$ , que significa a parcela da radiação total.

Fonte: Elaborado pelo autor

### 3 EVOLUÇÃO ORBITAL

Como explicado no capítulo anterior, usamos um modelo dinâmico da população dos NEAs para estimar a evolução orbital desses objetos. Foram criados 7.000 clones na vizinhança da ressonância secular  $\nu_6$ . As órbitas destes clones foram integradas para frente por 100 milhões de anos, para verificar qual deles alcançaram a órbita atual de Ryugu. Foi visto que sua vida orbital média é de  $\sim 40$ Ma.

Com as integrações realizadas, foi utilizado o programa Python (Figura 5) para se verificar quais dos clones obtiveram êxito na chegada mais próxima da órbita atual de Ryugu. N programa foi dividido em três regiões, delta grande ( $\delta_1$ ), delta médio ( $\delta_2$ ) e o delta pequeno ( $\delta_3$ ). Na tabela a seguir (Tabela 2) verifica-se quantos clones entrou em cada delta.

Tabela 2 – Quantidade de Clones

	Região 1	Região 2	Região 3	Região 4	Região 5	Região 6	Região 7	Total
$\delta_1$	12	8	11	4	0	0	1	36
$\delta_2$	9	7	2	1	0	0	0	19
$\delta_3$	10	2	1	3	0	0	0	16
Total	31	17	14	8	0	0	1	71

Fonte: Elaborado pelo autor

Irá ser estudado somente os clones que entraram no  $\delta_3$ , porque são eles que chegaram mais próximo da órbita atual de Ryugu.

Analisando a tabela 2, entraram nos deltas somente os da região 1,2,3,4 e 7. No qual somente 16 clones entraram no  $\delta_3$ .

Na região 1, dos 1000 clones, entraram 10 no  $\delta_3$ , que representa 1% dos clones. Na região 2, dos 1000 clones, entraram 2 no  $\delta_3$ , representando 0,2% . Na região 3, dos 1.000 clones, entraram 1 no  $\delta_3$ , que representa 0,1%. E na região 4, dos 1.000 clones, entraram 3 no  $\delta_3$ , que representa 0,3%. Vê-se então que a maior incidencia de clones que chegou próximo a órbita de Ryugu doi os da região 1. Constata-se que nenhum clone entrou nas regiões 5, 6 e 7 no  $\delta_3$ , porque como visto anteriormente a inclinação inicial mais provavel é abaixo dos  $12^\circ$ , sendo a região 5 começa por volta de  $11^\circ$ , a 6 por de  $12,5^\circ$  e a 7 por volta de  $15^\circ$ , corroborando com as análises realizadas.

Analisando esses objetos, podemos estimar o passado orbital do verdadeiro asteroide Ryugu. Portanto, foi feito uma tabela (3) que apresenta todas as informações importantes desses 16 clones. Vide abaixo.

A tabela 3 exhibe as condições iniciais de todos os 16 clones e os resultados obtidos para cada um deles. A coluna 2 inclui em qual região na vizinhança da ressonância  $\nu_6$  ele pertence. Na coluna 3 são os elementos orbitais de cada clone no instante inicial no cinturão principal. Na coluna 4 é o instante em que o clone se torna Ryugu, isto é, quando entra no  $\delta_3$ , que é quando os clones obtêm os elementos orbitais próximos ou iguais aos do verdadeiro Ryugu. Na coluna 5 o instante em que ele deixa de ser Ryugu, isto é, quando ele sai da zona do  $\delta_3$ . Na coluna 6 é a distância mínima em que o clone chegou em relação ao Sol. Na coluna 7 é o tempo de evento, que é quando no passado de Ryugu o encontro do

Sol teria ocorrido. E, por fim, na coluna 8 é a parcela da irradiação solar total acumulada, a qual se encontra normalizada pelo maior número calculado.

Conclui-se que a grande maioria saem da faixa orbital do atual Ryugu, por volta de 20 Ma e somente 2 objetos ficaram abaixo de 8 Ma, na qual é o tempo em que pode ocorrer o *space weathering*, corroborando assim com os dados na literatura.

Tabela 3 – Dados dos 16 Clones

Nº do Clone	Região	Elementos no Tempo Inicial (a ua, e, i°)	Tempo quando se torna Ryugu (t anos)	Tempo quando deixa de ser Ryugu (t anos)	Distância mínima (Sol-Asteróide) e o instante em que ocorreu (r ua, t anos)	Tempo do Evento (anos)	Parcela de Radiação Acumulada (Normalizada)
233	1	(2,1259; 0,0999; 0,6320)	4,2938585e+07	4,2939526e+07	(0,7650; 4,18595e+07)	1,080026e+06	0,66666678492
272	1	(2,1259; 0,1000; 1,6550)	6,847562e+06	6,848131e+06	(0,6307; 3,06917e+06)	3,778961e+06	0,1585734812
351	1	(2,1279; 0,1000; 1,0390)	1,8593138e+07	1,8593352e+07	(0,7314; 1,74352e+07)	1,158152e+6	0,416195122
452	1	(2,1240; 0,0999; 0,6290)	2,9195236e+07	2,9195576e+07	(0,7963; 2,92005e+07)	1,926e+03	1
598	1	(2,1149; 0,1000; 1,8079)	1,3356972e+07	1,3366653e+07	(0,5457; 1,17895e+07)	1,577153e+06	0,2211082927
644	1	(2,1309; 0,1000; 0,3880)	1,2904777e+07	1,2905073e+07	(0,8187; 1,25151e+07)	3,89973e+5	0,2014290022
661	1	(2,1279; 0,1000; 0,3590)	1,0498431e+07	1,6225774e+07	(0,5636; 1,16818e+07)	4,543974e+6	0,4944496674
758	1	(2,1169; 0,0999; 1,6649)	4,8569719e+07	4,9447934e+07	(0,6240; 4,54497e+07)	3,998234e+06	0,7718101996
805	1	(2,1289; 0,1000; 1,3339)	9,097068e+06	9,316709e+06	(0,8724; 4,66307e+06)	4,653639e+06	0,1980949002
998	1	(2,1179; 0,0999; 1,1039)	3,5416750e+07	3,5417248e+07	(0,6531; 3,50047e+07)	4,12548e+5	0,5523866962
1775	2	(2,1489; 0,0999; 4,5459)	1,3083521e+07	1,3425205e+07	(0,5658; 1,26116e+07)	8,13605e+05	0,2539654102
1945	2	(2,1179; 0,1000; 2,6280)	2,922814e+06	2,923176e+06	(0,6867; 1,81835e+06)	1,104826e+06	0,05914252772
2836	3	(2,1609; 0,0999; 5,2910)	7,652276e+06	7,652736e+06	(0,7874; 4,66993e+06)	2,982806e+06	0,1706359202
3129	4	(2,2129; 0,0999; 9,3190)	2,0547844e+07	2,0548441e+07	(0,4003; 1,02846e+07)	1,0263847e+07	0,4777791574
3396	4	(2,1919; 0,0999; 8,1379)	2,3636435e+07	2,3636879e+07	(0,1452; 1,11521e+07)	1,2484779e+07	0,8690554324
3841	4	(2,2149; 0,0999; 9,4239)	1,5685444e+07	1,5685974e+07	(0,2123; 4,38222e+06)	1,1303754e+07	0,4577773836

Fonte: Produção do Próprio Autor

## 4 DISTÂNCIA DO SOL

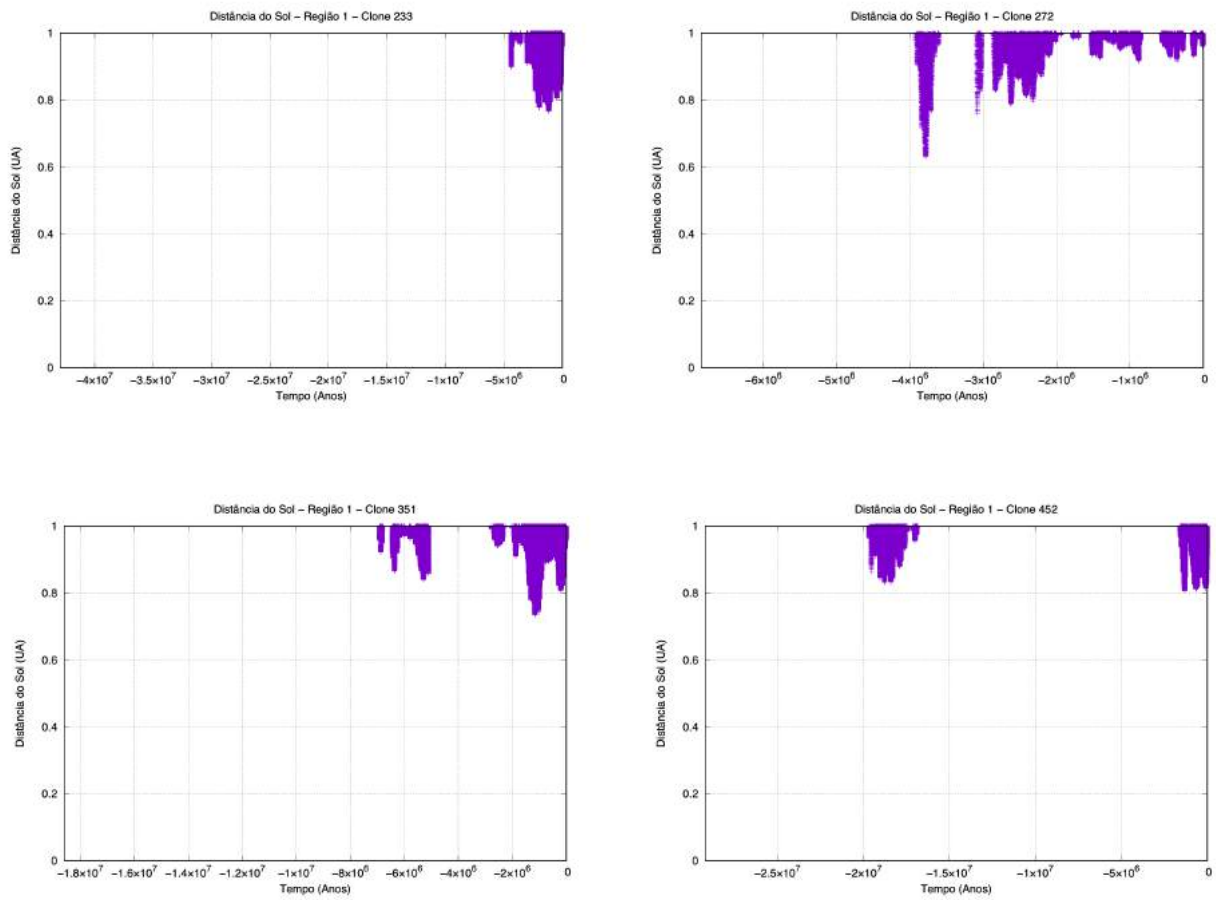
Todos os dados da distância mínima dos clones e o instante em que ocorreu estão localizados na Tabela 3.

Vê-se que dos 16 clones estudados, todos entraram na região de até 1 ua, mas somente dois chegaram mais perto do Sol, foram eles o 3396 e o 3841, os quais chegaram a 0,145 ua e 0,212 ua, respectivamente. No qual, teriam ocorrido por volta de 12,5 Ma e 11,3 Ma, no passado de Ryugu.

Como discutido anteriormente, Morora et al. (2020) estimam que o evento de avermelhamento da superfície de Ryugu ocorreria num intervalo entre  $\sim 8\text{Ma}$  e  $\sim 0,3\text{Ma}$ . Os resultados aqui apresentados tendem a concordar com o limite superior encontrado por estes autores, i.e., um evento extremo de encontro próximo com o Sol que poderia modificar a superfície de Ryugu se mostra mais provável de ter ocorrido em um passado longínquo do asteroide.

Além de eventos pontuais, ocasionados pelos encontros próximos, sabe-se que o efeito do avermelhamento da superfície de Ryugu pode ser consequência de um efeito acumulativo devido à ação da irradiação solar. Ou seja, Ryugu pode não ter chegado tão próximo do Sol, mas, ao longo de sua vida, ele ficou recebendo radiação. Este aspecto é analisado na próxima seção.

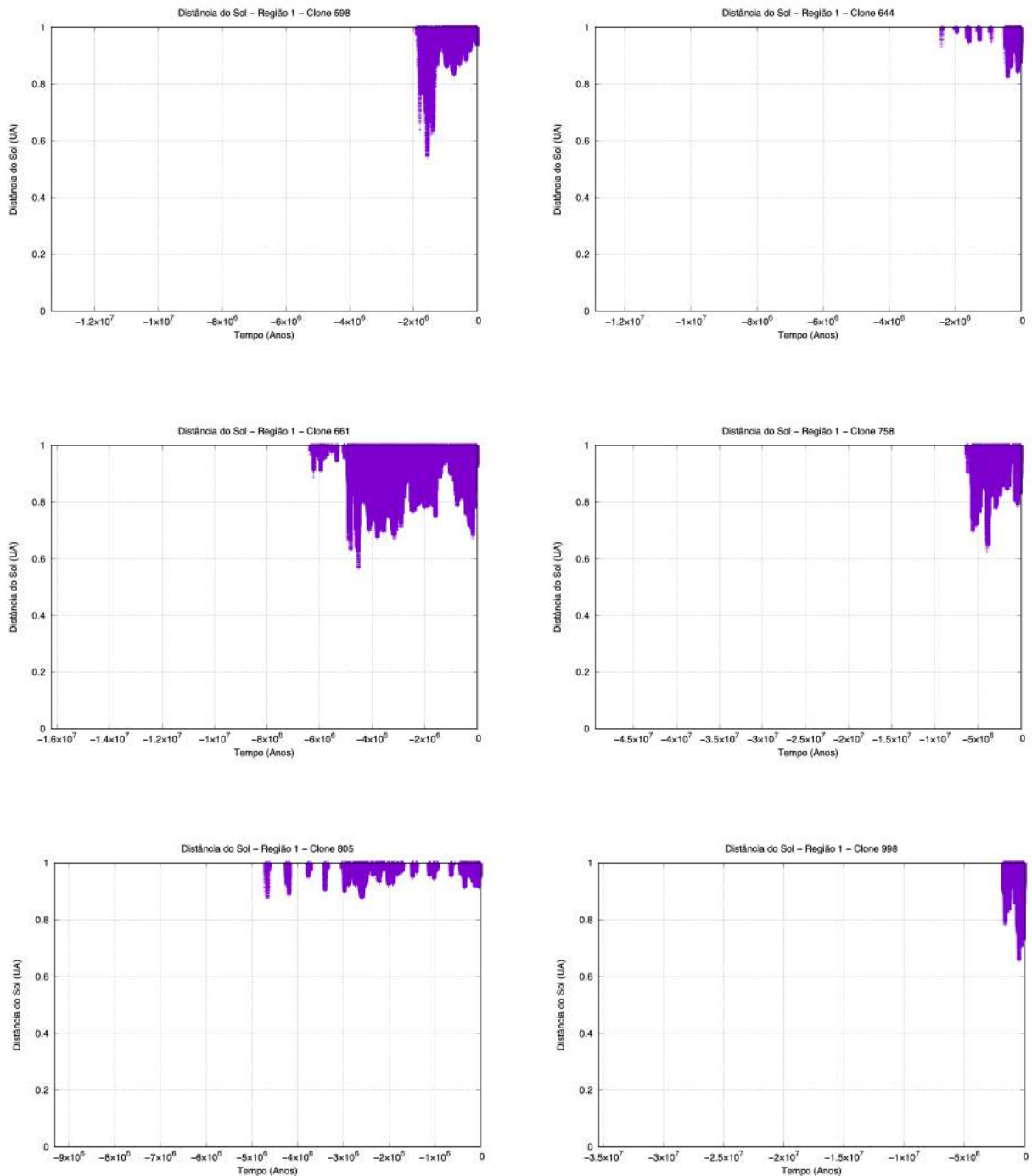
Figura 7 – Distância do Sol



Representação da distância de até 1 UA do Sol dos 16 Clones

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 8 – Distância do Sol

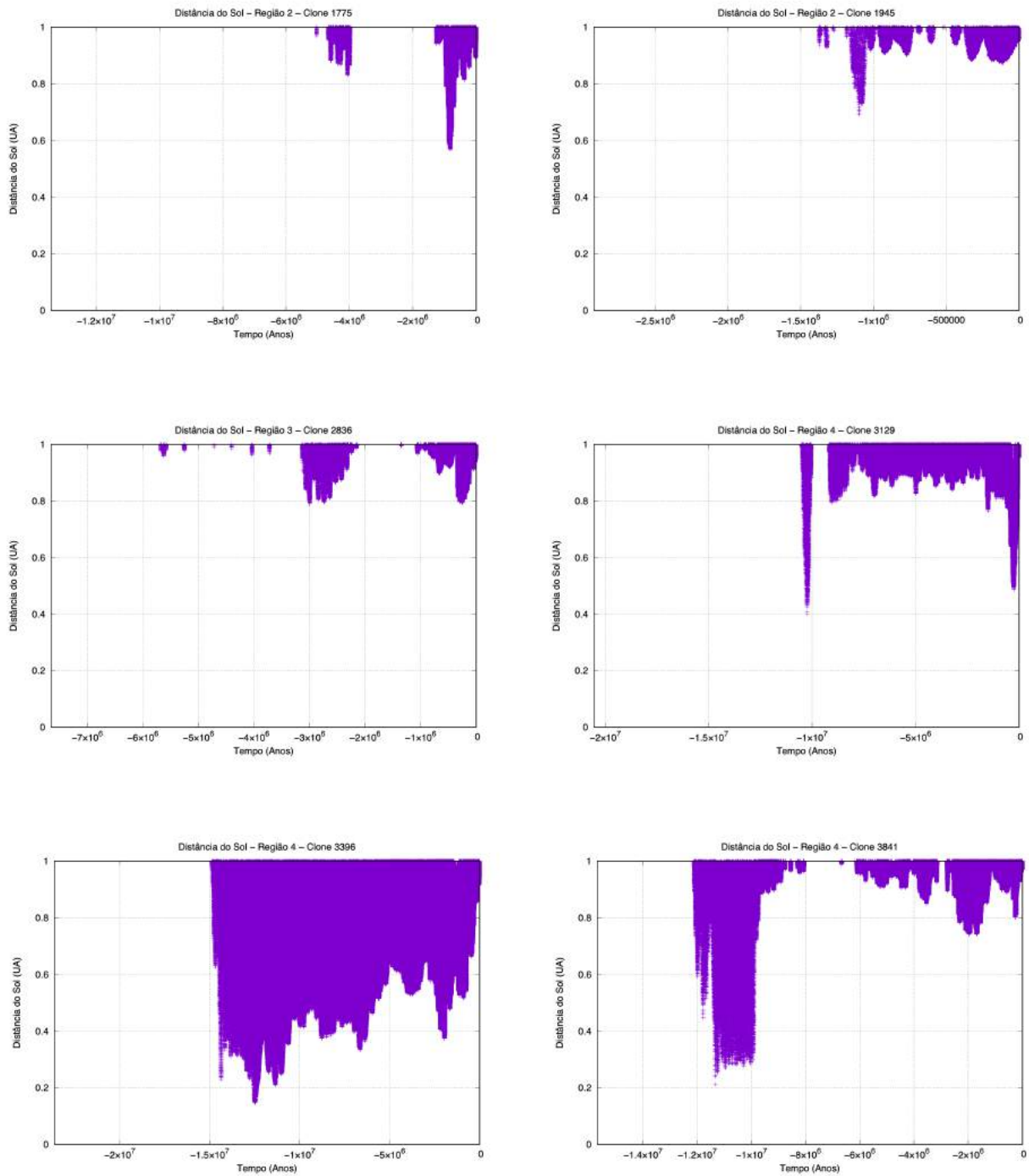


Representação da distância de até 1 UA do Sol dos 16 Clones

Fonte: Elaborado pelo autor



Figura 9 – Distância do Sol



Representação da distância de até 1 UA do Sol dos 16 Clones

Fonte: Elaborado pelo autor

Todos os dados da distância mínima dos clones e o instante em que esta ocorreu estão localizados na Tabela 3.

Vemos que todos os Clones estudados entraram na região de 1 ua, mas somente dois clones chegaram mais perto do Sol, foram eles o 3396 e o 3841, os quais chegaram a 0,145 UA e 0,212 UA, respectivamente. Esses eventos teriam ocorrido por volta de 12,5 Ma e 11,2 Ma, no passado de Ryugu.

Como discutido anteriormente, Morata et al. (2020) estimam que o evento de avermelhamento da superfície de Ryugu ocorreria num intervalo entre  $\sim 8\text{Ma}$  e  $\sim 0,3\text{Ma}$ . Os resultados aqui apresentados tendem a concordar com o limite superior encontrado por estes autores, i.e., um evento extremo de encontro próximo com o Sol que modificaria a superfície de Ryugu se mostra mais provável de ter ocorrido em um passado longínquo do asteroide.

Para os clones que obtiveram encontro próximo, será analisada em trabalhos futuros, encontros próximos do Sol, localizada no integrador Mercury, em que o espaço de integração é menor e a distância é de até 0,3 UA, podendo-se então verificar se eles chegaram até mais perto do Sol.

Além de eventos pontuais, ocasionados pelos encontros próximos, sabe-se que o efeito do avermelhamento da superfície de Ryugu pode ser consequência de um efeito acumulativo devido à ação da radiação solar. Ou seja, Ryugu pode não ter chegado tão próximo do Sol, mas, ao longo de sua vida, ele ficou recebendo radiação. Este aspecto é analisado no próximo Capítulo.

## 5 EFEITO ACUMULATIVO

Além de ter uma possibilidade de haver um encontro muito próximo de Ryugo com o Sol, o asteroide recebe uma quantidade de radiação ao longo de sua vida, e nessa seção será estimado quanto desse acúmulo da radiação o Ryugo recebeu ao longo de sua vida.

Para isso, iremos determinar a Irradiância Solar ( $P$ ), que é o fluxo de radiação solar em uma superfície esférica (Energia/Área.Tempo). Pela lei de Stefan-Boltzman, onde todo corpo acima de  $0K$  emite energia radiativa e que a densidade de fluxo dessa energia emitida é proporcional à quarta potência de temperatura absoluta desse corpo. Pode-se assim escrever a irradiância solar como:

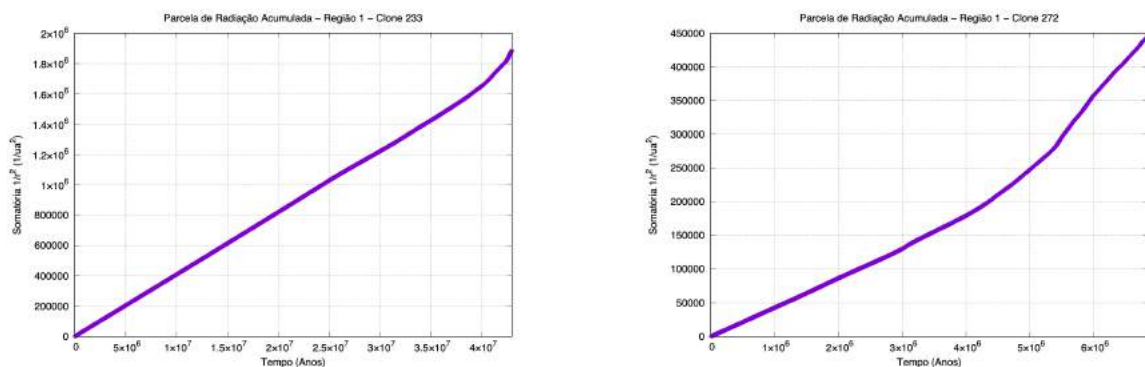
$$P_{ast} = (\sigma T^4) \frac{(R_{sol})^2}{(r_{ast})^2} \quad (1)$$

onde  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzman, que vale  $5,6697 \times 10^{-8} W/m^2 k^4$  e  $T$  é a temperatura do Sol "superficial", que vale  $5785K$ ,  $R_{sol}$  é o raio do Sol,  $6,955 \times 10^8 m$  e  $r_{ast}$  é a distância Sol-asteroide que varia no tempo.

Desta forma, para calcular o quanto o asteroide recebeu ao longo de sua vida, irá somar todas as parcelas de  $1/(r_{ast})^2$ , onde é a distância do asteroide que varia com o tempo. Como o termo  $\sigma T^4 R_s^2$  é constante para todo o intervalo de tempo.

A seguir segue os gráficos dos 16 clones, que corresponde a somatória da parcela de irradiação solar total em relação ao tempo até chegar nas condições de Ryugu atual.

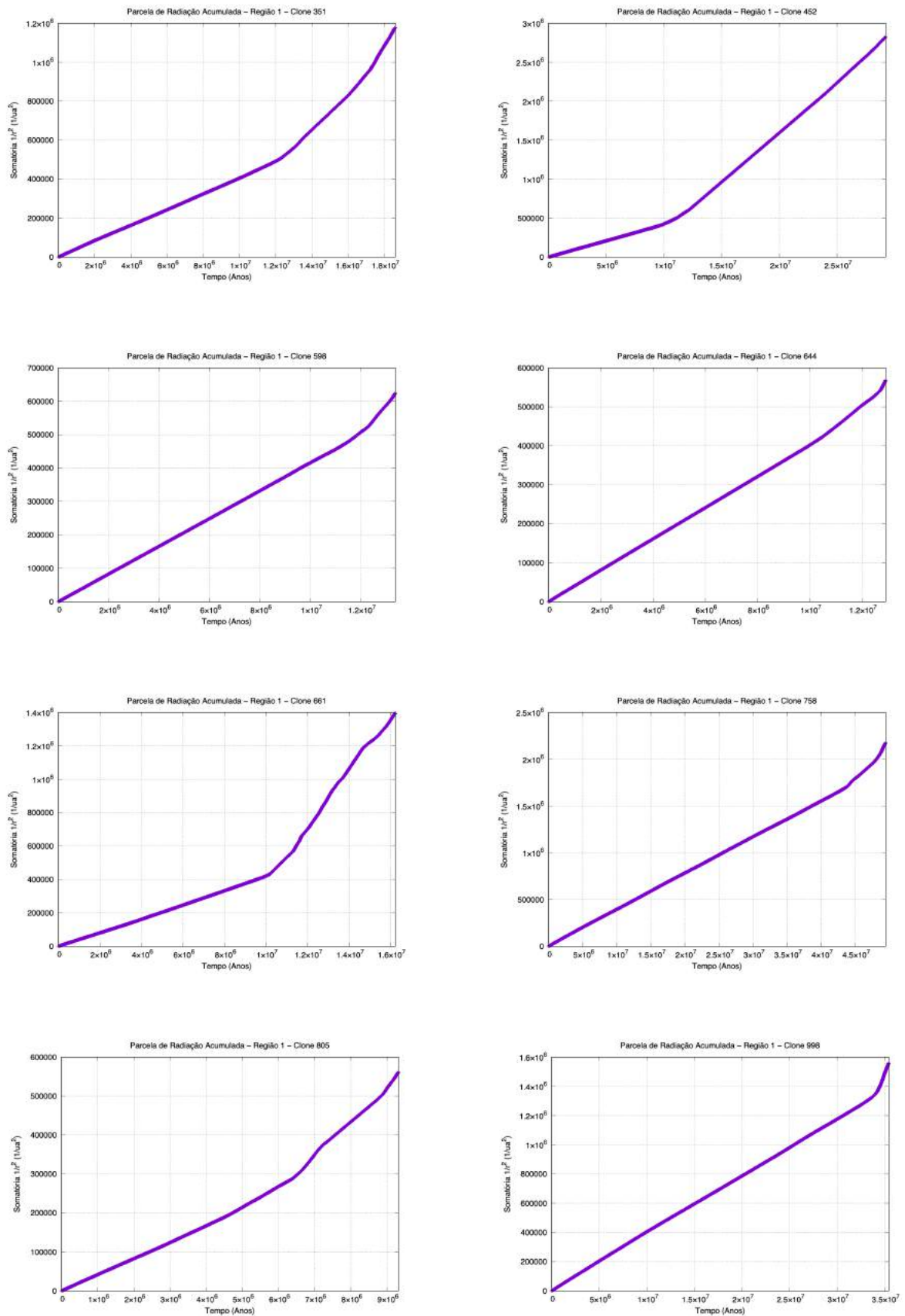
Figura 10 – Parcela da Radiação Acumulada



Representação da parcela da Radiação Acumulada dos 16 Clones

Fonte: Elaborado pelo autor

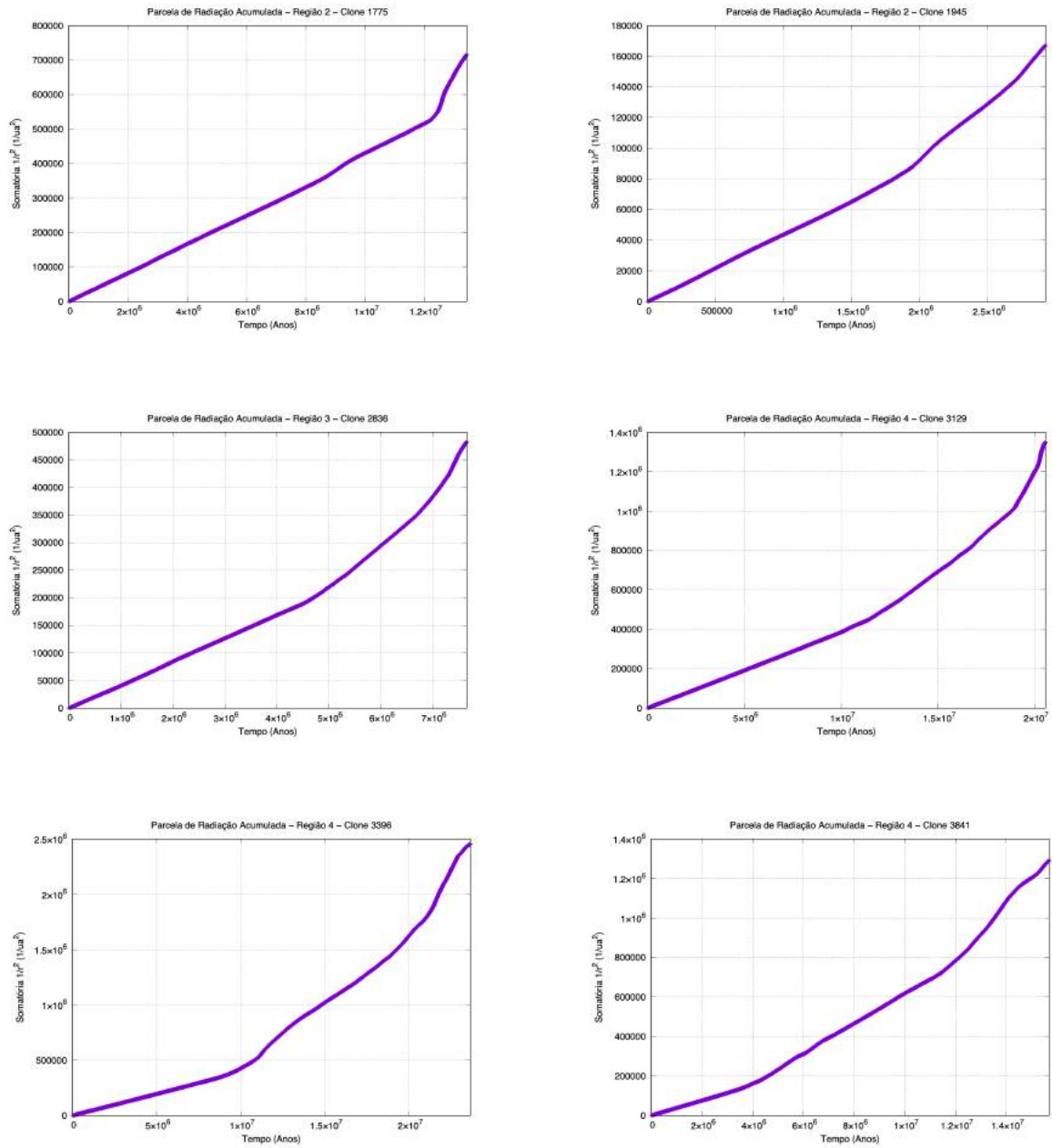
Figura 11 – Parcela da Radiação Acumulada



Representação da parcela da Radiação Acumulada dos 16 Clones

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 12 – Parcela da Radiação Acumulada



Representação da parcela da Radiação Acumulada dos 16 Clones

Fonte: Elaborado pelo autor

Pelos gráficos, vimos que o clone com maior parcela de irradiação foi o 452. Logo, foi normalizado a partir dele, para melhor comparar os resultados. A parcela de irradiação total normalizada está escrita na última coluna da tabela [3](#).

Percebe-se que o asteroide que teve o encontro maior com o Sol, não foi o mesmo que recebeu mais irradiação solar ao longo de sua vida. Pode-se observar que o tempo para o clone atingir as condições de Ryugu atual foi de 29 milhões de anos e o clone 3396 (o que chegou mais perto do Sol) foi de 23 milhões de anos, portanto temos que levar em consideração de por isso esse clone não teve uma maior parcela de radiação acumulada.

Pode-se enxergar pelas inclinações das curvas nos gráficos que, quando a inclinação muda abruptamente significa que o clone chegou muito perto do Sol (adicionando uma taxa maior a irradiação solar). Desta maneira quanto mais inclinado a curva mais perto do Sol ele chegou, e se ele fica longe do Sol sem fazer essa aproximação a curva tende a ficar uma reta na diagonal.

Portanto, o efeito acumulativo nos mostra o quanto de irradiação cada clone recebe ao longo de sua vida até sair da região do Ryugu atual.

## 6 CONCLUSÃO

O asteroide Ryugu, como apresentado na seção 1.3, foi alvo da missão Hayabusa2, e recentemente foi verificado que pode haver o efeito de envelhecimento espacial em sua superfície. Desta forma, foi estudada sua evolução orbital para averiguar quanto de radiação esse objeto recebeu e podermos comparar os dados obtidos com os dados observacionais.

Com isso, foram integrados 7.000 clones partindo da vizinhança da ressonância v6 e analisando aqueles que atingiram a órbita atual aproximada do asteroide Ryugu. Na Tabela 2, estão contidos todos os clones os quais obtiveram êxito. Vemos que 16 deles chegaram no delta pequeno, o que significa a menor variação orbital.

Foi observado que todos aqueles que entraram nessa pequena região apresentaram uma inclinação inicial que não passou de  $12^\circ$ , corroborando com os dados analíticos estudados de suas respectivas órbitas.

Concluiu-se também que a evolução orbital de somente dois clones, 3396 e 3841, chegou perto o bastante do Sol para sentir uma radiação significativa, em um dado instante, os quais poderiam causar os efeitos de envelhecimento espacial em um único evento pontual. Esses clones serão analisados mais a fundo em relação ao quão perto eles chegaram do Sol, em trabalhos futuros, verificando se há encontros de até 0,3 UA.

Verificou-se que os dados sobre o evento de avermelhamento da superfície de Ryugu indicam que este ocorreria de  $\sim 0,3$  UA a  $\sim 8$  UA, em concordância com o limite superior encontrado (MOROTA et al., 2020). Esses dados podem ser vistos na Tabela 3.

Já no Capítulo 5, que trata do efeito acumulativo, foi demonstrado como é calculada a radiação recebida na superfície e constatou-se que todos os corpos receberam a radiação, mas, logicamente, uns objetos mais e outros menos. Esta diferença é a soma de diversos fatores, como por exemplo: a própria evolução orbital de cada clone, ou seja, um passou mais tempo em uma região mais próxima do Sol que outro, ou então, momentos específicos de grande aproximação e o próprio tempo de vida do asteroide em si.

Vimos que além do envelhecimento espacial pode ocorrer um fenômeno chamado *resurfacing*, onde ocorre o recapamento da superfície do asteroide, por conta de encontros próximos com planetas, incobrando assim o espectro avermelhado do envelhecimento.

Como trabalhos futuros, destacam-se os seguintes ítems:

- Análise refinada dos encontros com o Sol ( $d_{min}$  verificado a cada passo de integração).
- Análise dos casos registrados para delta médio e delta grande
- Para os 16 clones obtidos que entraram no delta pequeno, criar uma nuvem de condições iniciais no instante em que eles se tornam um NEA - aumentando assim a chance de se obter uma amostra maior de clones que entram na região mais restrita (delta pequeno).

## REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, R. A. N. **O sistema triplo de asteróide 2001 SN263**: Dinâmica orbital e estabilidade. Tese (Doutorado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, São Paulo - Brasil, 2011. Disponível em: <http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3AK44AL>. Acesso em: 20 jul. 2019.
- ARAÚJO, R. A. N.; WINTER, O. C. Near-Earth asteroid binaries in close encounters with the Earth. **Astronomy & Astrophysics**, v. 566, p. 1–10, 2014.
- BINZEL, R. P. et al. Physical properties of near-earth objects. In: **Asteroids III**. Tucson, Arizona - Estados Unidos: University of Arizona Press, 2002. p. 255–271. Disponível em: <https://www.lpi.usra.edu/books/AsteroidsIII/pdf/3048.pdf>. Acesso em: 03 set. 2020.
- BINZEL, R. P. et al. Earth encounters as the origin of fresh surfaces on near-Earth asteroids. **Nature**, v. 463, n. 7279, p. 331–334, 2010.
- BOTTKE, W. F. et al. Debaised orbital and absolute magnitude distribution of the near-Earth objects. **Icarus**, v. 156, n. 2, p. 399–433, 2002.
- CAMPINS, H. et al. The origin of asteroid 162173 (1999 JU<sub>3</sub>). **The Astronomical Journal**, v. 146, n. 2, p. 26, 2013.
- CHAMBERS, J. E. A hybrid symplectic integrator that permits close encounters between massive bodies. **MNRAS**, v. 304, p. 793–799, 1999.
- CHAPMAN, C. R. Space weathering of asteroid surfaces. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences**, v. 32, p. 539–567, 2004.
- DELL'ORO, A.; MARCHI, S.; PAOLICCHI, P. Collisional evolution of near-Earth asteroids and refreshing of the space-weathering effects. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters**, v. 416, n. 1, p. L26–L30, 2011.
- GLADMAN, B.; MICHEL, P.; FROESCHLÉ, C. The near-Earth object population. **Icarus**, v. 146, n. 1, p. 176–189, 2000.
- GRANVIK, M. et al. Debaised orbit and absolute-magnitude distributions for near-Earth objects. **Icarus**, v. 312, p. 181–207, 2018.
- MADEY, T. E.; JOHNSON, R. E.; ORLANDO, T. M. Far-out surface science: radiation-induced surface processes in the solar system. **Surface Science**, v. 500, n. 1-3, p. 838–858, 2002.
- MICHEL, P.; DELBO, M. Orbital and thermal evolutions of four potential targets for a sample return space mission to a primitive near-Earth asteroid. **Icarus**, v. 209, n. 2, p. 520–534, 2010.
- MORBIDELLI, A. et al. Origin and evolution of near-earth objects. In: **Asteroids III**. Tucson, Arizona - Estados Unidos: University of Arizona Press, 2002. p. 409–422.
- MOROTA, T. et al. Sample collection from asteroid (162173) Ryugu by Hayabusa2: Implications for surface evolution. **Science**, v. 368, n. 6491, p. 654–659, 2020.
- MURRAY, C. D.; DERMOTT, S. F. **Solar system dynamics**. Cambridge - Inglaterra: Cambridge University Press, 1999.
- NASA. **JPL'S HORIZONS system**. 2020. Disponível em: <http://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi>. Acesso em: 15 jan. 2020.



NESVORNÝ, D. et al. Do planetary encounters reset surfaces of near-Earth asteroids? **Icarus**, v. 209, n. 2, p. 510–519, 2010.

POPESCU, M. et al. Near-Earth asteroids spectroscopic survey at Isaac Newton telescope. **Astronomy & Astrophysics**, v. 627, p. A124, 2019.

SHESTOPALOV, D. I.; GOLUBEVA, L. F.; CLOUTIS, E. A. Optical maturation of asteroid surfaces. **Icarus**, Elsevier Inc., v. 225, n. 1, p. 781–793, 2013.

SPACE STUDIES BOARD. **The exploration of near-Earth objects**. [S.l.]: National Academy Press, 1998.