

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
INSTITUTO DE FÍSICA

EVELYN CHRISTINY MARQUES PRAIS

Himália: Determinação da órbita do maior satélite irregular de Júpiter

Uberlândia

2025

EVELYN CHRISTINY MARQUES PRAIS

Himália: Determinação da órbita do maior satélite irregular de Júpiter

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao Instituto de Física da Universidade Federal  
de Uberlândia como requisito parcial para  
obtenção do título de bacharel, em

Área de concentração: Física de Materiais

Orientador: Prof. Dr. Altair Ramos Gomes  
Júnior

Uberlândia

2025

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU  
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

P898 Prais, Evelyn Christiny Marques, 1996-  
2025 Himália: Determinação da órbita do maior satélite irregular de  
Júpiter [recurso eletrônico] / Evelyn Christiny Marques Prais. -  
2025.

Orientador: Altair Ramos Gomes Júnior.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade  
Federal de Uberlândia, Graduação em Física de Materiais.

Modo de acesso: Internet.

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Física. I. Gomes Júnior, Altair Ramos ,1990-, (Orient.). II.  
Universidade Federal de Uberlândia. Graduação em Física de  
Materiais. III. Título.

CDU: 53

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091

Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

EVELYN CHRISTINY MARQUES PRAIS

Himália: Determinação da órbita do maior satélite irregular de Júpiter

Trabalho de Conclusão de Curso ao Instituto de Física da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em

Área de concentração: Física de Materiais

Uberlândia, 22 de maio de 2025.

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr. Altair Ramos Gomes Júnior – Presidente (INFIS - UFU)

---

Prof. Dr. Gustavo Foresto Brito de Almeida – Titular (INFIS - UFU)

---

Prof. Dr. Tiago Francisco Lins Leal Pinheiro – Titular (ON)

Dedico, em memória, ao meu avô Antonio,  
que sempre acreditou no meu potencial e  
engrandeceu cada pequeno passo que dei. Sua  
força, incentivo e amor continuam me  
guiando, mesmo após sua partida.

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha sincera gratidão ao meu orientador Altair por aceitar o desafio de me orientar neste trabalho, mesmo com o tempo inicialmente curto e minha limitada experiência na área. Agradeço por toda a paciência e tempo dedicados, especialmente pela oportunidade que me proporcionou de retomar o contato com a Astronomia, uma ciência que sempre me fascinou desde a infância e cuja paixão foi reacendida graças a esta experiência.

Agradeço à minha família, em especial às grandes mulheres da minha vida: minha mãe Luciana, minha avó Dalva, minha avó Carmelita e minha irmã Ana Clara. Obrigada por cuidarem de mim e me ajudarem a trilhar esse caminho com apoio e amor.

Sou grata ao Rafael por todo apoio, suporte e amizade, que foram parte importante da minha trajetória até aqui.

Agradeço à professora Ana Paula, com quem tive a oportunidade de ser aluna de iniciação científica e extensão, e de quem aprendi muito, tanto com sua orientação quanto com sua amizade. Agradeço também aos professores Lucio e Gustavo, com quem também tive a oportunidade de trabalhar na extensão. São pessoas que admiro profundamente e por quem tenho grande consideração.

Agradeço aos meus sobrinhos, que me veem como uma grande cientista, mesmo eu ainda estando em formação. Ao meu tio José Geraldo, o maior corinthiano e historiador que tive a honra e oportunidade de conhecer, deixo meu carinho e admiração.

Registro também minha gratidão às minhas colegas de grupo de pesquisa, Ana Laura e Maísa, que se tornaram grandes amigas e cuja amizade foi essencial neste último ano.

Agradeço a todas as meninas que fizeram parte do projeto Meninas da Física, do qual tive a grande oportunidade de ser uma das cofundadoras. Foram anos de muito aprendizado e crescimento.

Há muitas outras pessoas que gostaria de agradecer, mas deixo em destaque especialmente essas que foram peças fundamentais na minha jornada até aqui. Seja qual for o caminho que cada um tome daqui para frente, são pessoas que levarei sempre na mente e no coração.

Obrigada.

“Já aqui, precisamos correr, e muito, para continuarmos no mesmo lugar. Se quer chegar a um lugar diferente, tem que correr pelo menos duas vezes mais depressa que isso!”  
(Lewis Carroll, *Alice Através do Espelho*).

## RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo voltado ao aprimoramento da determinação orbital de Himália, o maior satélite irregular de Júpiter, utilizando integrações numéricas e análise estatística de dados observacionais coletados entre 1886 e 2022. A abordagem adotada considera, inicialmente, pesos iguais para as observações, com o objetivo de identificar discrepâncias e preparar o conjunto de dados para um tratamento futuro mais refinado. A aplicação da parte inicial dessa metodologia resultou em uma órbita preliminar consistente, com potencial para aperfeiçoar previsões futuras. Os resultados demonstram que a seleção cuidadosa e o tratamento estatístico diferenciado das observações impactam positivamente a precisão orbital, destacando a eficácia do método desenvolvido.

**Palavras-chave:** Integração numérica; Himália; Dinâmica orbital; Satélite irregular; Astrometria.



## ABSTRACT

This work presents a study focused on improving the orbital determination of Himália, the largest irregular satellite of Jupiter, through numerical integrations and statistical analysis of observational data collected between 1886 and 2022. The adopted approach initially considers equal weights for all observations, aiming to identify discrepancies and prepare the dataset for more refined future processing. The application of the initial part of this methodology resulted in a consistent preliminary orbit, with potential to enhance future predictions. The results demonstrate that careful selection and differentiated statistical treatment of the observations positively impact orbital accuracy, highlighting the effectiveness of the developed method.

**Keywords:** Numerical integration; Himália; Orbital dynamics; Irregular satellite; Astrometry.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVO.....</b>	<b>13</b>
<b>3</b>	<b>DADOS OBSERVACIONAIS.....</b>	<b>14</b>
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>18</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>23</b>
<b>6</b>	<b>DISCUSSÃO .....</b>	<b>30</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>33</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>34</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Satélites irregulares são corpos naturais que orbitam planetas, mas diferem significativamente dos satélites regulares. Eles se caracterizam por órbitas distantes, com grandes excentricidades e inclinações, muitas vezes retrógradas, o que indica que não se formaram junto ao planeta que orbitam, mas foram capturados gravitacionalmente posteriormente (Nicholson, 2008). Segundo Gomes Júnior (2018), esses satélites são geralmente pequenos e de forma irregular.

Acredita-se que esses satélites foram capturados durante os estágios iniciais do Sistema Solar (Sheppard and Jewitt, 2003), e diferentes mecanismos podem ter contribuído para esse processo (Gomes Júnior, 2018). Entre esses mecanismos estão a captura por arrasto gasoso na nebulosa circumplanetária primordial, onde o objeto tem sua velocidade diminuída pela interação com o gás ao redor do planeta (Sheppard, 2005); captura por interações dinâmicas envolvendo três corpos, um processo no qual a troca de energia e momento angular durante encontros próximos pode resultar na captura permanente do satélite (Nesvorný et al., 2014).; e captura por colisões, onde colisões entre pequenos corpos dentro da esfera de Hill de um planeta gigante geram fragmentos cujas trajetórias são suficientemente alteradas para serem capturados (Sheppard, 2005).

Estudá-los é fundamental para compreender os mecanismos de captura gravitacional e a dinâmica orbital em sistemas planetários, contribuindo para o entendimento da formação e evolução do Sistema Solar, e potencialmente, de sistemas extrassolares (Gomes Júnior, 2018).

Além de esclarecer sua origem, o estudo dos satélites irregulares também pode fornecer pistas sobre os mecanismos de migração planetária e os processos de instabilidade que atuaram nas fases iniciais do Sistema Solar. Esses corpos podem representar fragmentos preservados de material primitivo, sendo úteis para comparação com sistemas planetários extrassolares e para o entendimento da distribuição de pequenos corpos em órbitas excêntricas e inclinadas. Devido à sua diversidade orbital e composição potencialmente primitiva, eles também podem servir como alvos de interesse para missões futuras ou campanhas observacionais colaborativas.

Himália, em particular, é o maior satélite irregular de Júpiter e o membro mais representativo do chamado “grupo prógrado de Himália” (Holt et al. 2018). Himália foi descoberto em 3 de dezembro de 1904 por Charles Dillon Perrine, utilizando o refletor Crossley de 36 polegadas no observatório Lick, na Califórnia (Perrine 1905). Com raio médio de aproximadamente 85 km, refletindo cerca de 4% da luz solar incidente (albedo de 0,04), trata-

se de um corpo escuro, possivelmente de classe C ou D, categorias espectrais associadas a objetos ricos em carbono, escuros e primitivos (Grav et al., 2015). Embora seja o maior entre os irregulares jovianos, sua órbita é significativamente inclinada e excêntrica, leva aproximadamente 251 dias terrestres para completar uma órbita ao redor de Júpiter. Devido ao seu maior tamanho entre os satélites irregulares de Júpiter, Himália é também o mais observado e estudado desse grupo, pois reflete mais luz e é mais facilmente detectável (Grav et al., 2003). Isso o torna um objeto importante na modelagem de sua dinâmica e como alvo de refinamento nas efemérides disponíveis. Segundo Buratti & Thomas (2007), Himália pode ser o maior fragmento remanescente de um satélite primordial que se fragmentou após uma colisão, dando origem às demais luas do grupo, como Elara, Lisiteia e Leda, uma hipótese que se alinha com estudos morfológicos e espectrais anteriores (Porco et al., 2003; Grav et al., 2015).

A Tabela 1 apresenta as principais características orbitais dos satélites do Grupo Progrado de Himália, como semieixo maior (a), inclinação orbital média (i), excentricidade (e), argumento do periastro (Peri), longitude do nó ascendente (Node), anomalia média (M) e o período orbital (Período). Além desses dados, constam também a magnitude aparente (mag), o diâmetro estimado (Diâmetro) e o ano de descoberta (Ano) de cada satélite. Essas informações são essenciais para o estudo dinâmico e para a compreensão da evolução orbital desses corpos. Vale ressaltar que alguns satélites, apesar de terem órbitas bem definidas, ainda não foram oficialmente nomeados pela IAU, como evidenciado na coluna “Designação” (SHEPPARD et al., 2023).

Tabela 1: Principais características orbitais dos satélites do Grupo Progrado de Himália: semieixo maior (a), inclinação (i), excentricidade (e), argumento do periastro (Peri), longitude do nó ascendente (Node), anomalia média (M), período orbital (Período), magnitude aparente (mag), diâmetro estimado (Diâmetro) e ano de descoberta (Ano). Satélites sem nomes, apesar de terem órbitas bem definidas, ainda não foram oficialmente nomeados pela União Astronômica Internacional (IAU), como evidenciado na coluna “Designação”. Satélites com a designação “L??” foram observados por mais de um ano, possuem órbita bem determinada e devem ser numerados futuramente. Fonte: SHEPPARD, Scott S. Jupiter’s moons. Disponível em: <https://sites.google.com/carnegiescience.edu/sheppard/moons/jupitermoons>.

Nº	Nome	Designação	a (km)	i (grau)	e	Peri (grau)	Nó (grau)	M (grau)	Período (dias)	mag	Diâmetro (km)	Ano
----	------	------------	--------	----------	---	-------------	-----------	----------	----------------	-----	---------------	-----

XIII	Leda		11165000	27.46	0.164	272.3	217.1	228.1	240.9	20.2	18	1974
VI	Himália		11461000	27.50	0.162	332.0	57.2	68.7	250.6	14.8	160	1904
LX XI	Ersa	S/2018 J1	11483000	30.61	0.094	346.7	93.3	356.6	252.0	22.9	3	2018
L??		S/2018 J2	11490000	29.40	0.118	342.1	66.1	99.2	252.0	23.3	3	2018
LX V	Pandia	S/2017 J4	11525000	28.15	0.180	238.8	228.4	282.4	252.1	23.0	3	2017
X	Lysithea		11717000	28.30	0.112	49.5	5.5	329.1	259.2	18.2	38	1938
VII	Elara		11741000	26.63	0.217	143.6	109.4	333.0	259.6	16.6	78	1905
L??		S/2011 J3	11829000	28.66	0.176	222.1	97.7	215.6	263.0	23.1	3	2011
LIII	Dia	S/2000 J11	12118000	28.23	0.211	178.0	290.9	169.9	287.0	22.4	4	2000

Na Figura 1, temos o satélite irregular Himália visto pela sonda Cassini em 2000. A imagem inferior evidência a aparência difusa do satélite, que é atribuída ao albedo extremamente baixo e ao pequeno porte do objeto, além de ressaltar a dificuldade de se obter imagens nítidas de satélites tão pequenos e distantes. Na parte superior, observa-se uma projeção da forma esperada de Himália, construída a partir de dados fotométricos. Essa projeção ajuda a ilustrar a forma irregular e o baixo contraste de brilho, características comuns aos satélites capturados de Júpiter.



Figura 1: Himália visto pela sonda Cassini em 2000. A imagem inferior mostra uma ampliação do satélite, evidenciando sua aparência difusa, atribuída ao albedo extremamente baixo e ao pequeno porte do objeto. Na parte superior, apresenta-se uma projeção da forma esperada de Himália, obtida a partir de dados fotométricos. Fonte: NASA/JPL/Space Science Institute – PIA02881.

O estudo da órbita de Himália é motivado por seu potencial como alvo para campanhas de observação por ocultações estelares, que são eventos em que o satélite passa em frente a uma estrela e bloqueia sua luz por um breve intervalo de tempo. Essas ocultações permitem estimativas altamente precisas de posição, do tamanho e até mesmo a forma do corpo ocultador (Gomes Júnior, 2018). Em casos bem-sucedidos, é possível obter perfis detalhados da sombra projetada na Terra, permitindo reconstruções da silhueta do corpo e, eventualmente, a detecção de estruturas como anéis ou atmosferas extremamente finas e pouco densas (Gomes Júnior, 2018). No entanto, a previsão confiável desses eventos depende diretamente da qualidade das efemérides disponíveis. Portanto, obter uma boa determinação orbital é a etapa essencial para que ocultações futuras possam ser previstas com maior precisão e utilizadas de forma eficiente na caracterização física do satélite.

As efemérides atualmente mais precisas e amplamente utilizadas para os satélites irregulares de Júpiter, incluindo Himália, são disponibilizadas por meio do sistema Horizons, do Jet Propulsion Laboratory (JPL), e estão reunidas no modelo denominado JUP344. Essa solução incorpora dados astrométricos até novembro de 2020, conforme comunicação pessoal

de M. Brozović (2021) à equipe do NAIF/NASA. Embora seja uma das efemérides mais precisas atualmente disponíveis, JUP344 ainda apresenta limitações no contexto de ocultações estelares, especialmente devido à dispersão das observações históricas e à ausência de ponderações detalhadas com base na qualidade dos dados. Além disso, efemérides padronizadas como essa são atualizadas com baixa frequência, o que limita sua aplicabilidade em campanhas observacionais em tempo real ou na incorporação de novos dados astrométricos recentes. Isso evidencia a importância de abordagens complementares, como a proposta neste trabalho, voltadas ao refinamento orbital por meio de técnicas estatísticas e integrações numéricas. Neste trabalho, a efeméride JUP344 é utilizada como referência para comparação com os resultados preliminares obtidos a partir das integrações numéricas realizadas, possibilitando a avaliação da consistência e do potencial de refinamento da metodologia adotada.

Essa abordagem já demonstrou sucesso em aplicações semelhantes, como no caso da determinação orbital de objetos Trans-Netunianos (TNOs) e Centauros, realizada pelo NIMA (Desmars et al., 2015), que resultou em melhorias significativas nas previsões de ocultações estelares para esses objetos. A metodologia desenvolvida também poderá ser adaptada futuramente à determinação orbital de outros satélites irregulares do Sistema Solar, como Elara, Pasiphae ou Nerida, ampliando as possibilidades de aplicação da metodologia em desenvolvimento.

Os capítulos deste trabalho foram organizados da seguinte forma: na seção 2, fortalecemos os objetivos específicos do projeto, esclarecendo as principais motivações científicas. Na seção 3, são apresentados os dados observacionais utilizados nas integrações numéricas, detalhando sua origem, características e organização. Em seguida, na seção 4, descrevemos a metodologia adotada para a determinação orbital, incluindo as ferramentas numéricas e estatísticas aplicadas ao conjunto de dados. Os resultados das integrações numéricas, análises e comparações com as efemérides atuais são apresentados na seção 5. Posteriormente, na seção 6, discutimos criticamente os resultados obtidos, abordando limitações, potenciais melhorias e o impacto na precisão orbital. Por fim, na seção 7, apresentamos as principais conclusões do trabalho, juntamente com sugestões para futuros estudos.

## **2 OBJETIVO**

O presente trabalho teve como objetivo realizar integrações numéricas da órbita do satélite irregular de Júpiter, Himália, com o intuito de obter uma solução orbital própria para Himália, desenvolvida de forma independente e com estrutura flexível, capaz de ser atualizada com facilidade à medida que novas observações são disponibilizadas. A proposta busca não apenas melhorar a precisão das efemérides para fins como ocultações estelares, mas também oferecer uma alternativa autônoma às soluções fornecidas por centros de pesquisa, permitindo à comunidade científica maior controle sobre os dados, metodologias e ajustes envolvidos na modelagem orbital.



### 3 DADOS OBSERVACIONAIS

As observações utilizadas neste trabalho foram obtidas por meio do Natural Satellites Database (NSDB), uma base de dados astrométricos criada com o objetivo de reunir observações de satélites naturais para facilitar estudos dinâmicos e efemérides precisas (Arlot et al., 2024). O NSDB foi desenvolvido em colaboração entre o Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Éphémérides (IMCCE), na França, e o Sternberg Astronomical Institute da Moscow State University, na Rússia, por recomendação da Comissão 20 da União Astronômica Internacional (IAU).

Essa base de dados reúne e organiza observações publicadas em artigos científicos, arquivos suplementares online, contatos diretos com observadores, e outros bancos de dados astronômicos como o Minor Planet Center e o Observatório de Flagstaff. Cada conjunto de observações é apresentado em pares de arquivos: um contendo os dados brutos das observações e outro descrevendo detalhadamente os métodos e as condições sob as quais as observações foram realizadas, incluindo o referencial adotado e as reduções aplicadas (Arlot et al., 2024).

O NSDB é uma das fontes mais abrangentes de observações astrométricas de satélites naturais, reunindo medidas realizadas por diferentes observatórios, técnicas de observação e épocas, com registros que se estendem desde o final do século XIX até os dias atuais.

Para o satélite Himália, o NSDB disponibiliza uma série temporal extensa de observações que inclui, para cada medida, informações como: data da observação, coordenadas equatoriais (ascensão reta e declinação), catálogo estelar utilizado, local da observação, tipo de instrumento utilizado e, em alguns casos, a incerteza associada. As coordenadas horárias de ascensão reta (RA) e angulares de declinação (DEC) indicam a posição do satélite no céu em relação a esfera celeste, sendo a coordenada horária expressas inicialmente em horas, minutos e segundos e a coordenada angular em graus, minuto e segundos. Uma consideração importante nesse contexto é a escala de tempo associada a cada observação. Embora as datas estejam representadas em formato de data Juliana(JD), o aspecto essencial para a integração numérica é a escala temporal utilizada. No presente trabalho, observações originalmente em UTC (Tempo Universal Coordenado) foram convertidas para a escala de tempo TDB (Tempo Dinâmico Baricêntrico), necessária para o funcionamento correto do código de integração orbital.<sup>1</sup> Essa conversão garante a consistência temporal entre os dados observacionais e o modelo dinâmico.

---

<sup>1</sup> Conversão realizada com base nas funcionalidades do pacote Astropy. Disponível em: <https://docs.astropy.org/en/stable/time/>

Esse conjunto heterogêneo de dados é fundamental para a determinação orbital precisa, mas também exige cuidados específicos no tratamento estatístico, devido à variação na qualidade, nas técnicas de observação e nas escalas temporais ao longo do tempo.

A Tabela 2 apresenta as informações de Himália extraídas do banco de dados do NSDB. Os dados estão organizados por conjunto observacional reportado, seja por publicações em artigos ou por comunicação direta ao Minor Planet Center (MPC). Ressalta-se que o banco de dados do NSDB contém observações dos diversos satélites irregulares jovianos misturadas, além de certas diferenças de padronização das tabelas em que são organizados, exigindo assim um cauteloso trabalho inicial de separação e organização específicas para Himália antes da utilização nas integrações numéricas.

Tabela 2: Recorte dos registros do NSDB utilizados neste trabalho, com indicação do período de observação, número de posições, tipo de instrumento, local da observação, referência bibliográfica, código do arquivo e data de submissão do arquivo.

Observações por Período	Nº de Posições por Satélite	Tipo de Observação	Sítios	Referências	Pastas	Data de entrada
1998–1998	133	CCD abs	Flagstaf	Stone R.C. (2 000)	jo0002	01/07/09
2000–2000	50	CCD abs	6 sites	MPC batch of Dec 2000	jo0004	01/11/01
1992–2001	87	CCD abs	4 sites	MPC Communication 2001- 02,04	jo0005	01/11/01
1999–1999	9	CCD abs	Drum Hill Station	MPC Communication 2001-09	jo0006	01/11/01
2001–2001	6	CCD abs	644, 691	MPC Communication 2001-12	jo0007	01/12/11

Neste trabalho, foram utilizadas 4599 observações coletadas no período de 1886 a 2022. A escolha desse intervalo visa aproveitar a maior extensão temporal possível que se encontra disponível na base de dados, permitindo analisar variações orbitais de longo prazo e investigar sua influência nas efemérides resultantes. Antes de serem processadas numericamente, as observações passaram por uma etapa de pré-tratamento, na qual foi feita a conversão das datas originais para a escala de Tempo Dinâmico Baricêntrico (TDB) e o formato de data Juliana. As transformações foram realizadas com base no pacote Astropy.<sup>1</sup> Além disso, as coordenadas angulares de ascensão reta e declinação foram convertidas para radianos, formato requerido pelo código utilizado neste trabalho para a integração numérica da órbita de Himália. Também foi realizada uma verificação para garantir que todas as observações estivessem referenciadas

no sistema de referência celestial padrão atualmente adotado, o ICRS (International Celestial Reference System), evitando possíveis inconsistências relacionadas a sistemas de referência anteriores.<sup>2</sup> Essas etapas de preparo foram aplicadas com o intuito de garantir a correta leitura e consistência dos dados durante a etapa de integração numérica, possibilitando obter uma solução orbital preliminar baseada no conjunto específico de observações selecionado.

A Tabela 3 apresenta um exemplo de observações astrométricas extraídas do arquivo jo0056, parte integrante do banco de dados utilizados. Cada linha da tabela representa uma medida da posição do satélite Himália em um instante específico, com data expressa em data juliana, seguida pelas componentes de ascensão reta e declinação. Além das posições celestes, também são informadas as incertezas associadas (em milissegundos de arco), a magnitude aparente, o filtro utilizado, o tipo de telescópio e o código do sítio observacional. Esses dados foram utilizados nas integrações numéricas do modelo orbital. Por tratar-se de uma base com milhares de dados, apenas parte dos dados é exibida.

Tabela 3: Exemplo de observações astrométricas do satélite Himália extraídas do arquivo jo0056 do banco de dados do NSDB. São apresentados, para cada linha, a data Julianada observação (JD), as componentes de ascensão reta ( $\alpha$  h, m, s) em horas, minutos e segundos) e da declinação ( $\delta$  °, ', ") em graus, minutos e segundos), os erros em milissegundos de arco (mas) para ambas as coordenadas, a magnitude aparente, o filtro utilizado (C), o tipo de telescópio (PE – Perkin-Elmer) e o código do sítio observacional (874).

JD with decimals	$\alpha$ (h, m, s)	$\delta$ (deg, ', ")	$\Delta\alpha$ mas	$\Delta\delta$ mas	Mag	Filtro	Telescope	Nº Obs
2449877.6 6006910	16 30 30.0725	-20 47 13.562	21	22	14,6	C	PE	874
2449877.6 6104051	16 30 30.0471	-20 47 13.534	21	22	14,5	C	PE	874
2449877.6 6211806	16 30 30.0139	-20 47 13.560	21	22	14,3	C	PE	874
2450255.5 6083565	19 05 47.0036	-22 42 48.968	9	5	15,0	C	PE	874
2450255.5 6273264	19 05 46.9331	-22 42 48.987	9	5	15,0	C	PE	874
2450255.5 6363993	19 05 46.9007	-22 42 49.011	9	5	15,0	C	PE	874

<sup>2</sup> Para mais detalhes sobre sistemas de referência e suas transformações no contexto astrométrico, consulte a documentação do Astropy: <https://docs.astropy.org/en/stable/coordinates/index.html>

2450255.5 6453993	19 05 46.8684	-22 42 49.023	9	5	15,0	C	PE	874
----------------------	------------------	------------------	---	---	------	---	----	-----

Por fim, observa-se que a escolha pelo NSDB como fonte primária neste estudo se deve à sua ampla cobertura temporal e à padronização no formato dos dados, o que facilita a organização e o processamento automatizado.

## 4 METODOLOGIA

Para a realização das integrações numéricas neste trabalho, foi utilizado o código BOSS (Brazilian Orbital Solutions for Satellites), desenvolvido pelo Professor Dr. Altair Gomes Júnior e colaboradores. Trata-se de uma ferramenta desenvolvida para a integração das equações de movimento de satélites naturais considerando a influência do planeta primário (no caso Júpiter), incluindo o termo de achatamento J2 e as perturbações causadas por corpos externos relevantes, como o Sol e outros planetas (Gomes-Júnior, 2018).

A determinação da órbita de satélites irregulares como Himália não pode ser feita apenas com métodos analíticos ou aproximações simplificadas. Isso ocorre porque esses corpos sofrem perturbações significativas de outros planetas, dos satélites Galileanos e do achatamento do planeta primário, especialmente considerando o longo intervalo no qual as observações foram realizadas, abrangendo aproximadamente 136 anos. Dessa forma, o uso de integrações numéricas detalhadas torna-se essencial para considerar adequadamente todas essas contribuições ao movimento. O código BOSS foi desenvolvido com esse objetivo, permitindo ajustar órbitas mesmo em contextos com dados astrométricos heterogêneos e complexos.

Antes da aplicação das integrações numéricas, foi necessário realizar um tratamento preparatório das observações. As coordenadas astrométricas de ascensão reta e declinação foram convertidas para radianos, como requerido pelo BOSS. As datas também foram transformadas para o formato de data juliana, com a devida conversão da escala temporal para TDB. Esse processo garantiu a compatibilidade dos dados com o modelo e permitiu sua inserção direta nos arquivos de entrada utilizados pelo código.

A equação diferencial utilizada nas integrações numéricas com o código BOSS é baseada na seguinte forma vetorial:

$$\ddot{\mathbf{r}}_i = -\frac{G(m_0+m_i)\mathbf{r}_i}{r_i^3} + G \sum_{j=1, j \neq i}^{N+H} m_j \left( \frac{\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i}{r_{ij}^3} - \frac{\mathbf{r}_j}{r_j^3} \right) + G(m_0 + m_i)\nabla U_{i0} + G \sum_{j=1}^{N+H} m_j \nabla U_{j0} \quad (1)$$

A equação (1) descreve a aceleração total do satélite  $i$  em relação ao planeta primário, denotada por  $\ddot{\mathbf{r}}_i$ , sendo expressa em um referencial centrado no primário. Nesse contexto,  $G$  é a constante gravitacional universal de Newton,  $m_0$  é a massa do planeta primário (Júpiter), e  $m_i$  é a massa do satélite considerado. O vetor  $\mathbf{r}_i$  representa a posição relativa do satélite em relação ao primário, enquanto  $r_i$  é o módulo desse vetor, indicando a distância entre eles. O

segundo termo envolve a soma das forças gravitacionais provenientes dos outros corpos massivos presentes no sistema, sendo  $m_j$  a massa de cada um desses corpos  $i$  e  $j$ . O terceiro termo considera o efeito do potencial gravitacional não-esférico (achatamento) do planeta primário, representado pelo potencial  $U_{J0}$ , onde  $\nabla U_{J0}$  é o gradiente desse potencial devido à distribuição não homogênea de massa no planeta. Finalmente, o quarto termo corresponde às acelerações indiretas causadas pelo achatamento do primário sobre os demais corpos perturbadores. A solução dessa equação é obtida por meio de integração numérica com controle de erro adaptativo. As integrações foram realizadas com precisão de duplo ponto flutuante e passo de tempo variável, controlado automaticamente pelo algoritmo de Runge-Kutta com tolerância definida para o erro absoluto.

Na equação (1), o primeiro termo (em azul) representa a aceleração gravitacional direta exercida pelo planeta primário (no caso, Júpiter) sobre o satélite, expressa em um referencial centrado no próprio planeta e, portanto, não inercial. O segundo termo (alaranjado) descreve a soma das acelerações provocadas pelas forças gravitacionais exercidas por outros corpos massivos presentes no sistema, como os satélites galileanos e os demais planetas do Sistema Solar, que atuam como perturbações adicionais à órbita do satélite estudado. Já o terceiro termo (roxo) da equação corresponde à aceleração resultante do achatamento do planeta primário, causado por uma distribuição não homogênea de sua massa, que é representado pelo potencial gravitacional não esférico  $U_{J0}$ . Esse achatamento gera perturbações significativas na órbita do satélite ao longo de longos períodos. Por fim, o quarto termo (verde) expressa as acelerações indiretas decorrentes das perturbações que o achatamento do planeta exerce sobre os demais satélites e corpos presentes no sistema, afetando indiretamente também a órbita do satélite considerado. Juntos, esses termos garantem que todas as forças gravitacionais relevantes e os potenciais não-esféricos sejam considerados adequadamente, permitindo maior precisão nas soluções numéricas obtidas pelo código BOSS.

A Tabela 4 apresenta os principais parâmetros físicos e constantes dinâmicas adotados nas integrações numéricas realizadas neste trabalho. Esses valores foram utilizados como entrada no código BOSS e incluem, entre outros, a massa do planeta central e os coeficientes de achatamento gravitacional.

Tabela 4: Parâmetros físicos utilizados na modelagem gravitacional de Himália. Os valores estão expressos em unidades de massa solar ( $M_{\odot}$ ). Os índices numéricos representam, respectivamente: 10 refere-se a constante de normalização; 1-9 refere-se aos coeficientes; 301-

504 são os coeficientes associados a contribuições gravitacionais de outros planetas e satélites perturbadores.

	Parâmetro	Massa ( $M_{\odot}$ )
1	(599) Júpiter	$9.545942653785592 \times 10^{-4}$
2	(10) Sol	$1 \times 10^0$
3	(1) Mercúrio	$1.6601141530544803 \times 10^{-7}$
4	(2) Vênus	$2.4478382877865672 \times 10^{-6}$
5	(399) Terra	$3.694303343726377 \times 10^{-8}$
6	(301) Lua	$3.0034896145815207 \times 10^{-6}$
7	(4) Sistema de Marte	$3.2271560375546917 \times 10^{-7}$
8	(501) Io	$4.490855573440649 \times 10^{-8}$
9	(502) Europa	$2.413292841351281 \times 10^{-8}$
10	(503) Callisto	$7.45056000549478 \times 10^{-8}$
11	(504) Ganymede	$5.40966985863744 \times 10^{-8}$
12	(6) Sistema de Saturno	$2.8588567270480304 \times 10^{-4}$
13	(7) Sistema de Urano	$4.3662496626890934 \times 10^{-5}$
14	(8) Sistema de Netuno	$5.1513837726215274 \times 10^{-5}$
15	(9) Sistema de Plutão	$7.350487833457728 \times 10^{-9}$

A principal vantagem do código em sua flexibilidade: ele pode receber conjuntos observacionais extensos e heterogêneos, permitindo que o usuário atribua pesos diferenciados às observações com base em critérios como o catálogo estelar utilizado, tipo de instrumento, ou a precisão estimada da medida. Essa capacidade é bastante importante para lidar com a diversidade de dados astrométricos disponíveis para satélites como Himália.

As condições utilizadas neste trabalho foram extraídas da efeméride JUP344, disponibilizada pelo sistema Horizons do JPL. Os vetores de posição e velocidade iniciais referem-se ao sistema de coordenadas cartesianas (x, y, z), centrado no planeta Júpiter. A data de referência adotada para essas condições foi o dia juliano 2451545.0 (correspondente a 01/01/2000 as 12h TDB). O processo de ajuste orbital foi iniciado utilizando observações do intervalo de 1995 a 2020, uma vez que essa janela temporal apresentou melhor convergência durante os testes preliminares, devido à densidade e qualidade superior das observações mais recentes. A partir desse ajuste inicial, o conjunto de dados foi gradualmente expandido até cobrir o intervalo total de 1886 a 2022.

O processo de ajuste orbital utiliza os resíduos entre as posições observadas e calculadas para refinar os elementos orbitais iniciais, minimizando as discrepâncias por meio de interações sucessivas. A cada iteração, os parâmetros são ajustados com base nas equações variacionais mencionadas em Gomes Júnior (2018), que acompanham as integrações principais e relacionam

como uma pequena variação nas condições iniciais resultam em uma variação na posição em determinado instante. A cada iteração, os parâmetros orbitais são ajustados com base nas equações variacionais, que são integradas em paralelo às equações de movimento principais. Esse procedimento é repetido até que a convergência seja alcançada, resultando em um conjunto de condições iniciais ajustado, que melhor reproduz as observações disponíveis.

Durante esse processo, o vetor de estado da posição para o instante de referência passou por uma diferença, como por exemplo na tabela 5 é mostrado os valores das coordenadas de posição antes e após o primeiro ajuste, refletindo o refinamento promovido pelas observações incorporadas. A diferença total entre os valores de posição é da ordem de 246,64 km.

Tabela 5: Exemplo de coordenadas sendo “Antes” as coordenadas fornecidas pela efeméride JUP344 e “Depois” coordenadas geradas pelo código em uma das integrações.

Coordenadas	X (UA) ( $10^{-2}$ )	Y (UA) ( $10^{-2}$ )	Z (UA) ( $10^{-2}$ )
Antes	-3.2888370181549831	4.1919663285237545	5.3524674889825770
Depois	-3.2887266518342832	4.1921366962381836	5.3524156745323938

Com relação ao processo de ajuste utilizado, foi necessário adotar uma abordagem incremental. Inicialmente, os dados foram integrados utilizando o conjunto total de observações disponíveis, mas essa configuração não resultou em convergência satisfatória do modelo. Isso se deve, em parte, à sensibilidade do método de ajuste, que é baseado em uma aproximação de primeira ordem e, portanto, pode falhar quando confrontado com conjuntos observacionais que apresentam variações significativas. Além disso, algumas observações continham erros sistemáticos relevantes ou apresentavam dispersões muito além da média, o que comprometeu a estabilidade das integrações.

Diante desse cenário, optou-se por realizar os ajustes de forma gradual, inserindo os dados ano a ano. A cada nova inclusão, era avaliado se o modelo convergia de forma adequada. Quando a adição de novos dados resultava em divergência, o número de observações era temporariamente reduzido ou alguns pontos discrepantes eram removidos com base na análise dos resíduos. Esse processo permitiu construir um conjunto observacional coerente, garantindo uma base mais confiável para identificar subconjuntos de dados problemáticos e assegurar uma órbita preliminar mais precisa para Himália.

Como parte do processo de refinamento dos dados observacionais, foi aplicado um procedimento de sigma-clipping com o objetivo de remover observações discrepantes que



poderiam comprometer a convergência dos ajustes orbitais.<sup>3</sup> Essa técnica estatística consiste em eliminar os pontos que apresentam resíduos significativamente maiores do que a média esperada, com base em um valor de corte de desvio-padrão. Embora uma distribuição gaussiana justificasse o uso de 3 sigmas como limiar, mas devido à heterogeneidade dos dados (instrumentos, técnicas e épocas distintas), a distribuição pode apresentar caudas mais longas ou assimetrias. Assim, optou-se por um critério mais conservador de 5 sigmas, o que proporcionou uma margem de segurança maior na eliminação de outliers, reduzindo o risco de descartar dados válidos. Essa abordagem mostrou-se eficaz: 225 observações foram descartadas, representando uma fração pequena, mas relevante do total analisado. Essas remoções contribuíram para a estabilidade dos ajustes subsequentes e reduziram a influência de medidas historicamente imprecisas ou mal reduzidas.

O sigma-clipping foi aplicado às observações do intervalo de 1894 a 2022, abrangendo diferentes épocas, instrumentos e catálogos estelares, conforme listado no NSDB. O procedimento de sigma-clipping foi implementado no ambiente Python, utilizando o módulo `astropy.stats.sigma_clip` da biblioteca do Astropy<sup>3</sup>. A exclusão criteriosa desses pontos foi essencial para o sucesso das integrações posteriores e para obtenção de uma solução orbital mais estável e compatível com o restante dos dados.

---

<sup>3</sup> Para mais informações sobre o procedimento de sigma-clipping implementado, consulte a documentação do Astropy: [https://docs.astropy.org/en/stable/api/astropy.stats.sigma\\_clip.html](https://docs.astropy.org/en/stable/api/astropy.stats.sigma_clip.html)

## 5 RESULTADOS

Durante o processo de refinamento dos dados observacionais utilizados para as integrações orbitais, foram realizadas duas etapas principais de filtragem e exclusão de observações. Inicialmente, o conjunto original de dados continha 4599 observações astrométricas de Himália. No entanto, ao longo do processo incremental de ajuste ano a ano, 317 observações foram descartadas, principalmente por comprometerem a convergência do modelo ou por apresentarem resíduos sistemáticos identificados visualmente durante a análise dos ajustes parciais, resultando em 4282 posições remanescentes.

Posteriormente, foi aplicado um procedimento de sigma-clipping com limiar de 5 sigma sobre os resíduos obtidos com o modelo preliminar. Essa etapa permitiu identificar e remover observações estatisticamente discrepantes, levando à exclusão adicional de 225 observações. O conjunto final, portanto, passou a conter 4057 observações que compuseram o conjunto definitivo de dados utilizados nas integrações finais.

O conjunto final é estatisticamente mais coerente e compatível com as efemérides comparativas utilizadas neste trabalho, como a JUP344.

A Figura 2 mostra o gráfico dos resíduos das posições observadas em ascensão reta corrigida ( $\Delta\alpha^*$ ) e declinação ( $\Delta\delta$ ), expressos em segundos de arco, ao longo do tempo, após o descarte das 317 observações discrepantes no processo de convergência. Observa-se que, especialmente nas observações mais recentes (após o ano 2000), os resíduos estão concentrados em torno de zero com dispersão significativamente menor, refletindo a melhoria na qualidade instrumental, dos catálogos utilizados e da redução astrométrica. Já nas observações mais antigas, é possível notar uma maior dispersão, como esperado devido às limitações tecnológicas da época. Ainda assim, o conjunto como um todo mostra distribuição centrada próxima de zero, o que indica uma boa consistência global do modelo orbital ajustado.

A seguir, apresentam-se os gráficos de resíduos (Figuras: 1 e 2) finais obtidos após a aplicação dos ajustes orbitais sobre esse conjunto consolidado.

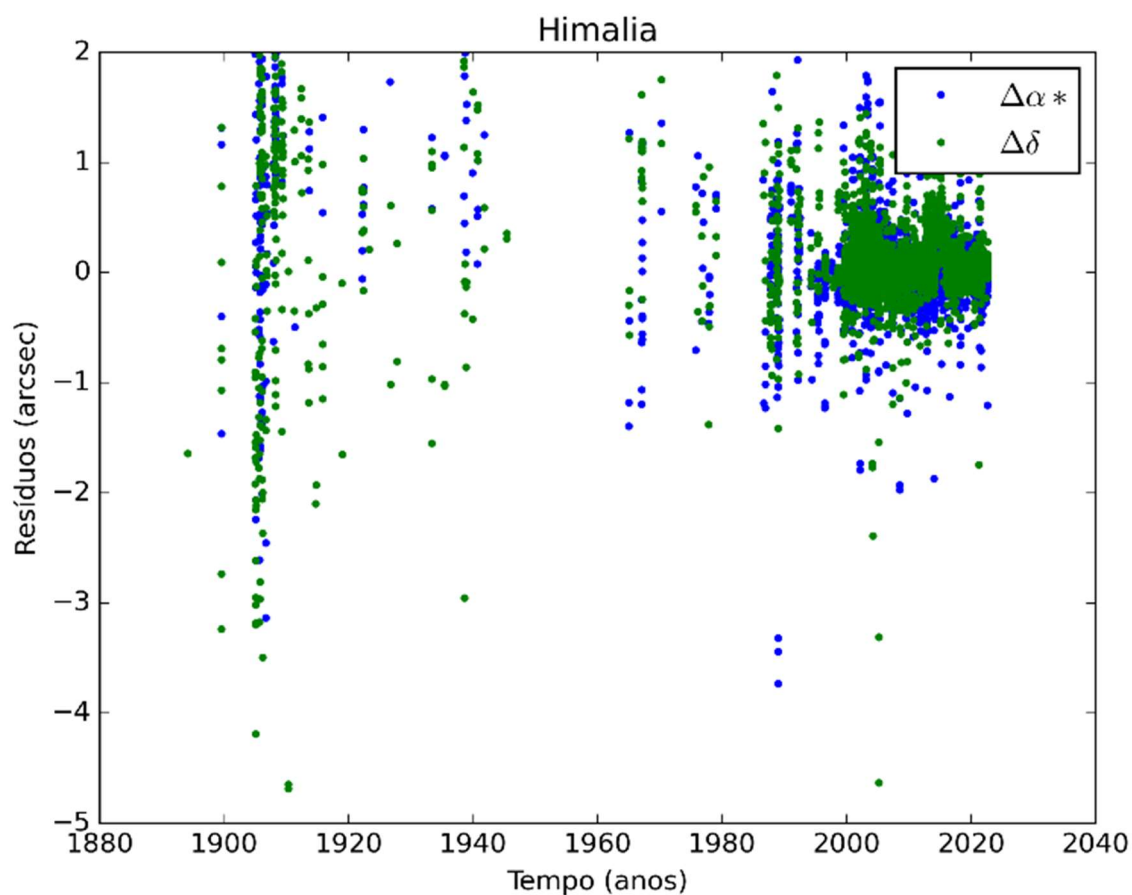


Figura 2: Gráfico referente aos resíduos ( $\Delta\alpha^*$  e  $\Delta\delta$ ) obtidos após a integração em função do tempo (anos).

Já na Figura 3 mostra os resíduos das posições em ascensão reta e declinação, expressos em segundos de arco, após a remoção adicional de 225 observações discrepantes por meio do critério de sigma-clipping. O padrão de dispersão ao longo das décadas torna-se ainda mais concentrado, com grande parte dos pontos contidos dentro da faixa de mais ou menos 1 segundo de arco. Esse resultado demonstra a eficácia do processo estatístico adotado na estabilização do ajuste orbital.

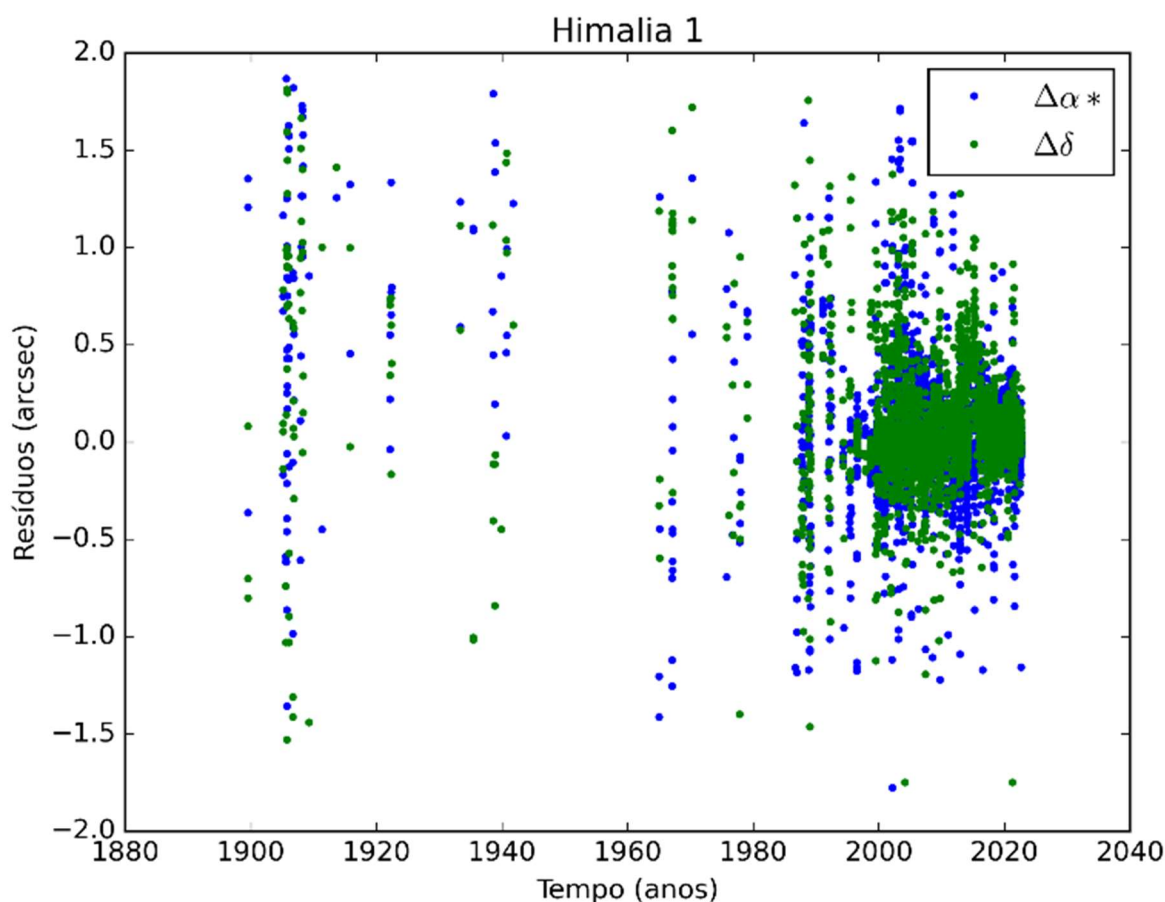


Figura 3: Gráfico referente aos resíduos ( $\Delta\alpha^*$  e  $\Delta\delta$ ) obtidos após a integração e aplicação do sigma-clipping em função do tempo (anos).

Ambos os gráficos são fundamentais para avaliar a qualidade dos ajustes e servem como diagnóstico para decisões futuras, como o refinamento adicional por catálogo e sítio, e ajustes diferenciados por qualidade observacional.

No entanto, ao longo do processo de ajuste realizado, os elementos orbitais sofreram ajustes progressivos com base no conjunto filtrado de observações. As condições iniciais utilizadas no início do ajuste, derivadas da efeméride JUP344 são descritas na Tabela 4, assim como a nova condição inicial ajustada obtida após o processo completo de ajuste orbital com base nas 4027 observações finais.

Tabela 4: Vetores de posição e velocidade de Himália antes e após o ajuste orbital. Os valores apresentados correspondem aos componentes do vetor de posição (UA) e do vetor velocidade (UA/dia) de Himália, obtidos antes e após o processo de ajuste orbital realizado com base em 4027 observações. A coluna de erros refere-se aos valores ajustados. Observa-se que a condição ajustada vale somente para a época J2000 (data gregoriana do dia 01/01/2000 às 12:00TT).

Componente	Valor inicial (JUP344)	Valor ajustado	Erro	Unidade
X	$-3.2888370181549831 \times 10^{-2}$	$-3.2888399980629465 \times 10^{-2}$	$8 \times 10^{-8}$	UA
Y	$4.1919663285237545 \times 10^{-2}$	$4.1920266734961943 \times 10^{-2}$	$6 \times 10^{-8}$	UA
Z	$5.3524674889825770 \times 10^{-2}$	$5.3524629111329769 \times 10^{-2}$	$4 \times 10^{-8}$	UA
V <sub>x</sub>	$-1.6281751040051232 \times 10^{-3}$	$-1.6281679222148872 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-9}$	UA/dia
V <sub>y</sub>	$-1.0237520653039894 \times 10^{-3}$	$-1.0237420812179007 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-9}$	UA/dia
V <sub>z</sub>	$2.5602039335333870 \times 10^{-4}$	$2.5604419102389546 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-9}$	UA/dia

As correções correspondentes a essa atualização foram aproximadamente de  $(-4 \pm 12)$  km em X,  $(90 \pm 9)$  km em Y e  $(-6 \pm 6)$  km em Z, enquanto nos componentes de velocidade as variações ficaram respectivamente  $(12 \pm 2) 10^{-6}$  km/s,  $(17 \pm 2) 10^{-6}$  km/s e  $(41 \pm 2) 10^{-6}$  km/s. Essa diferença, demonstra como ajustes baseados em um conjunto de observações filtradas e atualizadas podem afetar significativamente a trajetória prevista do satélite ao longo do tempo. A comparação gráfica entre a órbita calculada com essas condições e a fornecida pela JUP344 permite avaliar a sensibilidade e o impacto dos dados utilizados no modelo.

Após o término do ajuste orbital, o modelo resultante é então materializado sob a forma de efemérides. Para isso, uma nova integração numérica é realizada partindo das condições iniciais refinadas, gerando posições do satélite em uma malha temporal definida. A fim de permitir uma descrição funcional e contínua da órbita, essas posições são interpoladas por meio de polinômios de Chebyshev. Esses polinômios são ajustados localmente em intervalos curtos, permitindo que a posição do objeto seja recuperada com alta precisão para qualquer instante dentro do intervalo de validade.

Assim, foi gerado um arquivo no formato BSP (Binary SPK – Spacecraft and Planet Kernel), que contém as efemérides resultantes da solução orbital obtida. Esse arquivo armazena o caminho da órbita de Himália ao longo do tempo, permitindo sua utilização em softwares de análise astronômica, como o Spice Toolkit da NASA, e viabilizando aplicações práticas como análises dinâmicas mais refinadas e previsões de ocultações estelares. O arquivo BSP produzido neste estudo representa a solução orbital de Himália com base no conjunto de observações tratadas e ajustadas, e poderá ser atualizado futuramente à medida que novas observações forem incorporadas ao modelo.

Na Figura 4 as curvas representam a diferença nas coordenadas de ascensão reta corrigida ( $\Delta\alpha^*$ , em azul) e declinação ( $\Delta\delta$ , alaranjado) ao longo do tempo, entre a órbita ajustada neste trabalho e a efeméride JUP344. A oscilação dessas diferenças ao longo do tempo reflete as pequenas discrepâncias entre os modelos, que se mantêm dentro de uma faixa inferior a mais ou menos 80 milissegundos de arco (mas) durante todo o intervalo analisado. Embora

ambas as soluções apresentem comportamentos semelhantes em escala global, a órbita aqui ajustada foi gerada a partir de um subconjunto específico de observações astrométricas, processadas com a remoção de dados considerados discrepantes. Dessa forma, a diferença observada entre os modelos pode ser interpretada como uma consequência direta das escolhas metodológicas adotadas, incluindo os critérios de filtragem e o período coberto pelas observações, o que destaca a sensibilidade do modelo à composição do conjunto de dados utilizados

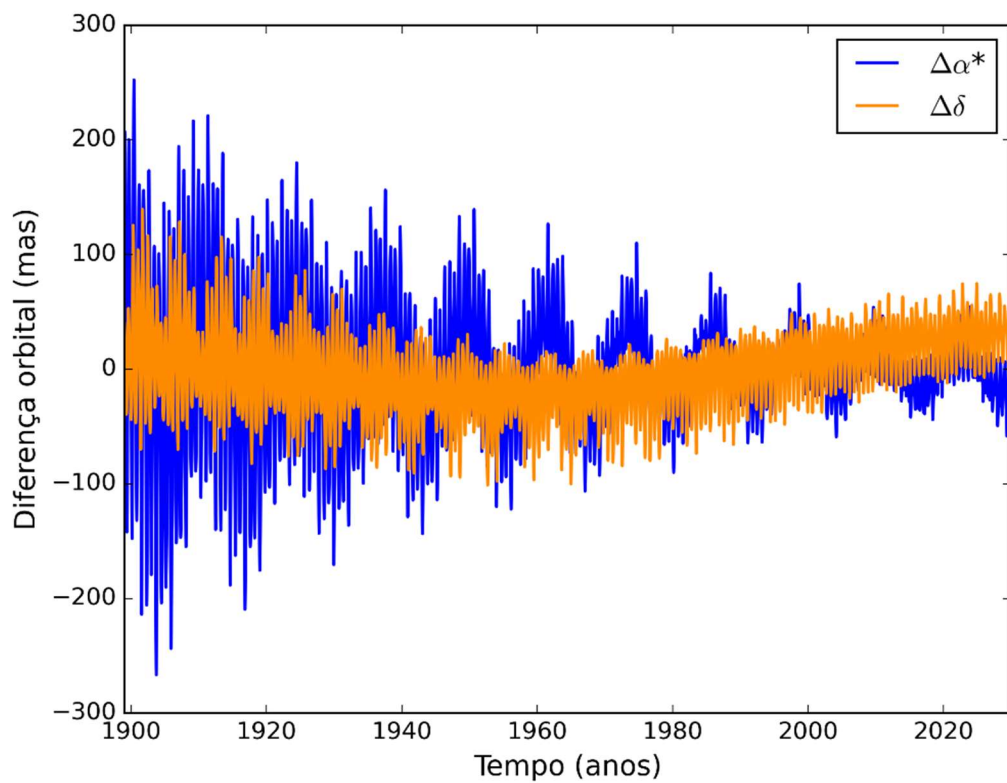


Figura 4: Diferença entre órbita ajustada neste trabalho e a efeméride JUP344, no intervalo de 1899 a 2029.

O gráfico da Figura 5 destaca a diferença entre a efeméride JUP344 e a solução orbital ajustada, focando no intervalo entre os anos de 1990 e 2030 (período em que há maior densidade de observações). Observa-se uma oscilação regular das diferenças entre os modelos orbitais, com amplitude inferior de mais ou menos 80 mas. Essa oscilação pode ser interpretada como uma diferença de paralaxe, ou seja, os dois modelos posicionam o satélite em distâncias ligeiramente diferentes ao longo do tempo, o que provoca pequenas variações angulares aparentes na direção da posição calculada no céu. Tais discrepâncias são esperadas entre

modelos distintos que foram ajustados com diferentes subconjuntos de dados e técnicas de ponderação.

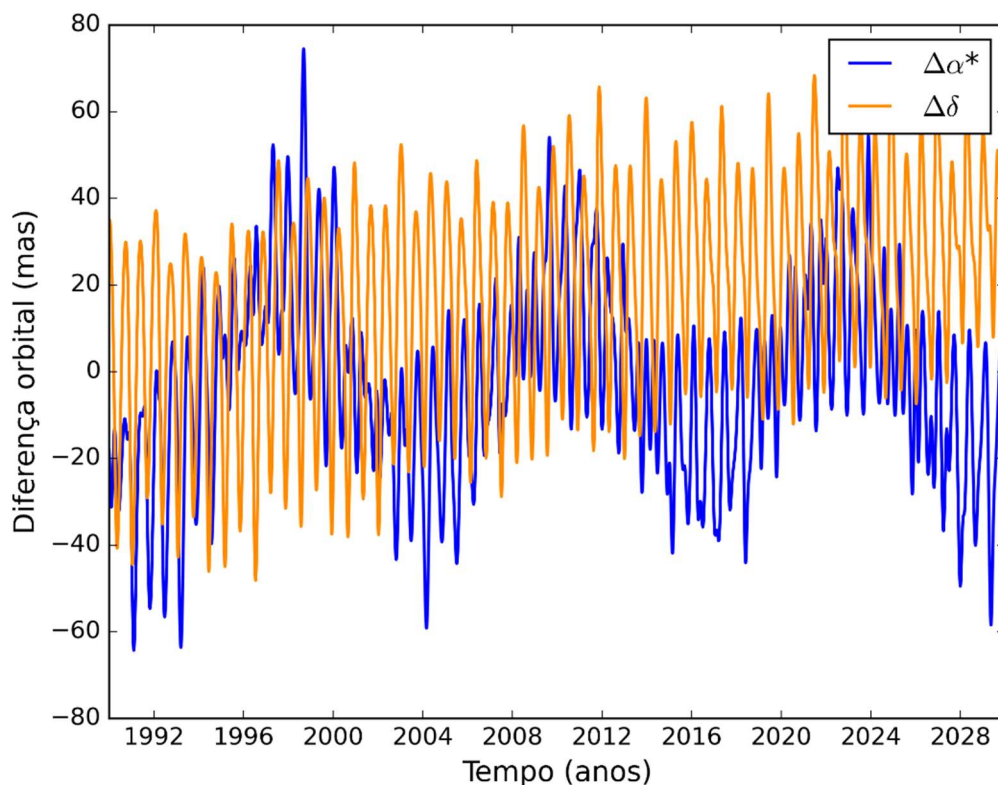


Figura 5: Diferença orbital entre as órbitas (Órbita Ajustada - JUP344), no intervalo de 1990 a 2030.

Além disso, nota-se que as discrepâncias em declinação ( $\Delta\delta$ , linha alaranjada) não apresentam oscilações coletivas como observado na outra grandeza, possuindo apenas variações aleatórias atribuídas a incertezas instrumentais e erros de redução astrométrica. Em contraste, as discrepâncias em ascensão reta ( $\Delta\alpha^*$ , linha azulada) exibem oscilações coletivas. Essas flutuações em  $\Delta\alpha^*$  estão relacionadas à natureza longitudinal da ascensão reta e a efeitos combinados de paralaxe. Entre eles, destacam-se variações de aproximadamente 9 meses, associadas à diferença na posição orbital do satélite durante sua órbita; variações anuais, decorrentes da mudança de posição da Terra ao longo de sua própria órbita; variações de longo prazo, como o ciclo de 12 anos vinculado ao movimento orbital de Júpiter. Essas oscilações resultam da diferença entre os dois modelos orbitais à medida que são projetados no céu a partir

de diferentes posições da Terra, reforçando a importância de se considerar cuidadosamente os efeitos de paralaxe na avaliação comparativa de efemérides.

Essas variações sutis, embora de pequena magnitude, reforçam a importância do refinamento contínuo das efemérides, especialmente para aplicações que demandam precisão miliarcsegundo, como previsões de ocultações estelares.

Por fim, é importante destacar que os resultados aqui apresentados ainda representam uma etapa preliminar do processo de ajuste orbital. A aplicação de pesos diferenciados por sítio observacional e catálogo estelar ainda será realizada em etapas futuras, o que poderá trazer ganhos adicionais de precisão. Portanto, os resultados obtidos até aqui devem ser considerados como base inicial promissora para o refinamento contínuo da órbita de Himália. Esses resultados preliminares demonstram o potencial da metodologia adotada e indicam que as próximas etapas de refinamento estatístico poderão elevar significativamente a acurácia da órbita de Himália, consolidando-a como referência para estudos futuros.



## 6 DISCUSSÃO

Os resultados obtidos neste trabalho demonstram que, mesmo com uma abordagem preliminar baseada apenas na eliminação criteriosa de observações discrepantes, é possível alcançar uma solução orbital para Himália comparável às efemérides presentes na literatura, como JUP344. A metodologia empregada que se baseia na combinação de integrações numéricas, ajustes sucessivos e tratamento estatístico via sigma-clipping, revelou-se eficaz na redução dos resíduos e na estabilização das órbitas ajustadas.

A comparação gráfica entre as soluções calculadas e a efeméride de referência mostrou que as discrepâncias se mantêm dentro de uma faixa estreita ( $\pm 80$  mas), o que reforça a confiabilidade da órbita neste estágio inicial. Isso evidencia que, mesmo sem a aplicação de pesos diferenciados, a simples filtragem sistemática dos dados já contribui de forma significativa para a melhora da precisão orbital.

Além disso, os gráficos de resíduos indicam que a maior parte das discrepâncias se concentram nas observações mais antigas, enquanto os dados mais recentes se alinham mais estreitamente ao modelo ajustado. Isso está em consonância com o avanço dos instrumentos astrométricos e dos catálogos estelares utilizados nas últimas décadas.

Apesar dos avanços obtidos com os ajustes iniciais, análises complementares indicam que ainda existem dispersões relevantes nos resíduos para determinados sítios observacionais. A Figura 6 apresenta histogramas dos resíduos para quatro sítios específicos: 689 (Flagstaff), T08 (ATLAS-MILO, Mauna Loa), T05 (ATLAS-HKO, Haleakala) e 874 (OPD). Nota-se que, embora todos apresentem uma concentração significativa de observações com resíduos próximos de zero, o que é esperado em um modelo bem ajustado, também há uma fração de pontos espalhados, com valores maiores de desvio.

Esses resíduos mais extremos sugerem a presença de observações com erros sistemáticos ou de menor qualidade, que ainda não foram removidas do conjunto final. Além disso, os gráficos revelam diferenças na distribuição dos resíduos entre os sítios, com alguns (como T08 e 874) apresentando picos mais concentrados e estreitos, enquanto outros (como 689 e T05) possuem distribuições mais assimétricas ou dispersas.

Esse padrão reforça a importância de aplicar um critério de sigma-clipping específico por sítio nas próximas etapas da análise, a fim de eliminar os pontos mais discrepantes e aprimorar ainda mais a coerência do ajuste orbital.

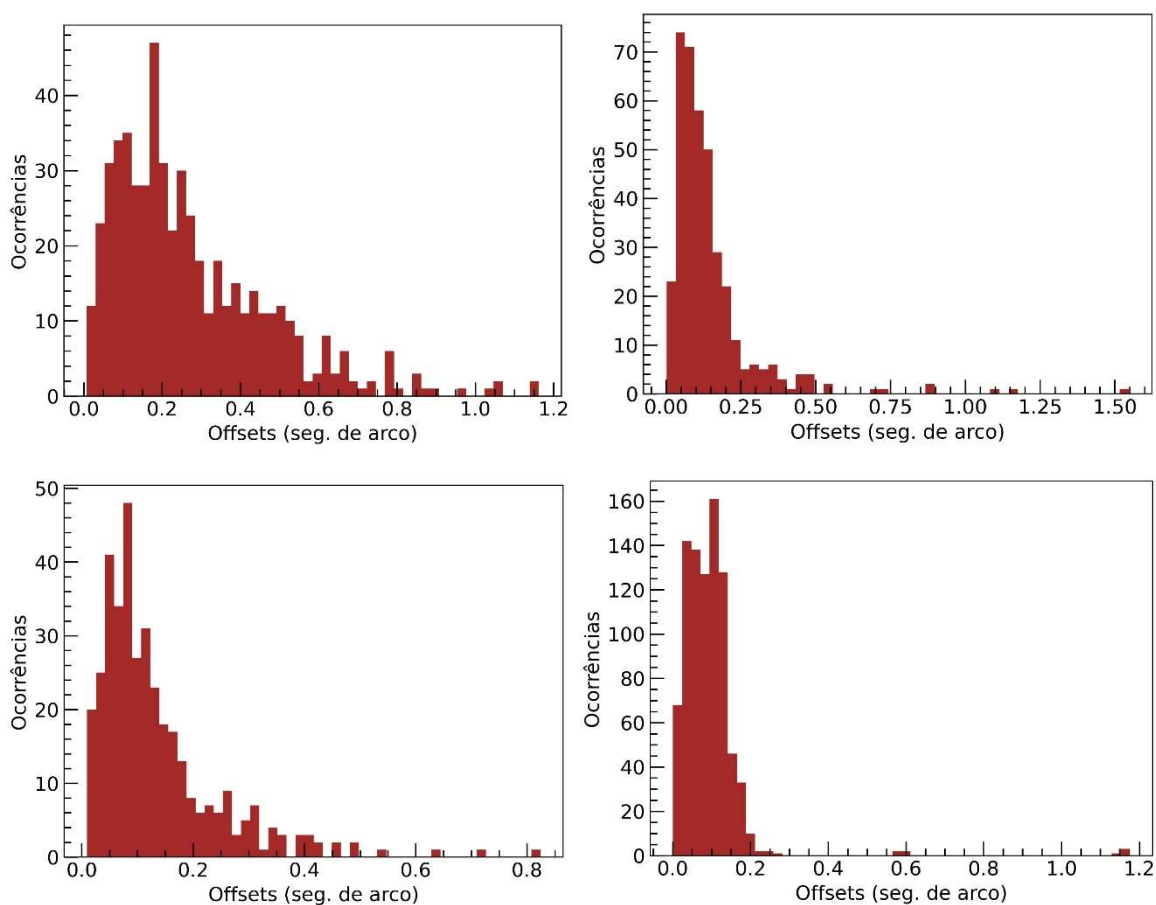


Figura 6: Histogramas dos resíduos observacionais para quatro sítios distintos. Painel superior esquerdo: 689; superior direito: T08; inferior esquerdo: T05; inferior direito: 874. Os gráficos mostram a distribuição dos offsets residuais (em segundos de arco) após o ajuste orbital, evidenciando diferentes padrões de dispersão entre os sítios.

Esse comportamento evidencia ainda que a simples aplicação de um sigma-clipping global, sem considerar a origem das observações, não é suficiente para eliminar todas as inconsistências do conjunto. Os histogramas analisados mostram que certos sítios ainda apresentam resíduos mais dispersos ou assimétricos, indicando uma possível necessidade de filtragens adicionais. Etapas futuras do trabalho deverão considerar a aplicação de sigma-clipping por sítio e por catálogo, além da atribuição de pesos diferenciados com base na qualidade estimada de cada observação. A remoção criteriosa de pontos discrepantes nesses subconjuntos deve contribuir para melhorar a consistência e a precisão do modelo orbital.

Essas medidas permitirão, por exemplo, reduzir o impacto de observações sistematicamente desviadas que ainda afetam a qualidade do ajuste, e aumentar a certeza do

modelo orbital em relação a variações locais na precisão observacional. Dessa forma, será possível alcançar efemérides ainda mais precisas.

Existem ainda conjuntos de posições astrométricas de Himália que não foram oficialmente publicados em periódicos revisados. Esses dados, ainda não foram incorporados à solução orbital ajustada. Sua adição em etapas futuras contribuirá para melhorar a densidade observacional e, conseqüentemente, aumentar a precisão das efemérides calculadas.

Outro fator relevante diz respeito aos diferentes catálogos estelares utilizados ao longo das décadas nas reduções astrométricas. Muitos dos catálogos mais antigos, como SAOC e AGK3, apresentam erros sistemáticos significativos Chesley et al. (2010), enquanto catálogos modernos como o UCAC e, especialmente, o Gaia DR2 oferecem muito mais precisão (Desmars et al., 2015; Gomes-Júnior, 2018). A consideração dessa heterogeneidade é essencial para que os pesos atribuídos às observações reflitam de maneira mais fiel sua confiabilidade e qualidade. Como discutido por Chesley et al. (2010), a não consideração dos efeitos de catálogo pode induzir viés sistemático nas efemérides. Assim, será fundamental implementar uma pesagem sofisticada baseada nos catálogos utilizados para garantir um modelo mais confiável e compatível com a qualidade esperada dos dados.

## 7 CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou uma abordagem metodológica voltada ao refinamento da órbita do satélite irregular de Júpiter, Himália. Por meio da aplicação de integrações numéricas com o código BOSS e de análises estatísticas baseadas na filtragem incremental e no sigma-clipping, foi possível obter uma solução orbital preliminar consistente com a efeméride JUP344, mas construída de forma independente e passível de atualizações contínuas.

Os resultados obtidos indicam que, mesmo sem a aplicação de pesos diferenciados por catálogo e sítio observacional, o ajuste orbital realizado com base nas observações tratadas resultou em uma solução coerente e compatível com os dados utilizados. A geração de um arquivo BSP a partir dessa solução permite sua aplicação prática em estudos dinâmicos e na precisão de ocultações estelares, representando um passo importante na construção de efemérides atualizáveis e adaptáveis à incorporação de novas observações.

A metodologia aqui empregada será estendida futuramente para o ajuste orbital de outros satélites irregulares de Júpiter. Um exemplo de destaque é o satélite JXLIV Kallichore, que vem sendo considerado como alvo potencial da missão JUICE (Jupiter Icy Moons Explores). A aplicação deste método a Kallichore poderá contribuir para a preparação observacional e científica da missão, utilizando a estratégia que vem sendo desenvolvida neste trabalho.

Portanto, os resultados obtidos constituem uma base sólida para o refinamento contínuo das efemérides de Himália e de outros satélites irregulares, com impacto direto em aplicações observacionais, modelagens dinâmicas e missões espaciais futuras.

## REFERÊNCIAS

- ANDERSSON, L. E.; BURKHEAD, M. S. Observations of the Satellite Jupiter VI. The Astronomical Journal, v. 75, n. 1381, p. 743, 1970. <https://doi.org/10.1086/111018>
- ANNALS OF HARVARD COLLEGE OBSERVATORY. Early observations of the sixth satellite of Jupiter. Annals of Harvard College Observatory, v. 60, n. 2, p. 33-43, 1908.
- ARLOT, J.-E.; VARFOLOMEEV, M. I.; EMELYANOV, N. V. Natural satellites database (NSDB) revisited. Astronomy & Astrophysics, v. 691, artigo A295, nov. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202452391>. Acesso em: 3 maio 2025. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202452391>
- BARNARD, E. E. Observations of the sixth satellite of Jupiter made with the 40-inch equatorial of the Yerkes Observatory. Astronomische Nachrichten, v. 172, n. 4112, p. 119-120, 1906. <https://doi.org/10.1002/asna.19061720803>
- BARNARD, E. E. Observations of the sixth satellite of Jupiter. The Astronomical Journal, v. 29, n. 682, p. 73–74, 1916. <https://doi.org/10.1086/104118>
- BENEDICT, G. R.; SHELUS, P. J.; MULHOLLAND, J. D. Astrometric observations of the faint satellites of Jupiter and minor planets, 1974–1977. The Astronomical Journal, v. 83, n. 1471, p. 999–1002, 1978. <https://doi.org/10.1086/112282>
- BOBONE, J. Observaciones del VI satélite de Júpiter. Astronomische Nachrichten, v. 268, n. 6418, p. 159–160, 1939. <https://doi.org/10.1002/asna.19392680907>
- BOBONE, J. Observaciones del VI satélite de Jupiter. The Astronomical Journal, v. 48, n. 1121, p. 187, 1940. <https://doi.org/10.1086/105602>
- BOBONE, Jorge. Observations of comets, Phoebe and Jupiter VI. Astronomical Journal, v. 58, p. 172, 1953. <https://doi.org/10.1086/106842>
- BORDOVITSYNA, Tat'iana Valentinovna; BYKOVA, Larisa Evgen'Evna. Teorii dvizheniia i efemeridy VI i VII sputnikov Iupitera na 1979–2000 gody. Tomsk: Izdatelstvo Tomskogo Universiteta, 1978.

BROZOVIĆ, M. Outer jovians with astrometry up to Nov 2020 — JUP344. Personal communication to Horizons/NAIF, 2021.

BURATTI, B. J.; THOMAS, P. C. Planetary satellites. In: WEISS, B. P.; McFADDEN, L. A.; JOHNSON, T. V. (ed.). *Encyclopedia of the Solar System*. 3. ed. San Diego: Academic Press, 2014. cap. 34, p. 759–777. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-415845-0.00034-7>

BURTON, H. E. Observations of satellite VI of Jupiter. *The Astronomical Journal*, v. 37, n. 887, p. 115, 1927. <https://doi.org/10.1086/104791>

BURTON, H. E. Observations of satellite VI of Jupiter. *The Astronomical Journal*, v. 38, n. 893, p. 59-60, 1928. <https://doi.org/10.1086/104810>

BURTON, H. E. Observations of the sixth satellite of Jupiter. *The Astronomical Journal*, v. 30, n. 713, p. 154–156, 1917. <https://doi.org/10.1086/104207>

CESCO, C. U.; KLEINRÖHLA, A. R. Observations of the satellites Jupiter VI and VII. *The Astronomical Journal*, v. 72, p. 951, 1967. <https://doi.org/10.1086/110367>

CHRISTIE, W. H. M. Further observations of the new eighth satellite of Jupiter (1908 CJ). *Astronomische Nachrichten*, v. 177, n. 4246, p. 367-368, 1908. <https://doi.org/10.1002/asna.19081772207>

CHRISTIE, W. H. M. Observações do sexto e sétimo satélites de Júpiter a partir de fotografias tiradas com o refletor de 30 polegadas da Thompson Equatorial durante a oposição 1906–1907. *Observações de Greenwich em Astronomia, Magnetismo e Meteorologia feitas no Observatório Real*, série 2, v. 69, p. G177–G195, 1909.

COWELL, P. H. Jupiter's eighth satellite. *Astronomische Nachrichten*, v. 184, n. 4393, p. 15–16, 1910. <https://doi.org/10.1002/asna.19101840111>

COWELL, P. H. Observations of a moving object near Jupiter from photographs taken at the Royal Observatory, Greenwich. *Astronomische Nachrichten*, v. 177, n. 4239, p. 235-236, 1908. <https://doi.org/10.1002/asna.19081771505>

DESMARS, J.; CAMARGO, J. I. B.; BRAGA-RIBAS, F.; et al. Orbit determination of trans-Neptunian objects and Centaurs for the prediction of stellar occultations. *Astronomy & Astrophysics*, v. 584, A96, 2015. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201526498>

EMELYANOV, N. V. et al. Results of astrometric observations of distant satellites of Jupiter with the new telescope of the Caucasus Mountain Observatory. *Solar System Research*, v. 54, p. 520–523, 2020. <https://doi.org/10.1134/S0038094620060027>

EPPEL, J. B. Observations of the sixth satellite of Jupiter. *The Astronomical Journal*, v. 29, n. 673–674, p. 10–11, 1915. <https://doi.org/10.1086/104081>

GOMES-JÚNIOR, A. R. Astrometria, efemérides e ocultações estelares de satélites irregulares e corpos do Sistema Solar exterior. 2018. Tese (Doutorado em Astronomia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Observatório do Valongo, Rio de Janeiro, 2018.

GOMES-JUNIOR, A. R. et al. Astrometric positions for 18 irregular satellites of giant planets from 23 years of observations. *Astronomy and Astrophysics*, v. 580, p. A76, 2015. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201526273>

GRAV, T. et al. NEOWISE: observations of the irregular satellites of Jupiter and Saturn. *The Astrophysical Journal*, v. 809, n. 1, p. 3, 2015. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/809/1/3>

GRAV, T.; HOLMAN, M. J.; GLADMAN, B. J.; AKSNES, K. Photometric survey of the irregular satellites. *Icarus*, v. 166, n. 1, p. 33–45, 2003. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2003.07.005>

GROSCH, H. R. J. The orbit of the eighth satellite of Jupiter. *The Astronomical Journal*, v. 53, n. 1170, p. 180–187, 1948. <https://doi.org/10.1086/106089>

HAYNES, E. S. Satellite, asteroid and photographic positions. *Lick Observatory Bulletin*, v. 8, n. 269, p. 141, 1914. <https://doi.org/10.5479/ADS/bib/1915LicOB.8.141H>

HERBIG, G. H. Observations of comets and asteroids. *Lick Observatory Bulletin*, v. 19, n. 515, p. 163–166, 1944. <https://doi.org/10.5479/ADS/bib/1944LicOB.19.163H>

HERBIG, G. H. Observations of comets and asteroids. *Lick Observatory Bulletin*, v. 19, n. 517, p. 171–173, 1945. <https://doi.org/10.5479/ADS/bib/1945LicOB.19.171H>

HERNIUS, O. et al. Astrometry of outer Jovian satellites from the Uppsala-ESO survey of asteroids and comets (UESAC). *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, v. 115, p. 295, 1996.

HOLT, Timothy R. et al. A cladistical analysis of the Jovian and Saturnian satellite systems. *The Astrophysical Journal*, v. 859, n. 2, p. 97, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aabe2c>. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aabe2c>

INTERNATIONAL ASTRONOMICAL UNION. IAU Circular No. 3603. 12 maio 1981.

JEFFERS, H. M. Observations of comets, asteroids, and Pluto. *Lick Observatory Bulletin*, v. 17, n. 460, p. 5–7, 1934. <https://doi.org/10.5479/ADS/bib/1934LicOB.17.5J>

JEFFERS, H. M.; ROEMER, E. Observations of comets and asteroids. *The Astronomical Journal*, v. 60, n. 1234, p. 440–442, 1955. <https://doi.org/10.1086/107254>

JEFFERS, H. M.; SWANSON, C. D. Observations of comets, Pluto, Aeneas, and Jupiter's satellite VIII. *Lick Observatory Bulletin*, v. 17, n. 475, p. 123–125, 1935. <https://doi.org/10.5479/ADS/bib/1935LicOB.17.123J>

JEFFERS, H. M.; VASILEVSKIS, S.; ROEMER, E. Observations of comets and asteroids. *The Astronomical Journal*, v. 59, n. 1220, p. 305–307, 1954. <https://doi.org/10.1086/107016>

KLEMOLA, A. R. Observations of the satellites Jupiter VI and VII. *Astronomical Journal*, v. 78, p. 226, 1973. <https://doi.org/10.1086/111403>

KNOX-SHAW, H. Observations of the eighth satellite of Jupiter at the opposition of 1912. *Khedivial Observatory Bulletin*, n. 7, p. 49–52, 1912.

KNOX-SHAW, H. Observations of the eighth satellite of Jupiter at the opposition of 1916. *Helwan Observatory Bulletin*, n. 19, p. 175–177, 1920.

KNOX-SHAW, H. Observations of the eighth satellite of Jupiter at the opposition of 1922. *Helwan Observatory Bulletin*, n. 25, p. 280–281, 1922.

KNOX-SHAW, H. Observations of the eighth satellite of Jupiter at the oppositions of 1913 and 1914. *Helwan Observatory Bulletin*, n. 18, p. 169–173, 1916.



KOPFF, A. Beobachtungen der äußeren Jupitermonde. *Astronomische Nachrichten*, v. 182, n. 4362, p. 303-304, 1909. <https://doi.org/10.1002/asna.19091821803>

KOWAL, C. T. et al. Thirteenth satellite of Jupiter. *The Astronomical Journal*, v. 80, n. 1433, p. 460–464, 1975. <https://doi.org/10.1086/111766>

LAMPLAND, C. O. Positions of Jupiter's eighth satellite. *The Astronomical Journal*, v. 44, n. 1024, p. 80, 1935. <https://doi.org/10.1086/105266>

LOSH, H. M.; NICHOLSON, S. B. Observations of the ninth satellite of Jupiter. *The Astronomical Journal*, v. 37, n. 882, p. 154-155, 1927. <https://doi.org/10.1086/104779>

METCALF, J. H. Asteroids and sixth satellite of Jupiter observed at Taunton. *Astronomische Nachrichten*, v. 184, n. 4414, p. 363-364, 1910. <https://doi.org/10.1002/asna.19101842205>

MINOR PLANET CENTER (MPC). Circular de Planetas Menores, n. 57573, 57792.

MINOR PLANET CENTER (MPC). Circular de Planetas Menores, n. 59305.

MINOR PLANET CENTER (MPC). Circular de Planetas Menores, n. 59581, 59860.

MINOR PLANET CENTER (MPC). Circular de Planetas Menores, n. 60085, 60086, 60268, 60451, 60647, 60906.

MINOR PLANET CENTER (MPC). Circular de Planetas Menores, n. 62565, 62566, 62864, 63122, 63123.

MINOR PLANET CENTER (MPC). Circular de Planetas Menores, n. 63356, 63357, 63358, 63359, 63360, 63361, 63362, 63584, 63806, 64093, 64482.

MINOR PLANET CENTER (MPC). Circular de Planetas Menores, n. 65919, 66450, 66685, 66686, 66904, 66905, 67130.

MINOR PLANET CENTER (MPC). Circular de Planetas Menores, n. 67395, 67668, 70653, 71528, 71952, 71953, 72435, 72436, 73049.

MINOR PLANET CENTER (MPC). Circular de Planetas Menores, n. 80451, 80452, 81140, 81141, 81614, 81615, 82022, 82459, 82866, 83281, 83713, 84739, 85501, 85502, 85982,

86334, 86335, 86776, 86777, 86778, 87199, 87200, 87618, 88086, 88461, 88462, 90966, 91852, 91853.

MINOR PLANET CENTER. Circulars 103147–103148, 104111–104116, 104988–104989, 105342–105343, 105714–105715, 108758–108759. Cambridge, MA: Minor Planet Center, [s.d.].

MINOR PLANET CENTER. Circulars 109227–109228, 109683–109684, 110172–110174, 110807–110808. Cambridge, MA: Minor Planet Center, [s.d.].

MINOR PLANET CENTER. Circulars 92468–92473, 93113, 93114, 93768, 97001, 97709–97711, 99412–99414, 99949, 99950, 100351, 100688, 102358. Cambridge, MA: Minor Planet Center, [s.d.].

MINOR PLANET CENTER. Communication. 04 mar. 2002.

MINOR PLANET CENTER. Communication. 06 ago. 2003.

MINOR PLANET CENTER. Communication. 14 jun. 2003.

MINOR PLANET CENTER. Communication. 20 mar. 2003.

MINOR PLANET CENTER. Communication. 22 set. 2003.

MINOR PLANET CENTER. Communication. 27 fev. 2003.

MINOR PLANET CENTER. MPC batch of December 2000. Cambridge, MA: Smithsonian Astrophysical Observatory, 2000.

MINOR PLANET CENTER. MPC Circulars, n. 115063–115064, 115988–115989. Cambridge, MA: Smithsonian Astrophysical Observatory, 2017.

MINOR PLANET CENTER. MPC Circulars, n. 132404, 136722–136726, 141297–141303, 142128–142135. Cambridge, MA: Smithsonian Astrophysical Observatory, 2022.

MINOR PLANET CENTER. MPC data received at NSDC 08 Jan 2003.

MINOR PLANET CENTER. MPC data received at NSDC, 05 dez. 2001. Cambridge, MA: Smithsonian Astrophysical Observatory, 2001.

MINOR PLANET CENTER. MPC data received at NSDC, 05 fev. 2002. Cambridge, MA: Smithsonian Astrophysical Observatory, 2002.

MINOR PLANET CENTER. MPC data received at NSDC, 05 set. 2001. Cambridge, MA: Smithsonian Astrophysical Observatory, 2001.

MINOR PLANET CENTER. MPC data received at NSDC, 30 maio 2002. Cambridge, MA: Smithsonian Astrophysical Observatory, 2002.

MINOR PLANET CENTER. MPC data received at NSDC, February to April 2001. Cambridge, MA: Smithsonian Astrophysical Observatory, 2001

MOREHOUSE, Daniel Walter; MEYER, William Ferdinand. Observations of the sixth, seventh, and eighth satellites of Jupiter. Lick Observatory Bulletin, n. 217, p. 77–78, 1912.  
<https://doi.org/10.5479/ADS/bib/1912LicOB.7.77M>

MPC. MPC 14149, 14150, 14683, 14684, 14697, 15211, 23374, 40904, 40905, 40906, 40907, 40908, 40909, 40910, 41261, 41449, 41829, 41830, 43757, 44181, 44182, 45045, 45333, 45334, 47502, 48616, 51180, 51181, 51366, 51367, 51496, 51497, 52163, 52313, 52314, 53464, 53946, 53947, 53948, 54161, 54162, 54163, 54343, 54557, 54697, 54823. Minor Planet Circulars, Cambridge, MA, 2003.

MPC. MPC 55975, 56147, 56148, 56607, 56608. Minor Planet Circulars, Cambridge, MA, 2004.

MPC. MPC 57110, 57416. Minor Planet Circulars, Cambridge, MA, 2005.

MPC. MPC 57573, 57792. Minor Planet Circulars, Cambridge, MA, 2005.

MPC. MPC 59305. Minor Planet Circulars, Cambridge, MA, 2006.

MULHOLLAND, J. D.; SHELUS, P. J. Observations of the 13th satellite of Jupiter during the 1975–1976 opposition. The Astronomical Journal, v. 82, n. 1454, p. 238, 1977.  
<https://doi.org/10.1086/112037>

MULHOLLAND, J. D.; SHELUS, P. J.; ABBOT, R. I. Astrometric observations of satellites of Jupiter and Saturn during 1973. Astronomical Journal, v. 81, p. 1007–1009, 1976.  
<https://doi.org/10.1086/111982>

MULHOLLAND, J. D.; SHELUS, P. J.; BENEDICT, G. F. Astrometric observations of the faint satellites of Jupiter during the 1975–1976 opposition. *The Astronomical Journal*, v. 84, p. 883–884, 1979. <https://doi.org/10.1086/112491>

NAKAMURA, T.; KINOSHITA, H.; KOSAI, H. Astrometric observations of the outer satellites of Jupiter during 1986–1990. *The Astronomical Journal*, v. 101, p. 290–296, 1991. <https://doi.org/10.1086/115688>

NAKAMURA, T.; SASAKI, G. Astrometric observations of the Jovian outer satellites for 1990–1992. *Astronomical Journal*, v. 115, n. 4, p. 1664–1666, 1998. <https://doi.org/10.1086/300300>

NESVORNÝ, D.; VOKROUHLICKÝ, D.; DEIENNO, R. Capture of irregular satellites at Jupiter. *The Astrophysical Journal*, v. 784, n. 1, p. 22, 2014. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/784/1/22>

NICHOLSON, P. D. et al. Irregular satellites of the giant planets. In: BARUCCI, M. A. et al. (org.). *The solar system beyond Neptune*. Tucson: University of Arizona Press, 2008. p. 411–424.

NICHOLSON, S. B. Discovery of the tenth and eleventh satellites of Jupiter and observations of these and other satellites. *The Astronomical Journal*, v. 48, n. 1114, p. 129–132, 1939. <https://doi.org/10.1086/105577>

NICHOLSON, S. B. Ninth satellite of Jupiter. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, v. 57, n. 338, p. 266, 1945. <https://doi.org/10.1086/125744>

NICHOLSON, S. B.; RICHMOND, M. L. Positions of Jupiter's satellites and asteroids. *The Astronomical Journal*, v. 45, n. 1056, p. 199–200, 1936. <https://doi.org/10.1086/105375>

NICHOLSON, S. B.; RICHMOND, M. L. Positions of Jupiter's satellites VI–XI, Saturn's satellite IX (Phoebe), and Pluto. *The Astronomical Journal*, v. 50, n. 1147, p. 163–164, 1943. <https://doi.org/10.1086/105760>

NICHOLSON, S. B.; SHAPLEY, H. Observations of the ninth satellite of Jupiter. *The Astronomical Journal*, v. 30, n. 710, p. 129–130, 1917. <https://doi.org/10.1086/104201>

NICHOLSON, S.; RICHMOND, M. Positions of Jupiter VIII and asteroids. The Astronomical Journal, v. 44, n. 1018, p. 32, 1934. <https://doi.org/10.1086/105248>

NICHOLSON, Seth B. Observations of the ninth satellite of Jupiter. The Astronomical Journal, v. 31, n. 730, p. 80, 1918. <https://doi.org/10.1086/104259>

NICHOLSON, Seth B. Observations of the seventh and eighth satellites of Jupiter. The Astronomical Journal, v. 31, n. 732, p. 94–95, 1918. <https://doi.org/10.1086/104267>

NICHOLSON, Seth Barnes. Discovery, observations and orbit of the ninth satellite of Jupiter. Lick Observatory Bulletin, v. 8, n. 265, p. 100–103, 1915. <https://doi.org/10.5479/ADS/bib/1915LicOB.8.147N>

NICHOLSON, Seth Barnes. Discovery, observations, and orbit of the ninth satellite of Jupiter (continued). Lick Observatory Bulletin, v. 8, n. 271, p. 147–149, 1915. <https://doi.org/10.5479/ADS/bib/1915LicOB.8.147N>

PEDRA, R. C. Posições dos planetas exteriores e muitos de seus satélites. V. Observações FASTT realizadas em 2000-2001. Revista Astronômica, v. 122, n. 5, p. 2723–2733, 2001. <https://doi.org/10.1086/323549>

PERRINE, C. D. Notices from the Lick Observatory. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, v. 17, n. 100, p. 22, 1905. <https://doi.org/10.1086/121619>

PICKERING, E. C. Observations of the eighth satellite of Jupiter. Astronomische Nachrichten, v. 178, n. 4253, p. 87-88, 1908. <https://doi.org/10.1002/asna.19081780508>

PORCO, C. C. et al. Cassini imaging of Jupiter's atmosphere, satellites, and rings. Science, v. 299, n. 5612, p. 1541–1547, 2003. <https://doi.org/10.1126/science.1079462>

RICE, Herbert L. Observations of the sixth satellite of Jupiter. The Astronomical Journal, v. 25, n. 588, p. 96, 1906. <https://doi.org/10.1086/103709>

RICHMOND, M. L.; NICHOLSON, S. B. Positions of Jupiter's satellites. The Astronomical Journal, v. 49, n. 1123, p. 9–11, 1940. <https://doi.org/10.1086/105609>

ROCHER, P.; CHAPRON, J. Observations and ephemerides of the faint satellites of Jupiter. Astronomy and Astrophysics, v. 311, p. 710–714, 1996.

ROEMER, E.; LLOYD, R. E. Observations of comets, minor planets, and satellites. The Astronomical Journal, v. 71, n. 1341, p. 443–457, 1966. <https://doi.org/10.1086/109949>

ROEMER, E.; THOMAS, M.; LLOYD, R. E. Observations of comets, minor planets, and Jupiter VIII. The Astronomical Journal, v. 71, n. 1342, p. 591–601, 1966. <https://doi.org/10.1086/109968>

SANFORD, R. F. Photographic measures of satellites and of comets. Lick Observatory Bulletin, v. 9, n. 293, p. 65–66, 1917.

SCHORR, R. Orter des VI. und VIII. Jupitersatelliten. Astronomische Nachrichten, v. 251, n. 6014, p. 209–216, 1934. <https://doi.org/10.1002/asna.19342511402>

SHANG, Y. J. et al. New CCD astrometric observations of Himália using Gaia DR2 in 2015–2021. The Astronomical Journal, v. 163, p. 210, 2022. <https://doi.org/10.3847/1538-3881/ac57c0>

SHAPLEY, H. Jupiter VIII. Harvard College Observatory, Announcement Card 610, 1941.

SHELUS, P. J. et al. Some 'lost' observations from McDonald Observatory of the faint outer satellites of Jupiter. The Astronomical Journal, v. 104, n. 2, p. 859–861, 1992. <https://doi.org/10.1086/116280>

SHELUS, P. J.; MULHOLLAND, J. D.; BENEDICT, G. F. Astrometric observations of the faint satellites of Jupiter during the 1976–1977 opposition. The Astronomical Journal, v. 84, p. 1642–1643, 1979. <https://doi.org/10.1086/112588>

SHELUS, P. J.; WHIPPLE, A. L.; BENEDICT, G. F. Astrometric observations of the faint outer satellites of Jupiter during the 1988–1989 opposition. The Astronomical Journal, v. 101, p. 1516–1517, 1991. <https://doi.org/10.1086/115784>

SHELUS, Peter J.; WHIPPLE, Arthur L.; BENEDICT, G. F. Astrometric observations of the faint outer satellites of Jupiter during the 1993 opposition. Astronomical Journal, v. 106, n. 6, p. 2573–2574, 1993. <https://doi.org/10.1086/116825>

SHEPPARD, S. S. Outer irregular satellites of the planets and their relationship with asteroids, comets and Kuiper Belt objects. In: FESTOU, M. C.; KELLEY, M. S.; TSIGARIDIS, K. (Ed.).

Comets II. Tucson: University of Arizona Press, 2005. p. 319–335.  
<https://doi.org/10.1017/S1743921305006824>

SHEPPARD, S. S.; JEWITT, D. C. An abundant population of small irregular satellites around Jupiter. *Nature*, v. 423, n. 6937, p. 261–263, 2003. <https://doi.org/10.1038/nature01584>

SOKOLOVA, A. Yu.; AMIRKHANYAN, V. R.; EMELYANOV, N. V.; KUIMOV, K. V. Position observations of the outer Jovian satellites. *Solar System Research*, 2006. (no prelo).

SOKOLOVA, A. Yu.; AMIRKHANYAN, V. R.; EMELYANOV, N. V.; KUIMOV, K. V. Position observations of the outer Jovian satellites. *Solar System Research*, 2006. No prelo.

SOULIÉ, G. Observations des satellites de Jupiter à Bordeaux en 1968. *Bulletin d'Informations du Centre de Données Stellaires*, v. 3, p. 129–133, 1972.

SOULIÉ, G. Positions de grosses planètes et de la Lune observées à l'équatorial photographique de 0,33 m. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, v. 6, p. 311–326, 1972.

SOULIÉ, G. Positions de grosses planètes et de la Lune observées à l'équatorial photographique de 0,33 m. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, v. 6, p. 311–326, 1972.

SOULIÉ, G. Positions de grosses planètes et de leurs satellites et de la Lune. *Journal des Observateurs*, v. 51, p. 315–323, 1968.

STONE, R. C. Positions for the outer planets and many of their satellites IV: FASTT observations taken in 1999–2000. *The Astronomical Journal*, v. 120, p. 2124–2130, 2000.  
<https://doi.org/10.1086/301577>

TANGA, P. et al. Gaia Data Release 3: The Solar System survey. *Astronomy & Astrophysics*, v. 674, A12, p. 1–32, 2023. Disponível em:  
[https://www.aanda.org/articles/aa/full\\_html/2023/06/aa43796-22/aa43796-22.html](https://www.aanda.org/articles/aa/full_html/2023/06/aa43796-22/aa43796-22.html). Acesso em: 17 de agosto 2025. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202243796>

UNITED STATES NAVAL OBSERVATORY. Equatorial observations, 1908–1926. *Publications of the U.S. Naval Observatory. Second Series*, v. 12, 1929.  
<https://doi.org/10.5479/ADS/bib/1929PUSNO.12.1H>

VAN BIESBROECK, G. Errata [Satellite VIII of Jupiter]. The Astronomical Journal, v. 35, n. 833, p. 140, 1924. <https://doi.org/10.1086/104613>

VAN BIESBROECK, G. Observations of comets and Jupiter IX with the 82-inch reflector of the McDonald observatory. The Astronomical Journal, v. 51, n. 1152, p. 111–112, 1945. <https://doi.org/10.1086/105838>

VAN BIESBROECK, G. Observations of faint satellites of Jupiter. The Astronomical Journal, v. 44, n. 1019, p. 39, 1934. <https://doi.org/10.1086/105246>

VAN BIESBROECK, G. Observations of Jupiter's satellites VI, VII, and VIII and of Phoebe. The Astronomical Journal, v. 34, n. 812, p. 167–168, 1922. <https://doi.org/10.1086/104537>

VAN BIESBROECK, G. Observations of Pluto and of the eighth satellite of Jupiter. The Astronomical Journal, v. 41, n. 961, p. 116–117, 1931. <https://doi.org/10.1086/105049>

VAN BIESBROECK, G. Observations of the outer satellites of Jupiter. The Astronomical Journal, v. 60, n. 1225, p. 38–47, 1955. <https://doi.org/10.1086/107112>

VAN BIESBROECK, G. Positions of planet Pluto and of Jupiter's satellite VIII. The Astronomical Journal, v. 42, n. 982, p. 106, 1932. <https://doi.org/10.1086/105124>

VAN BIESBROECK, G. Satellite VIII of Jupiter. The Astronomical Journal, v. 35, n. 830, p. 116, 1923. <https://doi.org/10.1086/104602>

VEIGA, C. H. Posições CCD para oito satélites irregulares jovianos. Astronomy and Astrophysics, v. 453, p. 349, 2006. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20054644>

WHIPPLE, A. L. et al. Astrometric observations of the faint outer satellites of Jupiter during the 1994 and 1995 oppositions. Astronomical Journal, v. 112, p. 316, 1996. <https://doi.org/10.1086/118017>

WHIPPLE, A. L.; SHELUS, P. J.; BENEDICT, G. F. Astrometric observations of the faint outer satellites of Jupiter during the 1989–1990 opposition. Astronomical Journal, v. 103, p. 617, 1992. <https://doi.org/10.1086/116089>



WHIPPLE, A. L.; SHELUS, P. J.; BENEDICT, G. F. Astrometric observations of the faint outer satellites of Jupiter during the 1990–1991 and 1991–1992 oppositions. *Astronomical Journal*, v. 105, n. 1, p. 347–349, 1993. <https://doi.org/10.1086/116432>

WOLF, M. Achter Jupiter-Satellit. *Astronomische Nachrichten*, v. 188, n. 4503, p. 259–260, 1911. <https://doi.org/10.1002/asna.19111881505>

WOLF, M. Orter des VI. und VIII. Jupitersatelliten. *Astronomische Nachrichten*, v. 243, n. 5819, p. 175–176, 1931. <https://doi.org/10.1002/asna.19312431103>

WOLF, M. Photographische Aufnahmen auf der Königstuhl-Sternwarte. *Astronomische Nachrichten*, v. 184, n. 4397, p. 85–86, 1910. <https://doi.org/10.1002/asna.19101840504>

WOLF, M. Photographische Aufnahmen von kleinen Planeten und Jupitermonden. *Astronomische Nachrichten*, v. 180, n. 4302, p. 101–104, 1909. <https://doi.org/10.1002/asna.19091800503>

WOLF, M. Über die Aufnahmen des VI Jupitermondes. *Astronomische Nachrichten*, v. 174, n. 4175, p. 361–362, 1907. <https://doi.org/10.1002/asna.19071742304>

YAN, D. et al. New accurate astrometric positions of Himália in 2016–2018 based on Gaia DR2. *Planetary and Space Science*, v. 179, p. 104712, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2019.104712>

YIZHAKOVICH, O. M.; ANDRUK, V. M.; PAKULIAK, L. K. Astrometric position catalogue of the outer satellites of Jupiter from photographic observations at the MAO NAS of Ukraine in 1987–1993. *Odessa Astronomical Publications*, v. 30, p. 201, 2017. <https://doi.org/10.18524/1810-4215.2017.30.114529>