

ASTROMETRIA, PREDIÇÃO DE OCULTAÇÕES ESTELARES E
EXPLORAÇÃO DE DADOS FOTOMÉTRICOS DO DES PARA TNOS E
CENTAUROS EM PREPARAÇÃO AO LSST.

Martín Valentín Banda Huarca

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Astronomia do Observatório Nacional/MCTIC, como parte dos requisitos necessários à obtenção do Grau de Doutor em Astronomia.

Orientadores: Júlio Ignácio Bueno de Camargo
Ricardo L. Correia Ogando

Rio de Janeiro
Março de 2020

DIVISÃO DE PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO

DECLARAÇÃO

Declaro para os devidos fins que **Martín Valentín Banda Huarca**, aluno do Programa de Pós-Graduação em Astronomia deste Observatório Nacional – MCTIC, em nível de Doutorado, sob a orientação do Dr. Julio Ignacio Bueno de Camargo – ON-MCTIC, defendeu publicamente, no dia 23 de março de 2020, sua tese de Doutorado intitulada **“ASTROMETRIA, PREDIÇÃO DE OCULTAÇÕES ESTELARES E EXPLORAÇÃO DE DADOS FOTOMÉTRICOS DO DES PARA TNOS E CENTAUROS EM PREPARAÇÃO AO LSST.”**, perante a banca examinadora designada pela Comissão de Pós-Graduação em Astronomia e constituída pelos Doutores Julio Ignacio Bueno de Camargo - ON/MCTIC, orientador do candidato e presidente da banca; Ricardo Lourenço Correia Ogando - ON/MCTIC, coorientador do candidato; Jorge Marcio Ferreira Carvano- ON/MCTIC, Fernando Virgílio Roig - ON/MCTIC, Bruno Sicardy - Observatório de Paris - França, Gonzalo Tancredi - Universidade da República- Uruguai, como membros titulares; e os Doutores Mario Nascimento De Prá - Space Institute - Flórida e Alvaro Augusto Alvarez Candal - ON/MCTIC, como membros suplentes, a qual foi considerado **APROVADO**.

Rio de Janeiro, 08 de abril de 2020.



Jorge Marcio Ferreira Carvano
Coordenador do Programa de Pós-graduação em Astronomia
Chefe da Divisão de Pós-graduação (Pró-Reitor)
Pesquisador Titular/Senior Researcher
Observatório Nacional/ MCTIC
rua Gal. José Cristino 77
Rio de Janeiro - Brasil
+55 21 3504-9196

ASTROMETRIA, PREDIÇÃO DE OCULTAÇÕES ESTELARES E
EXPLORAÇÃO DE DADOS FOTOMÉTRICOS DO DES PARA TNOS E
CENTAUROS EM PREPARAÇÃO AO LSST.

Martín Valentín Banda Huarca

TESE SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ASTRONOMIA DO OBSERVATÓRIO NACIONAL/MCTIC COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
DOUTOR EM ASTRONOMIA.

Examinada por:

Dr. Julio Ignacio Bueno de Camargo - orientador, ON/MCTIC

Dr. Ricardo Lourenço Correia Ogando - co-orientador, ON/MCTIC

Dr. Bruno Sicardy, Observatório de Paris, França

Dr. Gonzalo Tancredi, Universidade da República, Uruguai

Dr. Fernando Virgílio Roig, ON/MCTIC

Dr. Jorge Márcio Ferreira Carvano, ON/MCTIC

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO DE 2020

Banda Huarca, Martín Valentín

Astrometria, predição de ocultações estelares e exploração de dados fotométricos do DES para TNOs e Centauros em preparação ao LSST./Martín Valentín Banda Huarca. – Rio de Janeiro: ON/MCTIC 2020.

XIX, 184 p.: il.; 29,7cm.

Orientadores: Júlio Ignácio Bueno de Camargo

Ricardo L. Correia Ogando

Tese (doutorado) – ON/MCTIC/Programa de pós-graduação em Astronomia, 2020.

Referências Bibliográficas: p. 158 – 168.

1. Região transnetuniana.
 2. grandes massas de dados.
 3. Dark Energy Survey.
 4. LSST.
 5. astrometria.
 6. fotometria.
- I. Bueno de Camargo, Júlio Ignácio.
et al. II. Observatório Nacional/MCTI, Programa de Pós-graduação em Astronomia. III. Título.

*O sucesso é a soma de pequenos
esforços repetidos dia após dia.
Robert Collier*

Agradecimentos

Gostaria de agradecer às pessoas que contribuíram de forma direta ou indireta na realização deste trabalho, em especial:

Ao meus pais, Victor e Eufemia, pelo apoio incondicional e por me guiar sempre pelo caminho da educação.

Ao meu orientador, Dr. Júlio Camargo, pela paciência, dedicação de seu tempo e toda ajuda fornecida para o desenvolvimento do trabalho ao longo do período do doutorado.

Ao meu co-orientador, Dr. Ricardo Ogando, pelas sugestões fornecidas tanto na área de informática quanto no encaminhamento do trabalho.

Ao Dr. Nicolaci da Costa, pela coordenação do projeto de implementação de um portal para o estudo de pequenos corpos do Sistema Solar.

Ao Tecnologista Glauber Costa, pela colaboração no desenvolvimento do portal.

Ao Dr. Josselin Desmars, pelo auxílio prestado com o programa NIMA.

Ao pessoal do LIInA, pelo suporte em informática.

Ao grupo do Rio, Dr. Roberto pela motivação e seus conselhos para um bom encaminhamento do trabalho, Dr. Altair pelo auxílio prestado com o código mapas de predição.

Ao Observatório Nacional, por me dar a oportunidade de estudar e crescer profissionalmente.

Ao CAPES, pelo apoio financeiro durante os quatro anos do doutorado.

Aos colegas de moradia: Jessica, Tiago, Hillysson, Adriano, e Alexandre por compartilhar incontáveis experiências no dia a dia.

Aos amigos, por compartilhar momentos agradáveis no período do doutorado.

Resumo

O Levantamento da Energia Escura - *Dark Energy Survey* (DES) - é um esforço colaborativo internacional para revelar a natureza da misteriosa energia escura, responsável pela expansão acelerada do Universo. Para isso, o levantamento mapeou cerca de 5.000 graus quadrados do hemisfério sul celeste ao longo de 6 anos (2013 – 2019) e em 5 filtros ópticos.

Entre as centenas de milhões de galáxias observadas, alvos prioritários do DES, mais de cem mil objetos do Sistema Solar foram observados. Com isso, o DES constitui também um tesouro astrométrico e fotométrico para o estudo de pequenos corpos, e sua exploração motiva o desenvolvimento de ferramentas para o trabalho com grandes massas de dados. Neste contexto - estudo do Sistema Solar e grandes massas de dados - deve-se citar o *Large Synoptic Survey Telescope*¹ (LSST).

O LSST irá varrer o céu visível desde Cerro Pachón 3 vezes a cada 10 dias, registrando objetos tão tênues quanto $r = 23,5$ em imagens de época simples (isto é, não coadicionadas). Em particular, milhões de asteroides e dezenas de milhares de TNOs e Centauros serão observados. Eventos transientes, objetos móveis entre eles, serão disseminados pelo LSST através de alarmes, cerca de dez milhões por noite. Assim, dada a rica e volumosa massa de dados, seu aproveitamento é de interesse e requer preparo. Tendo isto em conta, este trabalho serviu-se das imagens tomadas ao longo dos 3 primeiros anos de DES para construir um portal visando a predição de ocultações estelares por pequenos corpos do Sistema Solar. Ainda, foi feita uma análise do potencial fotométrico das imagens de época simples.

Esse portal contempla encontrar imagens com objetos do Sistema Solar entre os milhões de CCDs registrados pelo DES (dados a data de observação, coordenadas de apontamento e tamanho do campo), seleção dessas imagens (aquelas com TNOs e Centauros no presente caso), astrometria, refinamento de órbita e predição de ocultações estelares a partir da órbita refinada. A segunda liberação de dados da missão espacial Gaia - Gaia DR2 - promoveu um salto na qualidade das predições. A análise das curvas de luz oriundas da observação das ocultações, bem como tarefas ligadas à organização de campanhas internacionais de observação desses eventos, são parte desse portal e serão ainda implementadas. Esse portal é ferramenta inédita no estudo de pequenos corpos a partir de ocultações estelares e dará impulso sem precedentes aos trabalhos efetuados por nosso grupo de pesquisa.

A análise do potencial fotométrico descreve a contribuição que pode ser obtida a partir da fotometria multifiltro oriunda do DES para a região transnetuniana. Em particular, foram abordadas curvas rotacionais, classificação taxonômica, magnitudes absolutas e inclinações da curva de fase para um grupo selecionado de objetos.

¹Em janeiro de 2020 o nome foi trocado para: Legacy Survey of Space and Time.

Além do preparo de ferramentas para exploração fotométrica de pequenos corpos, os resultados obtidos atestam a contribuição que os dados oriundos de 6 anos de observações do DES deverão oferecer ao estudo desses corpos. Vale lembrar que, além de poucas centenas de TNOs, o DES observou mais de 100.000 asteroides em seus 3 primeiros anos de operação. No que diz respeito aos TNOs, este trabalho acrescentou informações fotométricas àqueles existentes na literatura, como magnitudes absolutas em diferentes filtros e taxonomia.

Palavras-chave: Região transnetuniana, grandes massas de dados, *Dark energy Survey*, LSST, astrometria, fotometria.

Abstract

The Dark Energy Survey (DES) is an international collaborative effort to reveal the nature of the mysterious dark energy which is responsible for the accelerated expansion of the universe. For this, the survey mapped about 5.000 square degrees of the southern hemisphere sky over 6 years (2013 – 2019) and on 5 optical filters.

Among the hundreds of millions of galaxies observed, DES priority targets, more than 100 000 solar system objects have been observed. Thus, DES is also an astrometric and photometric treasure for the study of small bodies, and its exploration motivates the development of tools for working with big data. In this context -study of the solar system and big data - the *Large Synoptic Survey Telescope*² (LSST) should be cited.

LSST will observe the visible sky from Cerro Pachón three times every ten days, registering objects as faint as $r = 23, 5$ in single-epoch images (ie, non-coadditioned). In particular, millions of asteroids and tens of thousands of TNOs and Centaurs will be observed. Transient events, moving objects among them, will be disseminated by LSST through alarms, about ten million a night. Thus, given the rich and voluminous mass of data, its use is of interest and requires preparation. Taking this into account, this work used the images taken during the first three years of DES to construct a portal for the prediction of stellar occultations by small solar system bodies. In addition, an analysis of the photometric potential of single-epoch images was done.

This portal contemplates finding images with solar system objects among the millions of CCDs registered by DES (given the observation date, pointing coordinates and field of view), selection of these images (those with TNOs and Centaurs in the present case), astrometry, orbit refinement and prediction of stellar occultations from the refined orbit. The second release of data from the Gaia space mission - Gaia DR2 - promoted a leap in prediction quality. The analysis of light curves from observation of the occultations, as well as tasks related to the organization of international observation campaigns of these events, are part of this portal and will be implemented. This portal is an unprecedented tool in the study of small bodies from stellar occultations and will give unprecedented impetus to the works done by our research group.

The photometric potential analysis describes the contribution that can be obtained from the multifilter photometry from the DES to the transnetunian region. In particular, rotational curves, taxonomic classification, absolute magnitudes, phase curves and their inclinations were addressed for a selected group of objects. In ad-

²In January 2020 the name was changed to: Legacy Survey of Space and Time.

dition to the preparation of tools for photometric exploration of small bodies, the results attest to the contribution that data from 6 years of DES observations should offer to the study of these bodies. It is worth remembering that, in addition to a few hundred TNOs, DES observed more than 100.000 asteroids in its first three years of operation. With regard to TNOs, this work added photometric information to those existing in the literature, such as absolute magnitudes in different filters and taxonomy.

Keywords: Transnetunian region, big data, *Dark Energy Survey*, LSST, astrometry, photometry.

Sumário

Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas	xviii
1 Introdução	1
1.1 Breve histórico dos TNOs	3
1.2 Esboço da tese	7
2 Material observacional	9
2.1 Dark Energy Survey	9
2.2 Dark Energy Camera	10
2.2.1 Filtros	14
2.3 Processamento de dados	15
2.4 Dados	16
3 Procedimentos e Softwares	20
3.1 Obtenção dos metadados do DES	20
3.1.1 easyaccess	22
3.2 Identificação de objetos em imagens CCDs	23
3.2.1 SkyBoT	26
3.3 Obtenção das imagens CCDs	31
3.4 Determinação de posições astrométricas	32
3.4.1 PRAIA	34
3.5 Refinamento das órbitas	36
3.5.1 NIMA	38
3.5.2 SPICE	40
3.6 Predição de ocultações estelares	42
3.6.1 PRAIA OCC	47
3.6.2 Mapa de predição de ocultação	47
4 Análises e Resultados: astrometria e refinamento de órbitas	48
4.1 Filtragem	48

4.2	Organização	49
4.2.1	A tabela de extensão: justificativa	50
4.3	Precisão	51
4.4	Cronometragem	55
4.5	Eficiência de detecção	55
4.6	Órbitas	57
4.7	O plano excentricidade - semieixo maior	59
4.8	Mapas de ocultação	60
4.9	Efeitos de fase sobre a posição	65
4.10	Precisão em posição - estimando até onde podemos ir	66
5	Aplicação Web	74
5.1	Conceitos preliminares	74
5.2	Metodologia	75
5.3	Visão geral da interface	78
5.3.1	Usuários	79
5.4	Obtenção de metadados	80
5.5	Pipeline Search SSSO	82
5.5.1	Componente Search Objects	83
5.5.2	Componente Match metadata - objects	84
5.5.3	Input/Output do pipeline	84
5.6	Filter Objects	86
5.6.1	Input/output	87
5.7	Pipeline Astrometria	88
5.7.1	Componente: Astrometry	89
5.7.2	Componente: Search objects positions	91
5.7.3	Input/output do pipeline	92
5.8	Pipeline: Refinamento de órbita	94
5.8.1	Componente: Get object data	95
5.8.2	Componente: Refine Orbit	96
5.8.3	Input/output do pipeline	96
5.9	Pipeline predição de ocultações	98
5.9.1	Componente: Generate ephemeris	100
5.9.2	Componente: Search neighboring stars	101
5.9.3	Componente: Search candidate stars	103
6	Exploração dos dados fotométricos do DES - possíveis contribuições ao estudo de pequenos corpos	106
6.1	Fotometria oriunda do DES	108
6.1.1	Rotação	109

6.1.2	Magnitudes absolutas e inclinação devida à fase	119
6.1.3	Classificação taxonômica	139
7	Conclusões e perspectivas futuras	156
	Referências Bibliográficas	158
A	Artigo publicado	169

Lista de Figuras

1.1	Ocultações detectadas por ano (TNOs mais centauros) desde 2009, excluindo Plutão.	2
1.2	Histograma do número de TNOs e Centauros descobertos por ano, usando dados do Minor Planet Center (31 de dezembro de 2019). . .	4
1.3	Classe dinâmica dos pequenos corpos do Sistema Solar exterior. . . .	6
2.1	Footprint do DES (linha preta) projetado na esfera celeste, mostrando também os planos galáctico (linha vermelha) e a eclíptica (linha azul). 10	
2.2	Vista esquemática da DECam e o telescópio Blanco de 4 m.	11
2.3	Observatório Interamericano de Cerro Tololo ao pôr do sol.	11
2.4	Orientação no céu do mosaico de CCDs da DECam	12
2.5	Imagem tirada em 2012 com a DECam, mostrando parte da constelação de Fornax.	13
2.6	Banda passante padrão do DR1 para os filtros <i>grizY</i> da DECam. . .	15
2.7	Histograma do tempo de exposição usado para fazer as observações DES DR1.	18
2.8	Histograma dos apontamentos do DES DR1 distribuídos ao longo do tempo.	18
2.9	Histograma dos apontamentos do DES DR1 por cada banda da DECam. 19	
2.10	Projeção na esfera celeste dos apontamentos do DES DR1.	19
3.1	Screenshot da ferramenta easyaccess, onde as consultas no banco de dados do DES são feitas.	22
3.2	Histograma da magnitude dos TNOs/Centauros, e demais corpos. . .	25
3.3	Histograma do semieixo maior dos objetos identificados pelo SkyBoT. 26	
3.4	Interface web do serviço SkyBoT.	27
3.5	Imagem CCD gerada pela DECam na data 09-09-2013, com tempo de exposição de 90 segundos, onde identificamos o TNO Eris (mag = 18, 8). 32	
3.6	Diferença em ascensão reta (esquerda) e declinação (direita) entre as efemérides NIMA e JPL (linha preta).	38
3.7	Geometria do sistema Terra-TNO, para calcular o raio de busca θ . . .	43

3.8	Configuração geométrica dos parâmetros para uma ocultação estelar por um TNO.	44
3.9	Geometria de um mapa de predição de ocultação.	45
3.10	Mapa de predição de ocultação estelar pelo TNO 1999 RB ₂₁₆	46
4.1	Projeção Hammer-Aitoff da esfera celeste para os TNOs (pontos vermelhos) e Centauros (estrelas azuis).	51
4.2	Incerteza na posição em função da magnitude e do número de observações em ascensão reta (painéis da esquerda) e declinação (painéis da direita) para os TNOs e Centauros nas tabelas 4.4 e 4.5	53
4.3	Eficiência de detecção em função da magnitude.	57
4.4	Exemplo de refinamento de órbita para o TNO (137295) 1999 RB ₂₁₆	59
4.5	Distribuição dos TNOs e Centauros cujas órbitas foram refinadas (círculos vermelhos, diamantes laranjas, triângulos azuis e pentágonos magentas), juntamente com outros retirados do MPC (pequenos pontos pretos), no plano $a \times e$	60
4.6	Exemplo de resultado de predição para o TNO (137295) 1999 RB ₂₁₆	61
4.7	Representação geométrica do efeito de fase.	65
4.8	Extrato de imagem com o TNO Éris destacado pelo círculo verde.	71
4.9	Extrato de imagem com o TNO 2004 TY ₃₆₄ destacado pelo círculo verde.	71
4.10	Diferença em ascensão reta (esquerda) e declinação (direita) entre as efemérides NIMA e JPL (linha preta) para o TNO 2004 TY ₃₆₄	72
4.11	Diferença em ascensão reta (esquerda) e declinação (direita) entre as efemérides NIMA e JPL (linha preta) para Éris.	73
5.1	Desenho da aplicação web do projeto TNO, mostrando as diferentes etapas, serviços, ferramentas e clusters.	77
5.2	Fluxograma de todo o processo de predição de ocultações estelares por TNOs/Centauros identificados nas imagens do DES.	77
5.3	Interface da aplicação web para fazer o estudo de objetos do Sistema Solar.	79
5.4	Seleção dos parâmetros de entrada através da interface gráfica.	80
5.5	Visualização dos metadados obtidos, correspondente a 135.525 exposições (13.762.500 imagens CCD) gerados nos seis anos de operação do DES.	81
5.6	Histogramas das exposições do DES, por ano, tempo de exposição e banda.	82

5.7	Objetos identificados (pontos vermelhos) pelo SkyBoT numa região circular dentro da qual estão os CCDs (retângulos azuis) que compõem a DECam.	83
5.8	Interface gráfica da seleção de parâmetros de entrada, onde também é mostrado o histórico dos processos.	85
5.9	Resultado do pipeline SSSO. Visualização dos objetos identificados, onde a coluna “Exp Num” representa o número da exposição.	86
5.10	Interface do “Filter Objects”	87
5.11	Resultado do “Filter objects”. Estatística e lista de TNOs encontrados.	88
5.12	Círculo (linha vermelha) dentro da qual se encontram as estrelas (pontos azuis) e a imagem CCD (linhas pretas).	90
5.13	Área de cobertura de uma imagem CCD, mostrando as estrelas (pontos azuis) e o TNO Eris (ponto vermelho).	92
5.14	Visualização dos resultados do pipeline Astrometry para os Centauros identificados nas imagens CCDs do DES.	93
5.15	Fluxograma do processo de refinamento de órbitas de objetos do Sistema Solar.	94
5.16	Seleção da lista de objetos (Input) do pipeline de refinamento de órbita, mostrando também o histórico dos processos.	97
5.17	Lista de arquivos de entrada (Inputs) para refinar a órbita do TNO 1999 RB ₂₁₆ e lista de arquivos obtidos (Results).	98
5.18	Visualização dos gráficos resultantes do processo de refinamento de órbita do objeto 1999 RB ₂₁₆	98
5.19	Fluxograma da predição de ocultação estelar por objetos do Sistema Solar.	99
5.20	Interface gráfica da etapa de predição de ocultação	100
5.21	Estrelas encontradas na vizinhança de uma parte da órbita do objeto 1999 RB ₂₁₆	102
5.22	Estatística do processo de predição de ocultação estelar por TNOs com órbitas refinadas.	104
5.23	Resultado do componente Search candidate stars para o TNO 1999 RB ₂₁₆	105
5.24	Mapas de predição de ocultação estelar por alguns TNOs.	105
6.1	Variação da magnitude reduzida como função do tempo.	110
6.2	Distribuição temporal das magnitudes reduzidas do TNO 2014 QL ₄₄₁ nos filtros g , r , i , z . Os pontos pretos representam a variação do ângulo de fase.	112
6.3	Potência Lomb-Scargle (equação 6.8) para o TNO 2014 QL ₄₄₁	113

6.4	Fase rotacional do TNO 2014 QL ₄₄₁ . Freqüência mais provável: 6,2869 ciclos/dia $\pm 0,0005$ (ou 3,8174 h $\pm 0,0003$ h).	114
6.5	Magnitude reduzida como função do ângulo de fase solar TNO 2014 QL ₄₄₁	115
6.6	Estatística Θ para o TNO 2014 QL ₄₄₁	116
6.7	Fase rotacional do TNO 2014 QL ₄₄₁ . Freqüência mais provável: 6,28698800 (ou 3,81740827 hs).	116
6.8	Potência Lomb-Scargle (painel superior) e estatística Θ (painel infe- rior) para o TNO 2013 TV ₁₅₈	117
6.9	Fase rotacional Lomb-Scargle (painel superior) e PDM (painel infe- rior) do TNO 2013 TV ₁₅₈	118
6.10	Imagem tomada pela NEAR Shoemaker em FEV/2001, próximo ao seu pouso sobre a superfície de Eros.	120
6.11	Fase versus magnitude reduzida para o TNO 1999 RB ₂₁₆	125
6.12	Fase versus magnitude reduzida para o TNO 2001 QF ₂₉₈	125
6.13	Fase versus magnitude reduzida para o TNO 2003 QW ₉₀	126
6.14	Fase versus magnitude reduzida para o TNO 2004 TY ₃₆₄	126
6.15	Fase versus magnitude reduzida para o TNO 2005 PU ₂₁	127
6.16	Fase versus magnitude reduzida para o TNO 2005 TB ₁₉₀	127
6.17	Fase versus magnitude reduzida para o TNO 2007 RW ₁₀	128
6.18	Fase versus magnitude reduzida para o TNO 2008 SO ₂₆₆	128
6.19	Fase versus magnitude reduzida para o TNO 2012 TC ₃₂₄	129
6.20	Fase versus magnitude reduzida para o TNO 2012 VR ₁₁₃	129
6.21	Fase versus magnitude reduzida para o TNO 2012 VS ₁₁₃	130
6.22	Fase versus magnitude reduzida para o TNO 2012 VU ₁₁₃	130
6.23	Fase versus magnitude reduzida para o TNO 2013 QO ₉₅	131
6.24	Fase versus magnitude reduzida para o TNO 2013 QP ₉₅	131
6.25	Fase versus magnitude reduzida para o TNO 2013 RD ₉₈	132
6.26	Fase versus magnitude reduzida para o Centauro 2013 RG ₉₈	132
6.27	Fase versus magnitude reduzida para o TNO 2013 RM ₉₈	133
6.28	Fase versus magnitude reduzida para o TNO 2013 RO ₉₈	133
6.29	Fase versus magnitude reduzida para o TNO 2013 TV ₁₅₈	134
6.30	Fase versus magnitude reduzida para o TNO 2014 QB ₄₄₂	134
6.31	Fase versus magnitude reduzida para o TNO 2014 QL ₄₄₁	135
6.32	Fase versus magnitude reduzida para o TNO 2014 QM ₄₄₁	135
6.33	Fase versus magnitude reduzida para o TNO 2014 QN ₄₄₁	136
6.34	Fase versus magnitude reduzida para o Centauro 2014 QO ₄₄₁	136
6.35	Fase versus magnitude reduzida para o TNO 2014 QR ₄₄₁	137
6.36	Fase versus magnitude reduzida para o TNO 2014 QS ₄₄₁	137

6.37	Fase versus magnitude reduzida para o Centauro 2014 SR ₃₀₃	138
6.38	Fase versus magnitude reduzida para o TNO 2015 PF ₃₁₂	138
6.39	Fase versus magnitude reduzida para o TNO Eris.	139
6.40	Grupos de objetos - azuis e vermelhos - para aplicação do conceito de dissimilaridade.	141
6.41	Agrupamento, com utilização das cores $V - R$, $V - I$ e $V - J$, obtido com o algoritmo <i>PAM</i> para os dados de FULCHIGNONI <i>et al.</i> (2008).	144
6.42	Agrupamento, com utilização das cores $g - r$, $g - i$ e $g - z$, obtida com o algoritmo <i>PAM</i> para observações realizadas com o DES.	148
6.43	Espectro de reflectância para os objetos listados na tabela 6.6, segundo o agrupamento dado pela figura 6.42.	150
6.44	Índice $g - r$ versus inclinação. Os pontos em vermelho não foram utilizados para correlação. Inclinações foram obtidas do Minor Planet Center. As barras de erro possuem um comprimento total de 2σ	153
6.45	Gradiente espectral versus inclinação. Inclinações foram obtidas do Minor Planet Center. As barras de erro possuem um comprimento total de 2σ	154
6.46	Cor $g - r$ versus magnitude absoluta em r	155

Lista de Tabelas

1.1	Parâmetros físicos determinados em comparação ao total de TNOs descobertos.	5
1.2	População de pequenos corpos a serem observados com LSST	5
2.1	Principais características da DECam.	14
2.2	Características dos filtros disponíveis da DECam.	14
3.1	Tabelas no banco de dados do DES e os principais parâmetros solicitados via easyaccess.	21
3.2	Total de exposições da DECam e distribuídos por bandas para os três primeiros anos (Y1 - Y3) de funcionamento do DES.	22
3.3	Estatística dos objetos identificados e as observações deles nas imagens CCDs do DES DR1.	25
3.4	Parâmetros de entrada do SkyBoT Cone-Search e suas respectivas unidades e limites.	28
3.5	Exemplos de definição do FoV da DECam ($r = 1,1$ graus) e das dimensões dos seus CCDs ($0,30 \times 0,15$ graus)	29
3.6	Códigos de localização de alguns lugares de observação.	30
3.7	Parâmetros de saída com informação dos objetos identificados dependendo da opção solicitada.	31
3.8	Dados dos objetos que podem estar contidos nas imagens CCDs.	32
3.9	Predição de ocultação estelar pelo TNO 1996 RR ₂₀	46
4.1	Diferenças entre os resultados astrométricos aqui apresentados e o modelo empírico do DES	54
4.2	Valores gerais de incerteza.	55
4.3	Estatística geral de imagens que contêm observações de TNOs e Centauros conhecidos.	56
4.4	Estatísticas da redução dos TNOs e Centauros: Fonte principal.	63
4.5	Estatísticas da redução dos TNOs e Centauros: Fonte de extensão.	64
4.6	Estatísticas da redução dos TNOs e Centauros: Fonte duvidosa.	65

5.1	Total de exposições da DECam, distribuídos por bandas para os seis anos de funcionamento do DES.	82
5.2	Estimativa do tempo para analisar os dados do DES DR1. A DECam é composta por 62 CCDs.	84
6.1	Comparação entre magnitudes absolutas e inclinações de fase para o TNO 2014 QL ₄₄₁ , tendo ou não em conta a rotação do corpo.	115
6.2	Magnitudes absolutas, inclinações de fase, χ^2 , probabilidade do <i>goodness-of-fit</i> , número de medidas, filtro, albedo.	124
6.3	Dissimilaridade entre os objetos da figura 6.40 com respeito aos objetos 5 e 12.	142
6.4	Dissimilaridade entre os objetos da figura 6.40 com respeito aos objetos 3 e 8.	142
6.5	Coluna (1): Número do objeto associado à figura 6.41. Coluna (2): Identificação do objeto. Coluna (3): Classificação obtida com o algoritmo <i>PAM</i> . Coluna (4): Classificação oriunda de FULCHIGNONI <i>et al.</i> (2008). O objeto 2000 QB ₂₄₃ não foi atribuído a classe alguma naquele trabalho. Coluna (5): Classificação oriunda de PERNA <i>et al.</i> (2010). Coluna (6): Classificação oriunda de DEMEO <i>et al.</i> (2009).	146
6.6	Coluna (1): Número do objeto associado à figura 6.42. Coluna (2): Identificação do objeto. Coluna (3): Cor do agrupamento oriundo do código <i>PAM</i> : azul (BB), verde (BR), lilás (IR), vermelho (RR). Coluna (4): Classificação oriunda de http://www.johnstonsarchive.net/astro/tnoslist.html . Coluna (5): gradiente espectral (porcentagem). Colunas (6)-(8): índices de cor e respectivas incertezas. Coluna (9): Classe dinâmica como obtida de KHAIN <i>et al.</i> (2020) (sem *) ou de http://www.johnstonsarchive.net/astro/tnoslist.html (com *).	149
6.7	Coluna (1): Agrupamento determinado pelo algoritmo <i>PAM</i> . Coluna (2): Classe taxonômica ao qual foram associadas. Colunas (3) a (5): cores médias e respectivos desvios padrão para cada classe.	149
6.8	Comprimentos de ondas centrais (em nanômetros) e magnitudes solares para os filtros utilizados pelo DES.	150
6.9	Comportamento de \overline{E}_F em cada classe taxonômica.	150

Capítulo 1

Introdução

O entendimento da formação e evolução do Sistema Solar passa pelo estudo de seus “fósseis”, onde informações sobre as origens de nosso sistema estão registradas.

Esses fósseis são pequenos corpos orbitando além da órbita de Netuno, conhecidos como Objetos Transnetunianos - TNOs (do inglês *Trans-Neptunian Objects*) e aquelas localizadas entre as órbitas de Júpiter e Netuno, com órbitas dinamicamente instáveis, conhecidos como Centauros. De fato, acredita-se que eles e os TNOs compartilhem uma origem comum (GALIAZZO *et al.*, 2016). Por isso, estudos dos Centauros podem revelar características gerais dos TNOs.

Nos rincões do Sistema Solar, os TNOs guardam informações sobre sua dinâmica e composição química. Com tamanho da ordem de quilômetros e distância de dezenas de Unidades Astronômicas (au) da Terra, seu brilho tênue os torna difíceis de observar. Dessa forma, fotometria multifiltro é a técnica mais utilizada para se estudar tais corpos.

A ocultação estelar é uma outra técnica fotométrica, que permite determinação de tamanhos de TNOs/Centauros com precisão quilométrica (SICARDY *et al.*, 2011; BRAGA-RIBAS *et al.*, 2011; ELLIOT *et al.*, 2010b; ORTIZ *et al.*, 2011), investigação de suas vizinhanças (descobertas de anéis: BRAGA-RIBAS *et al.* (2014b); ORTIZ *et al.* (2017)), é sensível à presença de atmosferas tênues (ver por exemplo o estudo da atmosfera de Plutão: DIAS-OLIVEIRA *et al.* (2015), e de limites para existência de atmosfera de Makemake: ORTIZ *et al.* (2012)).

A primeira observação de uma ocultação estelar (exceção feita a Plutão) por um TNO aconteceu em outubro de 2009 quando uma estrela foi ocultada pelo TNO 2002 TX₃₀₀ (ELLIOT *et al.*, 2010a). Desde então começou a se estudar os objetos distantes através das ocultações estelares. CAMARGO *et al.* (2014) fez pouco mais de 2 mil predições de ocultações estelares para 5 Centauros e 34 TNOs entre maio de 2012 e dezembro de 2014. Para cumprir este objetivo foi usado o telescópio ESO/MPG de 2,2 m equipado com o Wide Field Imager (WFI) desde outubro de 2011 até maio de 2013 para construir um catálogo estelar ao redor do caminho

desses objetos com uma completeza até a magnitude $R = 19$ e uma precisão média da posição de cerca de 50 mas. Por conta do procedimento de redução, que atenuava os erros sistemáticos do melhor catálogo de referência disponível na época, UCAC4 (ZACHARIAS *et al.*, 2013), este catálogo construído com um total de 12.456.565 entradas foi muito útil como referência astrométrica para imagens astronômicas que contêm as regiões cobertas. Como resultado tivemos um incremento nas observações de ocultações (ver figura 1.1). Depois da finalização destas observações, houve uma significativa diminuição, sendo em 2015 a mais baixa, mas a partir da primeira liberação do catálogo Gaia (DR1) em setembro de 2016 (LINDEGREN *et al.*, 2016), a quantidade de observações de ocultações voltou a aumentar. O pequeno número de observações em 2019 é devido a estarem sendo considerados apenas os dados dos dois primeiros meses daquele ano.

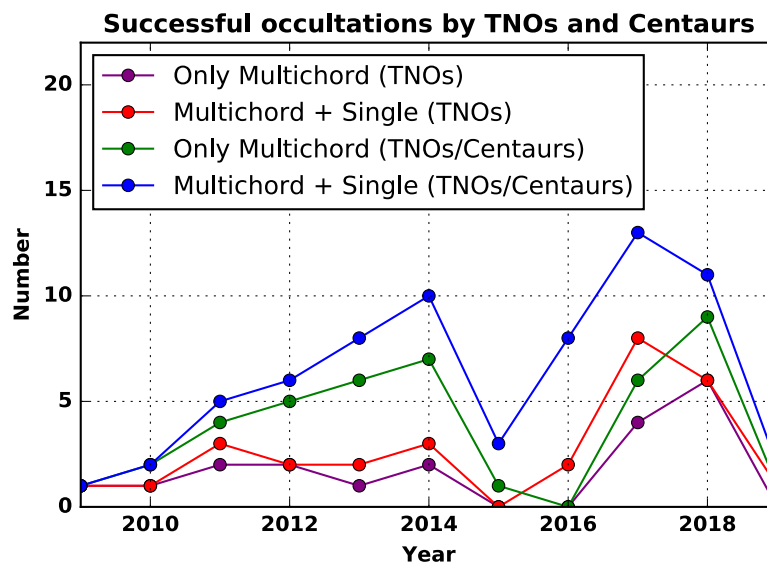


Figura 1.1: Ocultações detectadas por ano (TNOs mais Centauros) desde 2009, excluindo Plutão. Em azul, todos os eventos envolvendo TNOs e Centauros. Em verde, apenas eventos de TNOs. Em vermelho, todas as ocultações com multicordas. Em roxo, ocultações multicordas envolvendo apenas TNOs. Fonte: ORTIZ *et al.* (2019).

Para poder observar uma ocultação estelar por algum TNO, é preciso efetuar a predição do evento, que consiste em dizer quando e onde, sobre a Terra, a sombra resultante do evento de ocultação será visível. Para isso, são necessárias posições estelares e efemérides precisas (ASSAFIN *et al.*, 2010, 2012; CAMARGO *et al.*, 2014). No entanto, vale ressaltar que ocultações estelares são especialmente raras quando o corpo ocultador possui latitude Galáctica alta (em módulo). Com frequência, nesses casos, pode-se esperar em média uma ocultação por ano ou menos. Várias predições ainda estão sujeitas a grandes incertezas (> 50 mas) nas posições relativas entre a estrela e o TNO. As complicações são grandes quando o objeto está num

campo muito denso, por conta da dificuldade em se separar o fotocentro dos objetos. No caso das estrelas, um grande avanço foi dado já com a publicação do catálogo *Gaia*¹ (Data Release 2 em abril de 2018) (LINDEGREN *et al.*, 2018), que fornece as posições das estrelas até magnitude $G \sim 20,5$ com acurácia melhor que o milissegundo de arco (*mas*) e movimentos próprios anuais. No caso das órbitas dos TNOs, é preciso ter-se observações astrométricas freqüentes e com qualidade destes objetos, para fazer um bom ajuste das órbitas nominais. Observações próximas à data do evento também são desejáveis, sobretudo para órbitas com incertezas maiores a 50 *mas*.

Vale enfatizar que fotometria multibanda é um recurso dos mais relevantes e comuns para o estudo dos pequenos corpos do Sistema Solar. Especificamente, é possível obter magnitudes e cores precisas para todos os TNOs conhecidos usando telescópios de 2 *m* a 10 *m*. Também é possível procurar correlações estatisticamente significativas entre cores e outras propriedades de TNOs (parâmetros orbitais, por exemplo) (DORESSOUNDIRAM *et al.*, 2008). Análises da distribuição de cores de TNOs e famílias associadas e seus parâmetros orbitais poderiam ser usados para estabelecer a base da taxonomia para obter uma classificação dos TNOs (FULCHIGNONI *et al.*, 2008). Já a curva de luz rotacional fornece informação sobre forma quando esta é dominada pela gravidade do próprio corpo (SHEPPARD *et al.*, 2008) e características das superfícies dos objetos.

1.1 Breve histórico dos TNOs

No início do século XX acreditava-se a possível existência de um planeta massivo além de Netuno (“Planeta X”), que ainda não tinha sido observado. Foi procurado por mais de uma década sem sucesso, mas a tentativa de busca dele levou à descoberta acidental de Plutão em fevereiro de 1930 (TOMBAUGH, 1946). Embora sua descoberta tenha mostrado que a região além de Netuno não estava vazia, Plutão foi reconhecido como um planeta² e não um membro do hipotético cinturão trans-netuniano (LYKAWKA e MUKAI, 2008).

Estudos sistemáticos para poder encontrar outros objetos além da órbita de Netuno foram iniciados em 1987, não tendo sucesso até 1992 quando foi detectado o primeiro TNO³ 1992 QB₁ (JEWITT e LUU, 1993). A observação foi feita usando um detector CCD de 2048×2048 pixels com escala de placa de 0,219 arcsec/pixel e um telescópio de 2,2 *m* da Universidade do Hawaii, localizado em Mauna Kea. Mais seis

¹Missão espacial da Agência Espacial Europeia (*ESA*) de astrometria, e sucessora da missão Hipparcos.

²Até 2006, quando a International Astronomical Union (IAU) criou uma definição formal do termo “planeta”, reclassificando a Plutão como planeta anão.

³Nessa época Plutão ainda era considerado um Planeta.

objetos foram descobertos como parte do mesmo survey, 1993 FW, 1993 RO, 1993 RP, 1994 ES₂, 1994 EV₃ and 1994 GV₉ (WILLIAMS e COLLANDER-BROWN, 1997).

Entre os anos 1993 e 1994, o telescópio Isaac Newton de 2,5 m em La Palma, e um detector CCD com 2048 × 2048 pixels foram utilizados para descobrir novos TNOs: 1993 SB, 1993 SC, 1994 JQ₁, 1994 JR, 1994 TG₂ e 1994 VK₈. A partir daí, vários levantamentos astronômicos dedicados à busca de objetos distantes descobriram novos TNOs, o primeiro foi o Deep Ecliptic Survey (MILLIS *et al.*, 2002; ELLIOT *et al.*, 2005), que entre os anos 1998 e 2003, descobriu cerca de 400 TNOs numa área de 550 graus quadrados. Uma lista de surveys dedicadas à busca de TNOs foi compilada por Michele Bannister em: <https://github.com/mtbannister/tnosurveys>. A figura 1.2 mostra o avanço das descobertas dos TNOs e Centauros. Segundo o Minor Planet Center (MPC) até dezembro de 2019 foram registradas um total de 853.561 planetas menores (sem considerar os cometas), dos quais 3.722 são TNOs e Centauros⁴, o que significa que eles representam menos de 0,5% do total de planetas menores conhecidos. Características como diâmetro, cor, taxonomia e presença de satélites são conhecidas para menos de 10% do total de TNOs descobertos (ver tabela 1.1). Isto significa que enquanto TNOs podem ser descobertos e suas órbitas determinadas, usando imagens de telescópios, conhecer as propriedades fundamentais ainda é um desafio.

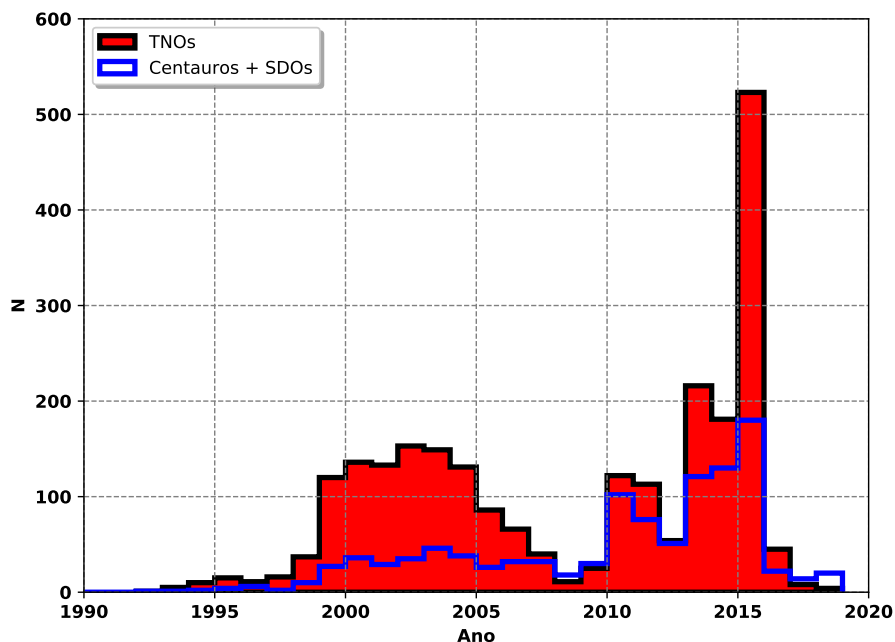


Figura 1.2: Histograma do número de TNOs e Centauros descobertos por ano, usando dados do Minor Planet Center (31 de dezembro de 2019).

⁴Informação extraída de: <https://www.minorplanetcenter.net/mpc/summary>

Parâmetros físicos	Quantidade determinada
Diâmetro	193 (5,4%)
Cor B-R	373 (10,5%)
Tipo de taxonomia	262 (7,4%)
Com satélite	103 (2,9%)

Tabela 1.1: Parâmetros físicos determinados em comparação ao total de TNOs descobertos. Informação extraída em 27 de dezembro de 2019 de: <http://www.johnstonsarchive.net/astro/tnoslist.html>

A colaboração DES (descrito no capítulo seguinte) descobriu, até a data da escrita desta tese, 149 novos TNOs. As informações (elementos orbitais, data de descoberta, magnitude absoluta, entre outras) destes objetos podem ser encontradas em: <http://www-personal.umich.edu/~gerdes/DESTNOs.html>.

O *Legacy Survey of Space and Time*⁵ (LSST) é um projeto de pesquisa de última geração, que combina uma instalação de telescópio de classe mundial com software de gerenciamento de dados de ponta e esforços de calibração. O LSST foi projetado para atingir vários objetivos em quatro temas científicos principais: fazer um inventário do Sistema Solar, mapear a Via Láctea, explorar o céu óptico transitório e investigar a energia escura e a matéria escura (LSST SCIENCE COLLABORATION *et al.*, 2009). Para fazer o inventário do Sistema Solar, milhões de planetas menores serão descobertos (ver tabela 1.2), aumentando o número de objetos conhecidos em cada população de pequenos corpos em um fator de 10 a 100 acima dos níveis atuais (JONES *et al.*, 2016).

População	Conhecidos	LSST	N. Obs.	Arco (Anos)
NEOs	21.793	100.000	90	7,0
MB	864.704	5.500.000	200	8,5
Troianos	7.783	280.000	300	8,7
TNOs	3.722	40.000	450	8,5

Tabela 1.2: População de pequenos corpos a serem observados com LSST. Coluna (2): Quantidade de objetos registrados no MPC (31 de dezembro de 2019); Coluna (3): Quantidade de objetos a serem descobertos pelo LSST durante os 10 anos de funcionamento; Coluna (4): Número médio de observações; Coluna (5): Comprimento do arco observacional para os objetos mais brilhantes. Informação extraída de JONES *et al.* (2016).

A nomenclatura para classificação dinâmica dos objetos do Sistema Solar exterior

⁵Em janeiro de 2020 o nome Large Synoptic Survey Telescope foi trocado para: Legacy Survey of Space and Time.

é complicada devido principalmente a que esses objetos poderiam mudar de classe no futuro próximo ou distante. GLADMAN *et al.* (2008) adota uma filosofia fundamental de classificação dos TNOs, baseada em sua dinâmica atual de curto prazo e não numa crença sobre onde ela irá no futuro ou qual era sua história passada.

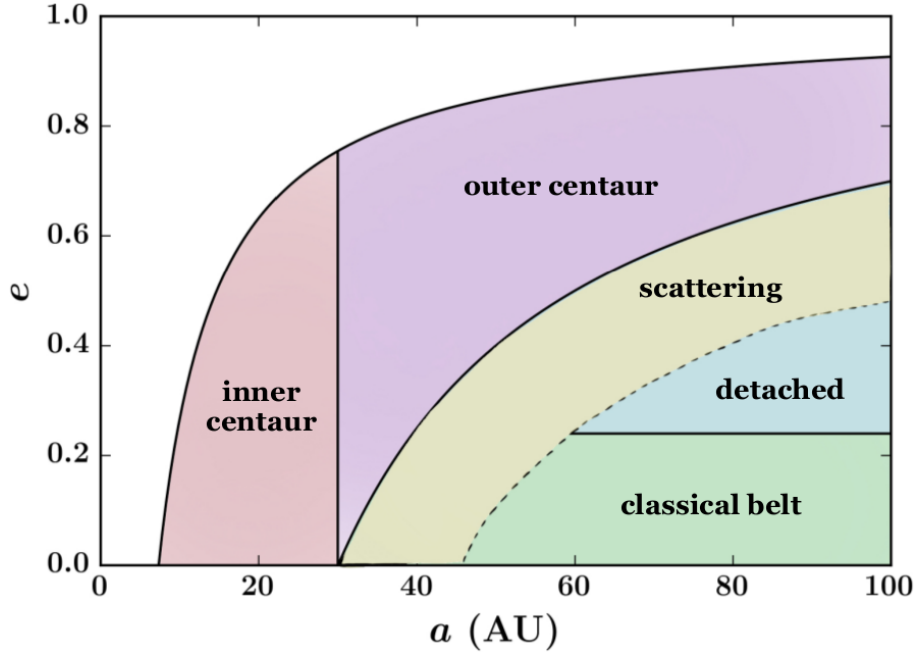


Figura 1.3: Classe dinâmica dos pequenos corpos do Sistema Solar exterior. As curvas sólidas pretas correspondem a distâncias constantes do periélio, com $q = 7, 35$ au e $q = 30$ au (de cima para baixo). Extraída de: KHAIN *et al.* (2020).

Centauros: São objetos dinamicamente instáveis que experimentam fortes interações com os planetas gigantes. KHAIN *et al.* (2020) propõe uma separação destes objetos em dois grupos: internos e externos (ver figura 1.3). Centauros internos ($a < a_N$) são os Centauros tradicionais descritos em GLADMAN *et al.* (2008). Centauros externos ($q < a_N$ e $a > a_N$) são objetos que podem cruzar a órbita de Netuno.

Objetos em ressonância: São os objetos que estão em ressonância de movimentos médios com Netuno. Para a existência da ressonância ($p : q$) a razão dos movimentos médios deve poder ser expressada da seguinte maneira:

$$\frac{n'}{n} = \frac{p}{p + q} \quad (1.1)$$

onde n e n' são os movimentos médios do Netuno e do TNO respectivamente, p e q são inteiros que representam o grau e a ordem de ressonância (MURRAY e DERMOTT, 2000). Uma das mais conhecidas é a ressonância 2:3 que o planeta anão Plutão e os objetos conhecidos como “plutinos” têm com Netuno. Tem também ressonância 1:2, 1:3, 3:5, 4:7 e 2:5 entre outras.

Objetos do disco disperso: Objetos com excentricidades muito grandes e com periélio próximo à órbita de Netuno ($q \sim 30 \text{ au}$). Acredita-se que estes objetos tenham sido dispersos para fora do cinturão principal de Kuiper por meio de interações com Netuno. Provavelmente são os progenitores dos Centauros e cometas de curto período (SHEPPARD, 2006).

Objetos do cinturão clássico: Composta por TNOs não dispersados, com excentricidades baixas. GLADMAN *et al.* (2008) fez uma divisão deste cinturão em três grupos, baseado na dinâmica deles, o cinturão clássico interno ($a < 39,4 \text{ au}$), o cinturão clássico externo ($a > 48,4 \text{ au}$, e $e < 0,24$) e o cinturão clássico principal (às vezes chamado cubewanos). Estes objetos também estão distribuídos em duas populações, de baixa inclinação (“fria”) tem $i \leq 4^\circ$, e de alta inclinação (“quente”) que se estende a inclinações de 30° a 40° , e possivelmente mais alta (DELSANTI e JEWITT, 2006).

Objetos destacados: São objetos com grandes excentricidades ($e > 0,24$) e grandes distâncias do periélio, fazendo que a força gravitacional de Netuno e dos outros planetas conhecidos tenham apenas uma influência moderada sobre eles.

Objetos da nuvem de Oort: São objetos com grandes órbitas ($a > 2000 \text{ au}$). O campo de maré galáctico e as estrelas que passam causam uma alteração apreciável do periélio e das inclinações destes objetos (GLADMAN *et al.*, 2008).

1.2 Esboço da tese

Nesta tese, apresento uma metodologia que irá promover o estudo de objetos distantes do Sistema Solar através de ocultações estelares e fotometria multifiltro tendo o *Dark Energy Survey* como ponto de partida, e descrevo os resultados obtidos dos três primeiros anos de funcionamento do levantamento. Embora o levantamento ter finalizado o sexto ano (e o último) de geração de dados em janeiro de 2019, quando começamos nosso trabalho (em 2016) o DES só tinha gerado dados até o terceiro ano.

Parte deste trabalho consiste em desenvolver ferramentas computacionais para ter uma metodologia sistemática para se estudar o Sistema Solar exterior através de ocultações estelares a partir de grandes massas de dados oriundas de levantamentos profundos do céu. Para a validação destas ferramentas usamos o Dark Energy Survey (DES) como nosso principal survey, e assim com toda a experiência adquirida e as ferramentas desenvolvidas poderemos estar preparados em particular para a próxima liberação de dados do DES e para o LSST.

No capítulo 2 descrevo o material observacional disponível, dou uma visão geral do levantamento Dark Energy Survey, mostro o *footprint* do levantamento e características da Dark Energy Camera (DECam) bem como características dos dados produzidos pelo sistema DESDM e dos dados gerados nos três primeiros anos de funcionamento (DES DR1). No capítulo 3 detalho os procedimentos seguidos para acessar aos dados do DES, identificar objetos móveis, determinar posições, refinar órbitas e prever ocultações estelares por TNOs e Centauros, assim como também uma breve descrição dos softwares disponíveis e os códigos desenvolvidos. No capítulo 4 faço a análise dos resultados obtidos por BANDA-HUARCA *et al.* (2019). No capítulo 5 apresento nossa aplicação web para o estudo dos pequenos corpos do Sistema Solar, procedimentos para a implementação, com o suporte do LineA, dos softwares e códigos desenvolvidos em diversas pipelines. No capítulo 6 faço uma abordagem dos dados fotométricos do DES para verificar seu potencial no estudo de pequenos corpos. Finalmente no capítulo 7 faço um resumo deste trabalho e apresento perspectivas futuras.

Capítulo 2

Material observacional

2.1 Dark Energy Survey

O *Dark Energy Survey*¹ (DES) é um levantamento astronômico de campo amplo de 5 mil graus quadrados no hemisfério sul celeste. Como o próprio nome sugere, foi especialmente projetado para investigar a natureza física da energia escura, uma componente do setor escuro que seria a suposta responsável pela expansão acelerada do Universo. Atualmente, esta energia corresponde a cerca de 70% do conteúdo do Universo (PLANCK COLLABORATION *et al.*, 2014).

A colaboração DES envolve mais de 500 cientistas de 26 instituições nos Estados Unidos, Reino Unido, Espanha, Brasil, Alemanha, Suíça e Austrália. Após quase uma década de planejamento e preparação, o levantamento viu a primeira luz em setembro de 2012 e iniciou as observações oficiais em 31 de agosto de 2013. Observou o céu de agosto a fevereiro de cada ano durante seis anos e, ao final, produziu um mapa tridimensional de alta resolução de aproximadamente 300 milhões de galáxias, e um número similar de estrelas, além de um catálogo de milhares de supernovas.

A área do levantamento DES (*footprint*) no céu foi escolhida para se sobrepôr a levantamentos espectroscópicos anteriores, incluindo parte da “stripe 82”, uma faixa de céu ao longo do equador celeste que foi observada pelo Sloan Digital Sky Survey (SDSS, ABOLFATHI *et al.*, 2018). O *footprint* do DES também foi projetado para sobrepôr a área de levantamento do South Pole Telescope (SPT, SCHAFFER *et al.*, 2011), que detectou um grande número de aglomerados de galáxias. Finalmente, a área do levantamento foi escolhida para evitar o plano da Via Láctea, onde a grande densidade de estrelas dificulta o estudo das galáxias. O *footprint* do DES é mostrado na figura 2.1.

O Laboratório Interinstitucional de e-Astronomia² (LIneA) que apóia a participação de brasileiros neste levantamento através do consórcio DES-Brazil, desen-

¹<https://www.darkenergysurvey.org/>

²<https://www.linea.gov.br/>

volve um portal terciário do projeto DES para distribuir dados para o Brasil e outros países. Além disso, o Brasil é responsável pelo desenvolvimento de um Portal Científico para a colaboração que permite análise dos dados coletados.

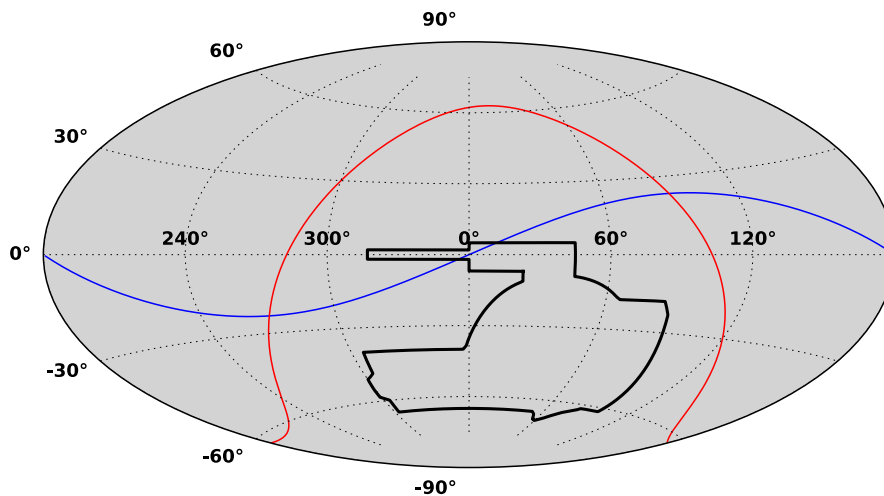


Figura 2.1: Footprint do DES (linha preta) projetado na esfera celeste, mostrando também os planos galáctico (linha vermelha) e a eclíptica (linha azul).

2.2 Dark Energy Camera

A Dark Energy Camera (DECam) é uma câmera de grande campo, desenhada e construída pela colaboração DES. Ela foi instalada no foco principal do telescópio Victor M. Blanco (ver figura 2.2), que tem um espelho primário de 4 m de diâmetro. Está localizado no Cerro Tololo (ver figura 2.3) a 2.200 m de altitude, aproximadamente 500 km ao norte de Santiago do Chile.

Aproximadamente 30% do tempo de observação anual (105 noites/ano) da DECam (principalmente entre os meses de agosto e fevereiro) foi dedicado exclusivamente para realizar o projeto DES. O restante do tempo estava disponível para o uso da comunidade.

A DECam foi necessária para realizar o projeto DES, mas também criou uma nova ferramenta para descoberta, desde objetos do Sistema Solar até o universo distante. Por exemplo no Sistema Solar, 12 novas luas de Júpiter foram descobertas recentemente com a DECam (SHEPPARD *et al.*, 2018), descoberta de novos TNOs (BECKER *et al.*, 2018; ABBOTT *et al.*, 2019).

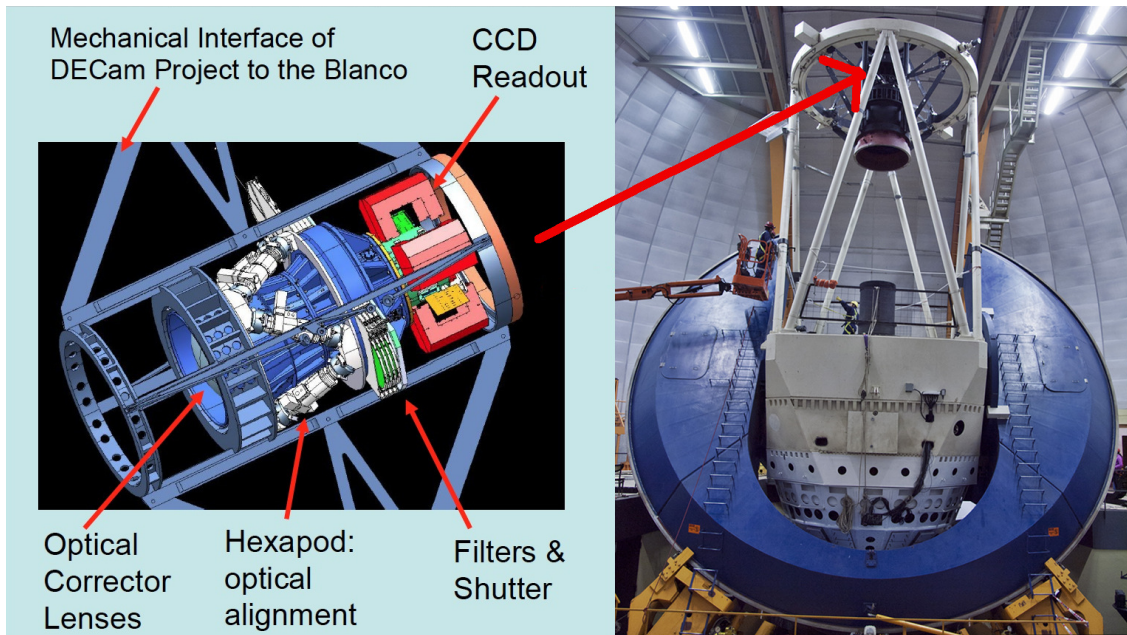


Figura 2.2: Esquerda: Vista esquemática da DECam, mostrando também a disposição do agrupamento de CCDs, lentes ópticas e filtros. Direita: O telescópio Blanco de 4 m. A seta vermelha indica o foco principal, onde a DECam foi colocada. Imagem obtida do site: <http://www.ctio.noao.edu/noao/sites/default/files/decam/Images/Dschematic.jpg>



Figura 2.3: Observatório Interamericano de Cerro Tololo ao pôr do sol. O maior domo à esquerda é onde está o telescópio Blanco. Crédito da imagem: NOAO/NSF/AURA.

O principal componente da DECam é um mosaico de dispositivos de carga acoplada - CCDs (do inglês: charge-coupled device) de última geração, semelhantes,

mas muito mais sensíveis do que os das câmeras digitais comuns. Setenta e quatro CCDs estão montados em uma placa de alumínio em um padrão hexagonal no plano focal da DECcam, onde as imagens são tomadas. Sendo 62 CCDs, de $2k \times 4k$, de ciência e 12 CCDs, de $2k \times 2k$, de foco e alinhamento (etiquetados como “F”) e de guiagem do telescópio (etiquetados como “G”) posicionados perto da borda (ver figura 2.4). Observe que o centro do campo cai dentro de uma lacuna entre os CCDs S4 e N4. Cerca de 14 cópias da lua cheia caberiam em uma única imagem. A DECcam pode ser lida em menos de 30 segundos, mais rápido que a maioria das câmeras CCD atualmente em uso na astronomia. A figura 2.5 é uma das primeiras imagens coloridas geradas pela DECcam.

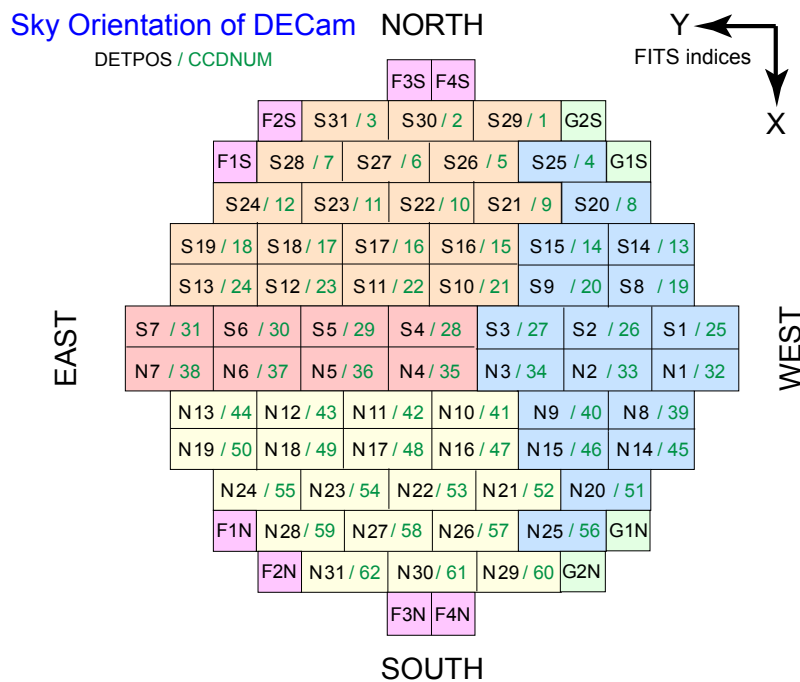


Figura 2.4: Orientação no céu do mosaico de CCDs da DECcam, composto por 12 CCDs de $2k \times 2k$ para o controle de guiagem (verde) e foco (magenta) e 62 CCDs de $2k \times 4k$ (laranja, rosa, azul, amarelo) de ciência, mostrando a correspondência entre o número de CCD e a posição do detector, definindo a configuração do mosaico. A declinação decresce ao longo do eixo x , e a ascensão reta aumenta ao longo do eixo y . Vale mencionar que dois dos CCDs (S7 e N30) de ciência estão queimados.

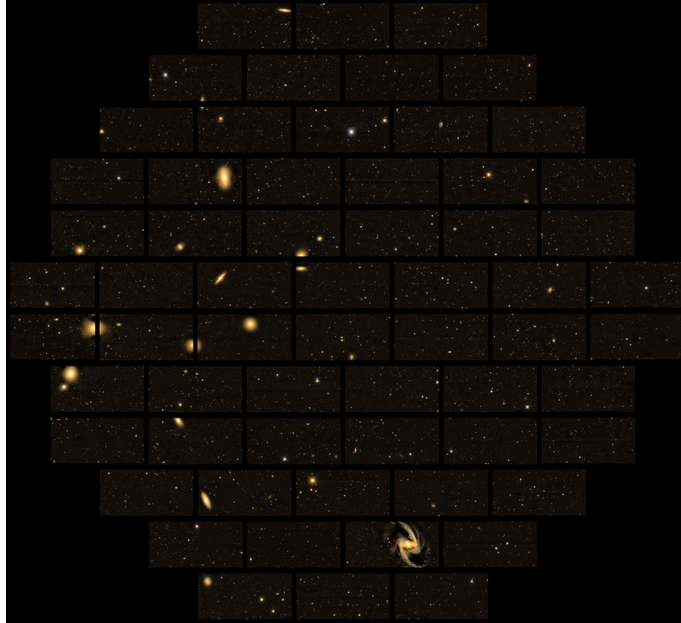


Figura 2.5: Imagem tirada em 2012 com a DECam, mostrando parte da constelação de Fornax. Os objetos maiores e mais brilhantes são galáxias. Na parte inferior pode ser observada a galáxia espiral NGC 1365. A câmera captura a luz usando 62 CCDs de ciência. Fonte: <https://www.darkenergysurvey.org/decam/>

Todas as imagens CCDs individuais, que têm formato de arquivo FITS, são armazenadas, pela colaboração DES, em forma compacta usando o software *Funpack* (PENNY *et al.*, 2011) para minimizar tanto o volume de armazenamento (reduzindo o peso de uma imagem CCD da DECam de 85 MB no formato FITS para 15 MB no formato comprimido³) como o tempo de download.

Os detalhes da DECam estão indicados na tabela 2.1. A escala de pixel aumenta gradualmente, de forma quase imperceptível, a partir do centro para a borda do campo de visão devido à distorção da curvatura. Mais informações, assim como detalhes técnicos da DECam, podem ser obtidos em FLAUGHER *et al.* (2015).

³Detalhes do formato de compressão em: <http://archive.noao.edu/tutorials/fpack>

Corretor óptico do campo de visão	2,2 graus de diâmetro do campo circular
Área efetiva do mosaico de CCDs	3 graus quadrados
Razão focal	f2.7
Detector	62 CCDs de 2048×4096 pixels
Número total de pixels	520 Mpixels
Escala de pixel, centro/borda	0,2637 / 0,2626 arcsec/pixel
Escala de placa	17,57 arcsec/mm
Gaps entre CCDs	
Linhas (Ex. Entre S4 e N4)	3,0 mm (201 pixels)
Colunas (Ex. Entre N4 e N5)	2,3 mm (153 pixels)
Qualidade de imagem entregue	$\sim 0,8$ arcsec em excelentes condições de seeing
Filtros	g, r, i, z, Y
Seeing ($grizY$)	~ 1 arcsec

Tabela 2.1: Principais características da DECam. S4, N4 e N5 são CCDs próximos (ver figura 2.4).

2.2.1 Filtros

As observações da colaboração DES são feitas usando cinco filtros nas bandas g, r, i, z, Y , com comprimento de onda indo desde 400 até 1.080 nm. Cada filtro possui um diâmetro de 62 cm (24 polegadas).

O mecanismo Hexapod é um conjunto de seis pistões acionados pneumaticamente que atuam para alinhar com precisão os elementos óticos entre as exposições, para manter a câmera em foco e as imagens o mais nítidas possível. O mecanismo do obturador aciona um elemento de bloqueio de luz que protege o imageador da luz entre as exposições. As características dos filtros da DECam são indicadas na tabela 2.2.

Filtro	λ (nm)	FWHM (nm)	Transmissão (%)
DES g	398 - 548	150	91 - 92
DES r	568 - 716	148	90 - 91
DES i	710 - 857	147	96 - 97
DES z	850 - 1002	152	97 - 98
DES Y	953 - 1065	112	98 - 99

Tabela 2.2: Características dos filtros disponíveis da DECam. Estes filtros têm nominalmente 13 mm de espessura e um diâmetro de 620 mm. Sua massa é de cerca de 9,95 kg cada.

A figura 2.6 mostra a banda passante padrão do DES DR1 que é definida como a resposta média do CCD através do plano focal, conforme medido pelo sistema de calibração espectrofotométrica para DECam (DECAL; MARSHALL *et al.*, 2013), juntamente com uma transmissão atmosférica padrão computada usando parâmetros típicos das condições ambientais encontradas durante as observações DES (para detalhes, ver LI *et al.* (2016); BURKE *et al.* (2018)).

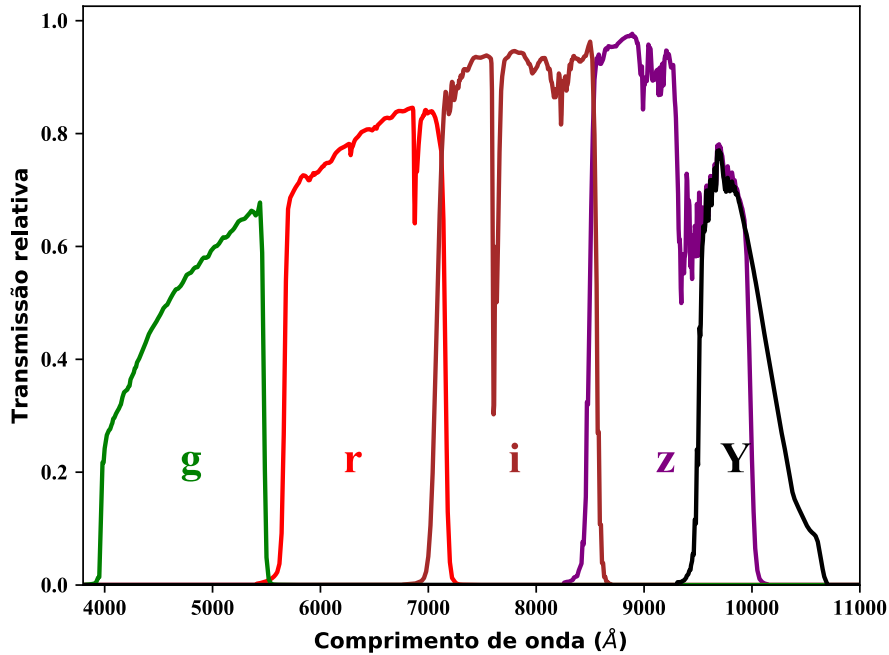


Figura 2.6: Banda passante padrão do DR1 para os filtros *grizY* da DECam. A banda passante representa o rendimento total do sistema, incluindo a transmissão atmosférica (massa do ar = 1, 2) e a resposta instrumental média através dos CCDs de ciência.

2.3 Processamento de dados

O processamento de dados é gerenciado pelo DES Data Management (DESDM), responsável por processar imagens geradas pela DECam tomadas pelo DES e produzir dados reduzidos, prontos para análise científica. O sistema DESDM define vários níveis de processamento de dados.

Processamento Single-Epoch: Este pipeline remove assinaturas instrumentais de exposições individuais e produz catálogos de objetos (single epoch). Dois pipelines de processamento são definidos: o primeiro é usado para avaliação de qualidade de dados em “tempo real”, enquanto o segundo produz produtos científicos finais. Esses dois pipelines diferem principalmente nos arquivos de calibração e configuração de imagem usados:

1. First Cut: Este pipeline está focado na avaliação de qualidade de dados logo após as observações para avaliar se uma exposição específica precisa ser retomada. O pipeline faz a redução e calibração das imagens brutas, calcula soluções astrométricas, mascara regiões ruins, modela a função de dispersão de pontos - PSF (do inglês: Point Spread Function), aplica avaliações de qualidade e produz catálogos de objetos. Este pipeline usa arquivos de calibração de imagem produzidos durante o ano anterior de observação.
2. Final Cut: este pipeline executa as mesmas tarefas do First Cut. No entanto, os arquivos de configuração e calibração (por exemplo, mascaramento de pixels) são derivados da época durante a qual a observação foi feita. Esse pipeline produz imagens que servem como entrada para o processamento Multi-Epoch e a geração dos catálogos co-adicionados do DES DR1. As imagens Final Cut são as mais adequadas para serem analisadas e para se estudar objetos móveis.

Processamento Multi-Epoch: O processamento de várias épocas aumenta a profundidade do levantamento, através da co-adição de imagens do Final Cut e conseqüente produção catálogos de objetos co-adicionados. O processamento é organizado usando um esquema de *tiles*, dividindo o céu em regiões quadradas de 10.000 pixels (0,7305 graus) de lado. As imagens sobrepostas são co-adicionadas usando o esquema de combinação e ponderação denominado “CHI-MEAN” descrito em DRLICA-WAGNER *et al.* (2018). O refinamento astrométrico é realizado como parte da co-adição de imagens. A calibração fotométrica é realizada nas imagens individuais do Final Cut pelo procedimento denominado Método Global de Calibração Avançada (BURKE *et al.*, 2018). O ponto zero das imagens co-adicionadas são ajustados de forma a terem o valor de 30 mag.

O pipeline de processamento de imagens é descrito com mais detalhes em BERNSTEIN *et al.* (2017a), DRLICA-WAGNER *et al.* (2018) e MORGANSON *et al.* (2018).

2.4 Dados

As exposições brutas do DES se tornam disponíveis ao público um ano após a aquisição, e o DES tem programado fornecer duas grandes liberações públicas de dados processados. A primeira liberação de dados (DR1) do DES (ABBOTT *et al.*, 2018), engloba os primeiros três anos de operações científicas (Y1 - Y3, desde agosto de 2013 até fevereiro de 2016), enquanto um segundo grande lançamento (DR2)

está programado para depois da conclusão do levantamento. Além de DR1 e DR2, a Colaboração DES prepara lançamentos internos incrementais com produtos de valor agregado e caracterizações detalhadas do desempenho da pesquisa que são projetados para suportar análises cosmológicas. Um subconjunto desses produtos associados a dados coletados durante o período de Verificação Científica do DES (1 de novembro de 2012 a 22 de fevereiro de 2013) foi lançado em janeiro de 2016. Espera-se que versões adicionais de produtos de valor agregado apoiem publicações científicas⁴.

O DR1 é composto de imagens co-adicionados e catálogos, bem como imagens calibradas single epoch, a partir do processamento dos primeiros três anos de observações do DES. O acesso aos dados DES DR1 é feito através de interfaces web e ferramentas auxiliares (descrito no capítulo seguinte), o que é possível através da parceria entre a National Center for Supercomputing Applications (NCSA), LIneA, e a National Optical Astronomy Observatory (NOAO), no seguinte URL: <https://des.ncsa.illinois.edu/releases/dr1>.

Nosso material observacional são os dados DR1 e de verificação científica do DES. A figura 2.7 representa a distribuição do tempo de exposição dos apontamentos do DES DR1, onde podemos notar que a maior quantidade de observações foram feitas usando um tempo de exposição menor que 200 segundos, exposições típicas são de 90 segundos. A figura 2.8 representa a distribuição das observações feitas pelo DES ao longo dos três primeiros anos. A figura 2.9 representa a distribuição das observações feitas pelo DES para cada banda (u, g, r, i, z, Y), tendo um total de 71.027 imagens do DES DR1. E na figura 2.10 podemos observar a projeção Hammer-Aitoff dos apontamentos do DES DR1.

⁴As publicações da colaboração DES podem ser acessadas através do link: <https://dbweb5.fnal.gov:8443/DESPub/app/PB/pub/pbpublished>

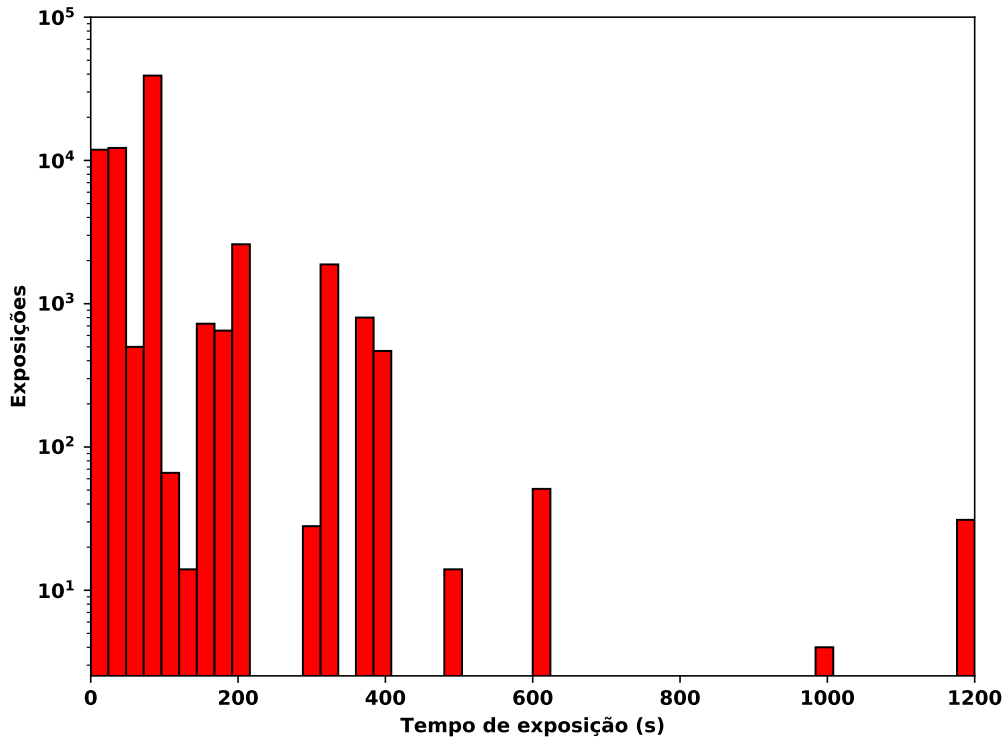


Figura 2.7: Histograma do tempo de exposição usado para fazer as observações DES DR1.

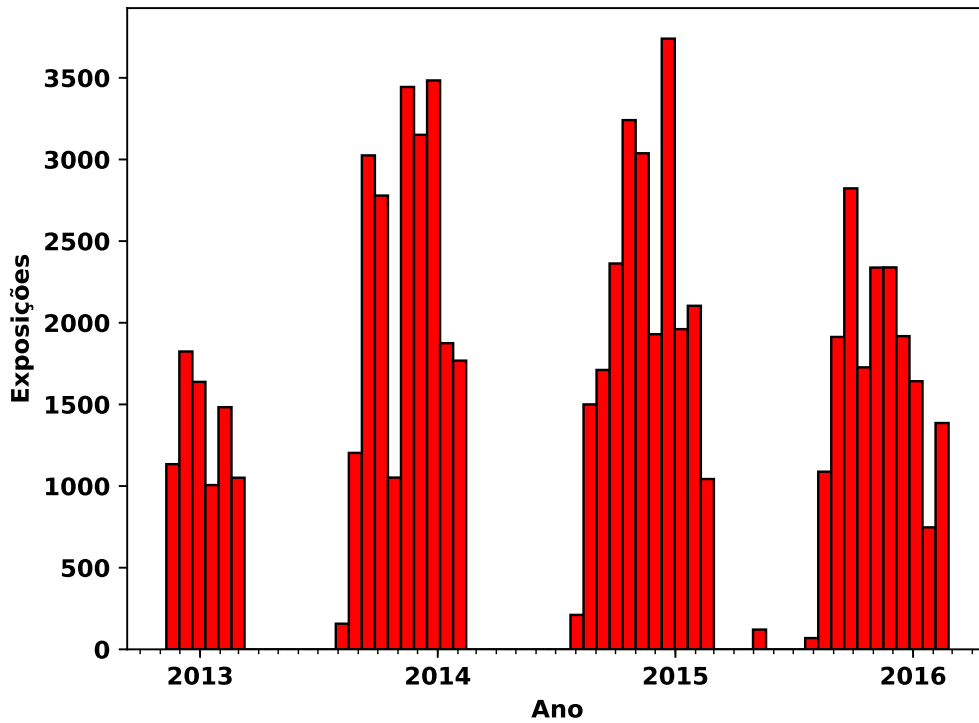


Figura 2.8: Histograma dos apontamentos do DES DR1 distribuídos ao longo do tempo.

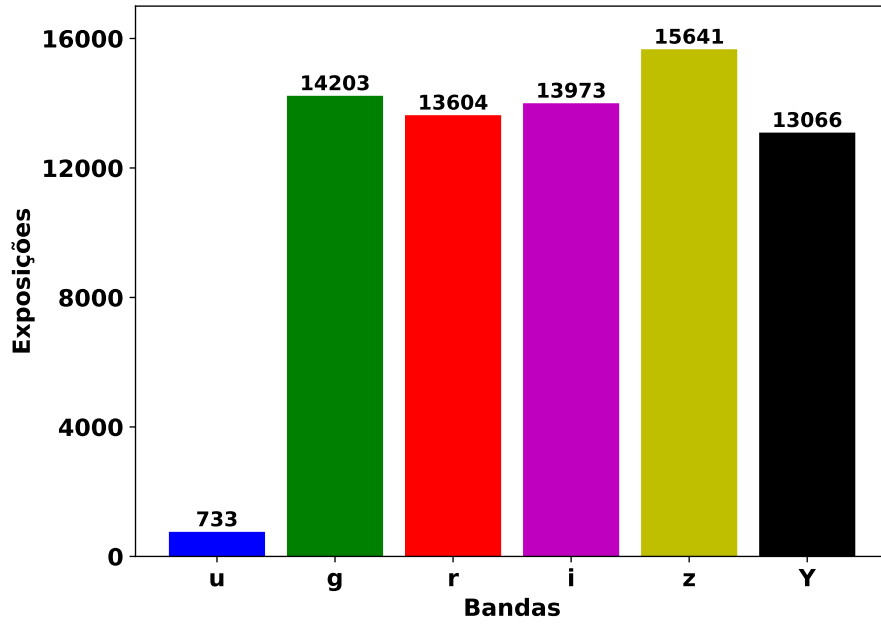


Figura 2.9: Histograma dos apontamentos do DES DR1 por cada banda da DECam.

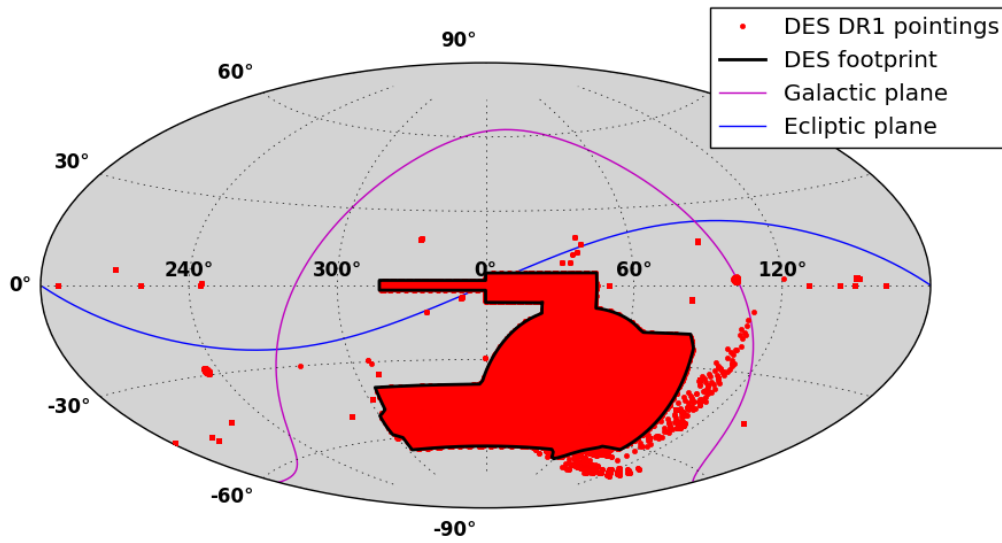


Figura 2.10: Projeção na esfera celeste dos apontamentos do DES DR1.

Capítulo 3

Procedimentos e Softwares

Neste capítulo detalhamos os diversos procedimentos, softwares disponíveis utilizados, e códigos desenvolvidos para obtenção de dados do DES, identificação de objetos conhecidos do Sistema Solar nas imagens CCDs, astrometria, refinamento de órbita e predições de ocultações estelares por TNOs e Centauros identificados.

3.1 Obtenção dos metadados do DES

As informações sobre os dados (metadados) do DES estão organizadas em diversas tabelas dentro de um banco de dados. Com a ajuda do Dr. Matias Carrasco¹ e do Dr. Alex Drlica² foi possível identificar as tabelas que contém as informações que precisamos. Foi desenvolvida uma *query* para procurar, através da ferramenta *easyaccess*, todos os metadados do DES DR1. A tabela 3.1 mostra os principais parâmetros solicitados e as respectivas tabelas no banco do dados do DES.

¹Pesquisador sênior e cientista de dados no Centro Nacional de Aplicações de Supercomputação (NCSA).

²Professor do Departamento de Astronomia e Astrofísica da Universidade de Chicago.

Parâmetro	Definição
TABELA: EXPOSURE	
date_obs	Data de observação
exptime	Tempo de exposição
radeg, decdeg	Coordenada do apontamento
ra_cent, dec_cent	Coordenada do centro da imagen CCD
TABELA: FILE_ARCHIVE_INFO	
filename	Nome do arquivo de imagem
compression	Formato de compressão
path	Localização, no disco rígido, dos arquivos de imagem
desfile_id	Código identificador de cada imagem CCD
TABELA: IMAGE	
band	Filtro (g, r, i, z, Y) usado na observação
expnum	Código identificador de cada exposição
ccdnum	Número de CCD (1,...,62)
ra_size, dec_size	Dimensões de cada imagem CCD
raci, dec _{<i>i</i>}	Coordenadas dos cantos da imagen CCD ($i = 1, 2, 3, 4$)

Tabela 3.1: Tabelas no banco de dados do DES e os principais parâmetros solicitados via easyaccess.

O tempo de consulta foi de aproximadamente 20 horas, devido principalmente à grande quantidade de dados existentes. Como resultado, obtivemos um arquivo ASCII com os metadados correspondentes a 4.292.846 imagens CCDs, que representam 71.220 exposições da DECam nos três primeiros anos de operação do DES. A tabela 3.2 mostra a distribuição das exposições por ano para cada banda. Isto representa nosso material observacional o qual foi descrito no capítulo anterior.

Ano	Exposições	Bandas					
		<i>u</i>	<i>g</i>	<i>r</i>	<i>i</i>	<i>z</i>	<i>Y</i>
Y0	8.169	262	1.544	1.514	1.741	1.756	1.352
Y1	21.949	33	4.802	3.775	4.016	4.625	4.698
Y2	22.990	148	4.450	4.674	4.748	5.190	3.780
Y3	18.112	290	3.407	3.641	3.468	4.070	3.236
DR1	71.220	733	14.203	13.604	13.973	15.641	13.066

Tabela 3.2: Total de exposições da DECam e distribuídos por bandas para os três primeiros anos (Y1 - Y3) de funcionamento do DES, Y0 corresponde ao período de verificação científica (novembro de 2012 até fevereiro de 2013). Um “ano” do DES começa em agosto e finaliza em fevereiro.

3.1.1 easyaccess

O `easyaccess` (CARRASCO KIND *et al.*, 2019) é um intérprete de linha de comando aprimorado (ver figura 3.1) e um pacote Python criado para facilitar o acesso a catálogos astronômicos armazenados em bancos de dados SQL³. Ele fornece uma interface com comandos personalizados e foi especificamente projetado para acessar aos dados do banco de dados Oracle do DES, embora possa ser facilmente estendido para outro levantamento ou banco de dados SQL.

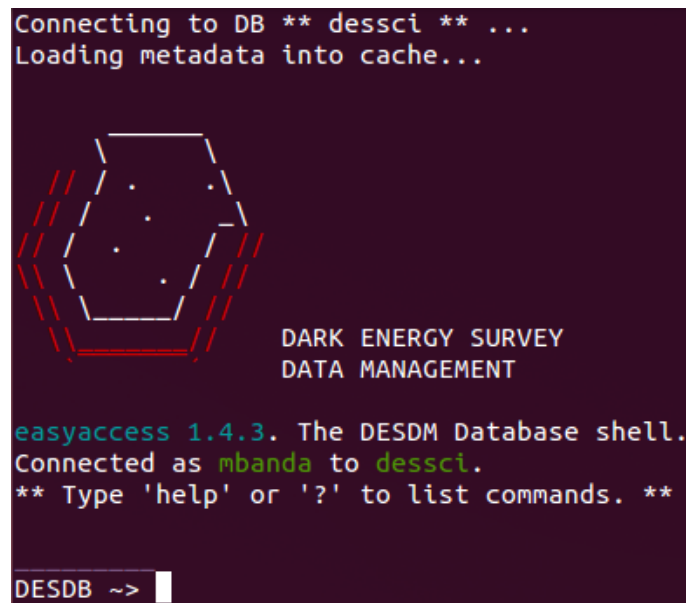


Figura 3.1: Screenshot da ferramenta `easyaccess`, onde as consultas no banco de dados do DES são feitas.

³É uma Linguagem de Consulta Estruturada (do inglês Structure Query Language) padrão de comunicação com banco de dados.

O pacote foi completamente escrito em Python e suporta adição customizada de comandos e funcionalidades. Tabelas podem ser salvas diretamente em arquivos CSV (comma-separated-value), FITS ou HDF5. Também é possível carregar consultas SQL no banco de dados a partir de um arquivo, ou executar queries SQL dentro do módulo `easyaccess` do Python em outra IDE⁴ ou programa.

Para poder usar esta ferramenta é necessário pertencer à colaboração do DES. Detalhes de instruções de instalação, tutoriais e o código fonte Python na url <https://github.com/mgckind/easyaccess>.

3.2 Identificação de objetos em imagens CCDs

Como visto na seção anterior, pouco mais de 4 milhões de imagens CCDs foram gerados pela DECam nos três primeiros anos de funcionamento do DES (DES DR1). Para saber que imagens baixar para fazer uma análise astrométrica é necessário saber quais deles têm observações de objetos de interesse. Nesta seção descrevemos a metodologia usada para identificar objetos do Sistema Solar nas imagens do DES DR1.

O serviço SkyBoT (detalhado no final desta seção) identifica todos os objetos conhecidos do Sistema Solar em imagens astronômicas. Uma imagem da DECam é composta por 62 CCDs, portanto, podemos aplicar o SkyBoT de duas maneiras.

1. Fornecendo a área de cobertura de um CCD da DECam como FoV. Os objetos identificados correspondem diretamente a uma específica imagem CCD. No entanto, este procedimento requer pouco mais de 4 milhões de consultas (uma consulta por imagem CCD). Esta estratégia é adotada aqui.
2. Fornecendo uma área circular, dentro da qual se encontra uma imagem da DECam. Este procedimento é mais rápido que o anterior já que só seriam necessárias pouco mais de 70 mil consultas (uma consulta por exposição), no entanto, os objetos identificados numa imagem da DECam precisam ser distribuídos para cada um das 62 imagens CCDs que a compõem. Esta estratégia é mais fácil de ser tratada usando banco de dados, portanto, é adotada na aplicação web (capítulo 5).

O tempo estimado, na época da primeira utilização neste trabalho (\sim agosto de 2016), para o SkyBoT processar uma consulta e gerar resultados era de aproximadamente 3,5 segundos, o que significava que levaria em torno de 6 meses para analisar os pouco mais de 4 milhões de metadados do DES DR1.

⁴É um Ambiente de Desenvolvimento Integrado (do inglês Integrated Development Environment) em que um programador pode escrever o script, compilar e depurar todo o processo (Exemplos: PyCharm, Sublime Text, Netbeans, etc.).

Para resolver este problema de tempo alto de análise foi gerenciado, entre o LIneA e um dos desenvolvedores do SkyBoT, Dr. Jerome Berthier do Observatório de Paris, a instalação de um espelho do SkyBoT nas máquinas do LIneA. Este espelho era cerca de dez vezes mais rápido, reduzindo então o tempo de análise de 6 meses para cerca de 20 dias.

Eu desenvolvi um código em Python para gerenciar o uso do SkyBoT para identificar os objetos conhecidos do Sistema Solar nas imagens CCD, usando os metadados do DES DR1. O resultado de uma consulta é um arquivo que contém informações dos objetos identificados (uma linha por objeto). Pouco mais de 4 milhões de arquivos são gerados com o SkyBoT (um arquivo para cada imagem CCD).

A definição dos parâmetros de entrada para o SkyBoT é mostrada na tabela 3.4. Eu os separei em dois grupos, segundo sua dependência.

Variáveis: São os parâmetros que dependem dos metadados do DES (data de observação, coordenadas e tamanho do FoV). O gerenciamento deles (extração e submissão para o SkyBoT) é feito pelo código Python.

Constantes: São os parâmetros com valores fixos (formato de arquivo, parâmetros de saída, localização do observatório, etc.) para todas nossas consultas no SkyBoT.

O SkyBoT identificou 150.850 objetos conhecidos do Sistema Solar com 1.708.335 observações deles, distribuídos em 818.104 imagens CCDs do DES DR1. Significa que cerca de 3,5 milhões de imagens CCDs não têm observações de objetos móveis conhecidos à época de uso do SkyBoT.

Concatenamos os pouco mais de 800 mil arquivos resultantes, que tem pelo menos um objeto identificado, num único arquivo. Depois fizemos um procedimento de associação destes objetos com os metadados do DES DR1, de tal maneira que numa mesma linha de arquivo estejam os objetos identificados e os respectivos metadados do DES. Tendo toda a informação organizada num único arquivo é mais fácil fazer a identificação das imagens CCDs que tem observações de objetos de interesse.

A tabela 3.3 mostra a distribuição dos objetos identificados, suas respectivas observações e as imagens CCD do DES onde foram observados. Como era esperado, a maioria dos objetos identificados pertencem ao cinturão principal (MB), região localizada aproximadamente entre as órbitas de Marte e Júpiter. Os “Demais corpos” (Other bodies) são compostos pelos asteroides próximos da Terra (NEAs), a família Hungaria ($1,78 au < a < 2 au$), aqueles cujas órbitas cruzam a de Marte (Mars-Crosser), e os Troianos de Júpiter e Netuno.

Classe dinâmica	N	Observações	Imagens CCD
TNOs	271	16.563	16.413
Centauros	66	2.512	2.512
MB	138.070	1.563.360	744.951
Demais corpos	12.443	125.900	54.228
TOTAL	150.850	1.708.335	818.104

Tabela 3.3: Estatística dos objetos identificados e as observações deles nas imagens CCDs do DES DR1. Sendo asteroides do cinturão principal (MB) a maioria dos objetos identificados.

A figura 3.2 mostra a distribuição da magnitude visual (como dada pelo SkyBoT) dos TNOs, Centauros, asteroides do cinturão principal e demais objetos identificados. Estes são objetos que poderiam estar contidos nas imagens, mas só depois de fazer a redução astrométrica podemos saber de fato se eles efetivamente se encontram nelas. A magnitude limite típica de detecção de objetos em imagens (single epoch) do DES é de 23 mag.

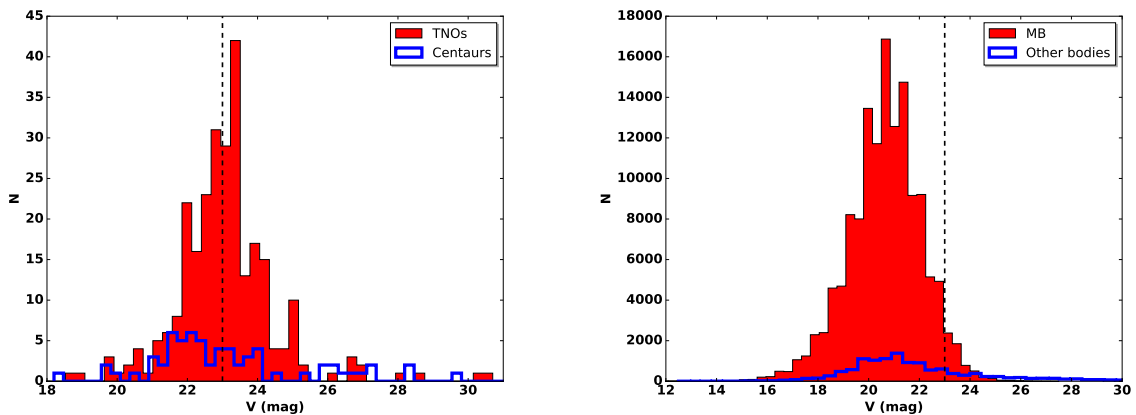


Figura 3.2: Histograma da magnitude dos TNOs e Centauros (esquerda), objetos do cinturão principal e demais corpos (direita). A linha vertical tracejada indica a magnitude limite típica que esperamos detectar na maioria das imagens (single epoch) do DES.

Informações dos pequenos corpos do Sistema Solar podem ser obtidos através do *Astroquery* (GINSBURG *et al.*, 2019), um pacote afiliado do *Astropy* que contém uma coleção de ferramentas para acessar dados astronômicos online. Segue uma breve descrição de dois dos módulos⁵ deste pacote:

JPL Horizons: Fornece uma método para gerar efemérides dos pequenos corpos do Sistema Solar através do Horizons System⁶.

⁵Lista dos módulos e detalhes de instalação em: <https://github.com/astropy/astroquery>

⁶<https://ssd.jpl.nasa.gov/?horizons>

JPL SBDB: Fornece um método para solicitar dados de um específico pequeno corpo através do Small-Body Database Browser⁷ (SBDB). O SBDB contém informações de identificação e nomeação de objetos, dados orbitais e dados físicos selecionados para todos os pequenos corpos conhecidos do Sistema Solar.

Usando o módulo JPL SBDB determinamos o semieixo maior de todos os objetos identificados nas imagens do DES, a distribuição deles é mostrados na figura 3.3.

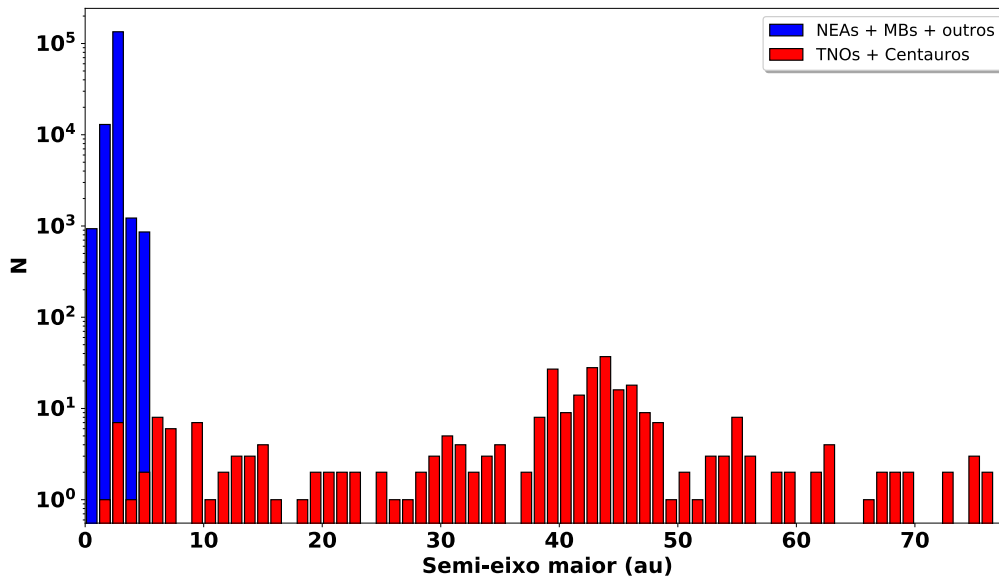


Figura 3.3: Histograma do semieixo maior dos objetos identificados pelo SkyBoT.

3.2.1 SkyBoT

Sky Body Tracker (SkyBoT; BERTHIER *et al.*, 2006) é um serviço web⁸, desenvolvido pelo Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Éphémérides (IMCCE, Observatório de Paris), que faz a busca e identificação de objetos do Sistema Solar em imagens astronômicas entre outros. Para cumprir esse objetivo foi criado um banco de dados de efemérides pré-computadas de todos os objetos conhecidos do Sistema Solar e foram desenvolvidos vários métodos, os quais são:

Cone-Search: Identifica todos os objetos conhecidos do Sistema Solar em um campo de visão de um determinado tamanho (círculo ou caixa, de até 30 graus) em uma determinada época.

Resolver: Fornecendo o nome de um objeto e uma data, este método determina as coordenadas de posição (ascensão reta e declinação) desse objeto para a data fornecida.

⁷<https://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi>

⁸<http://vo.imcce.fr/webservices/skybot/>

getAsterClass: Identifica a classe dinâmica dos objetos do Sistema Solar.

Status: Fornece o status atual do banco de dados, este método é útil para saber o período de tempo coberto pelo SkyBoT.

Availability: Fornece a disponibilidade do serviço web do SkyBoT.

SkyBoT Cone-Search

Identifica objetos do Sistema Solar (asteroides, planetas, satélites naturais e cometas) que estão localizados em uma região do céu, definida por um círculo ou caixa centralizada em uma determinada coordenada (RA, Dec.) para uma dada época.

Há duas maneiras de usar o serviço SkyBoT, a primeira é através da interface web⁹ (ver figura 3.4), a segunda maneira é usando uma interface de linha de comando e um programa de transferência de dados como `curl` ou `wget`. Para isso, basta executar um dos seguintes comandos em uma consola:

```
#> curl "<URL>"  
ou  
#> wget "<URL>"
```

sendo URL o requerimento HTTP que tem a seguinte forma:

`http://vo.imcce.fr/webservices/skybot/skybotconesearch_query.php?[parameters]`

onde `parameters` é uma lista de parâmetros de entrada (ver tabela 3.4) separadas pelo carácter `&`.

The image shows a web browser window displaying the SkyBoT Cone Search interface. At the top, there are four tabs: 'Cone Search' (highlighted in orange), 'Resolver', 'getAsterClass', and 'Status'. Below the tabs is a form titled ':: Cone Search Query Form ::'. The form contains several input fields and checkboxes. The 'Epoch (UTC):' field is set to 'now'. The 'Target:' field is set to '?'. The 'Objects:' section has three checked checkboxes: 'Asteroids', 'Planets', and 'Comets'. The 'Radius (arcsec):' field is set to '900'. The 'Observer:' field is set to '500' with a link '(IAU code list)'. The 'Filter:' field is set to '120'. The 'Output:' section has four radio buttons: 'Object' (selected), 'Basic', 'Obs', and 'All'. On the right side of the form, there are two buttons: 'Resolve Target' and 'Search Objects'.

Figura 3.4: Interface web do serviço SkyBoT.

⁹<http://vo.imcce.fr/webservices/skybot/index.php?forms=conesearch>

Parâmetro	Definição	Unidade	Limites	
Época	-ep=<string>	-	2411320.0	2469880.0
			1889-11-13 12h	2050-03-14 12h
Coordenadas do FoV	-ra=<double>	grau	0	360
	-dec=<double>	grau	-90	+90
Raio do FoV	-rs=<double>	arcsec	0	36 000
	-rm=<double>	arcmin	0	600
Dimensões do FoV ($\Delta\alpha \times \Delta\delta$)	-rd=<double>	grau	0	10
	-bs=<string>	arcsec	0	72 000
	-bm=<string>	arcmin	0	1 200
	-bd=<string>	grau	0	20
Formato de arquivo	-mime=<string>	-	votable html text	
Parâmetros de saída	-output=<string>	-	object basic obs all	
Código IAU	-loc=<string>	-	lista dos códigos IAU	
Filtro para posição	-filter=<double>	arcsec	sem filtro: 0	padrão: 120
Filtro para objetos	-objFilter=<string>	-	Asteroides, planetas, cometas: 111	
Referencial	-refsys=<string>	-	EQJ2000	ECJ2000

Tabela 3.4: Parâmetros de entrada do SkyBoT Cone-Search e suas respectivas unidades e limites.

No caso de uso do serviço SkyBoT Cone-Search em grandes quantidades de dados é necessário desenvolver um código gerenciador das consultas através da linha de comando.

A seguir uma breve descrição dos parâmetros de entrada mostradas na tabela 3.4.

Época: Define a data de observação (na escala de tempo UTC) de uma específica região do céu em que se pretende identificar todos os objetos conhecidos do Sistema Solar. Este parâmetro deve ser formatado como data juliana ou data textual em inglês¹⁰. A seguir alguns exemplos de datas válidas.

- now
- 2006-01-27T1:53:34
- 2453762.529467592
- 10 September 2000
- next Thursday
- last Monday

O caractere “T” do formato de data textual pode ser omitido e os segundos devem ser números inteiros. Para uma precisão de tempo melhor do que um segundo, é recomendável usar a data juliana.

¹⁰Detalhes e exemplos em: <https://www.php.net/manual/en/function.strptime.php>

Referencial: Representa o sistema de referência de coordenadas astrométricas equatorial (ascensão reta e declinação) ou eclíptica (longitude e latitude) J2000 definidos por EQJ2000 e ECJ2000 respectivamente.

Coordenadas do FoV: Define as coordenadas (equatoriais ou eclípticas dependendo do sistema de referência definido no parâmetro “Referencial”) do centro do campo de visão, expressas em unidades de graus, formatados como números decimais ou sexagesimais (separados pelos caracteres “espaço” ou “:”). Seguem alguns exemplos.

- 9.206210129857 -5.190943032122
- 9:54:40.81 +16:23:1.7
- 9 54 40.81 +16 23 1.7

No caso da declinação é necessário ter o sinal (+ ou -).

Raio/Dimensão do FoV: Define o tamanho do campo de visão em unidades de graus, minutos de arco, ou segundos de arco (ver tabela 3.4). Um FoV pode ser de forma circular, definido pelo raio, ou retangular, definido pela largura e altura ($\Delta\alpha \times \Delta\delta$). Seguem alguns exemplos:

Forma do FoV		Unidades
Circular	Retangular	
-rd = 1,1	-bd = 0.30 × 0,15	graus
-rm = 66	-bm = 18 × 9	arcmin
-rs = 3960	-bs = 1080 × 540	arcsec

Tabela 3.5: Exemplos de definição do FoV da DECam ($r = 1,1$ graus) e das dimensões dos seus CCDs ($0,30 \times 0,15$ graus), representados em unidades de graus, minuto de arco e segundo de arco.

Filtro para objetos: Define os objetos que serão identificados. Este parâmetro é composto por um código de três números inteiros (0 ou 1) que especifica se asteroides, planetas, e cometas devem ser procurados. O valor predeterminado deste parâmetro é de 111, quer dizer, que identificaria todos os objetos.

Observer: Código de localização do observador (observatório ou lugar de observação), designado pela União Astronômica Internacional (IAU). Esta informação é importante, principalmente, para o cálculo de efemérides precisas. A lista dos códigos registrados está disponível em: <https://www.minorplanetcenter.net/iau/lists/ObsCodes.html>, alguns dos códigos são mostrados na tabela 3.6.

Local	Código
Hubble Space Telescope	250
Geocentro	500
Observatorio do Pico dos Dias	874
SOAR, Cerro Pachon	133
Cerro Tololo-DECam	W84

Tabela 3.6: Códigos de localização de alguns lugares de observação.

Filtro para posição: Define um filtro na incerteza da posição dos objetos identificados. Apenas serão considerados os objetos com incerteza menor do que o valor dado (expresso em segundos de arco). O valor predeterminado deste parâmetro é 120 segundos e para não fazer a filtragem deve-se usar o valor 0.

Formato de arquivo: Define o formato do arquivo de saída (VOTable¹¹, HTML ou ASCII) onde será armazenado o resultado da busca.

Parâmetros de saída: Define a quantidade de parâmetros a ser extraído. Este parâmetro tem quatro opções disponíveis: object, basic, obs e all. A tabela 3.7 mostra os parâmetros que serão extraídos para cada uma destas opções.

¹¹Formato padrão XML para o intercâmbio de dados representados como um conjunto de tabelas.

N	Definição	Unidade	Output			
			object	basic	obs	all
1	Número do objeto (em branco se não for numerado)	-	x	x	x	x
2	Nome do objeto (designação oficial ou preliminar)	-	x	x	x	x
3, 4	Coordenadas astrométricas J2000 geocêntrica ou eclíptica	grau	x	x	x	x
5	Classe dinâmica	-	x	x	x	x
6	Magnitude visual	-	x	x	x	x
7	Incerteza na posição	arcsec	x	x	x	x
8	Distância angular ao centro do corpo	arcsec	x	x	x	x
9, 10	Movimento na esfera celeste	arcsec/h		x	x	x
11	Distância geocêntrica	au		x	x	x
12	Distância heliocêntrica	au		x	x	x
13	Ângulo de fase	grau			x	x
14	Ângulo de elongação solar	grau			x	x
15..17	Vetor posição heliocêntrica	au				x
18..20	Vetor velocidade heliocêntrica	au/d				x
21	T_0 , época do vetor posição	JD				x

Tabela 3.7: Parâmetros de saída com informação dos objetos identificados dependendo da opção solicitada.

3.3 Obtenção das imagens CCDs

Uma das principais vantagens de ser membro da colaboração DES é ter acesso a seu banco de dados e assim poder fazer consultas além de baixar entre outros produtos os metadados e as imagens.

Eu desenvolvi um código Python para, a partir dos metadados anteriormente baixados e sabendo os objetos que poderiam estar contidos nas imagens, fazer download automaticamente de todos os arquivos de imagens CCDs que contenham uma ou mais observações de TNOs e/ou Centauros. O tempo de execução¹² deste código foi cerca de dois dias e como resultado obtivemos cerca de 19 mil arquivos de imagens num formato comprimido¹³. Usamos o software *Funpack* (PENCE *et al.*, 2011) para descomprimir esses arquivos¹⁴.

O tempo de exposição não foi solicitado nas consultas iniciais que fizemos e portanto a única forma de saber o valor desse parâmetro era acessando o header do arquivo fits depois dele ser baixado. Posteriormente, identificamos a definição dele

¹²Usando a rede do Observatório Nacional que tem uma velocidade de download variando entre 1 e 10 MB/s, dependendo principalmente da concorrência.

¹³Detalhes do formato de compressão em: <http://archive.noao.edu/tutorials/fpack>

¹⁴Levando cerca de 3 horas para descomprimir ($v = 2$ imagens/s) todas as imagens.

e de outros parâmetros, e os adicionamos na nossa query.

Identificamos cerca de 6.400 imagens com tempo de exposição menor que 50 segundos, os quais foram eliminadas, dando como resultado final pouco mais de 12.500 imagens CCDs. A tabela 3.8 mostra a quantidade de imagens CCDs que poderiam ter observações de quase 300 objetos, entre TNOs e Centauros, e o espaço necessário em disco rígido para o armazenamento deles. Atualmente, essas imagens estão armazenadas nas máquinas do LIneA. A figura 3.5 é um exemplo de uma imagem baixada que contem a observação do TNO Eris.

Classe dinâmica	Objetos	Imagens CCD	Espaço em disco
TNOs	240	10.859	923 GB
Centauros	56	1.705	145 GB
TOTAL	296	12.563	~1 TB

Tabela 3.8: Dados dos objetos que podem estar contidos nas imagens CCDs. Mostrando a quantidade de imagens CCDs que poderiam ter observações de TNOs e Centauros, e também o espaço requerido no disco rígido para armazenar essas imagens.

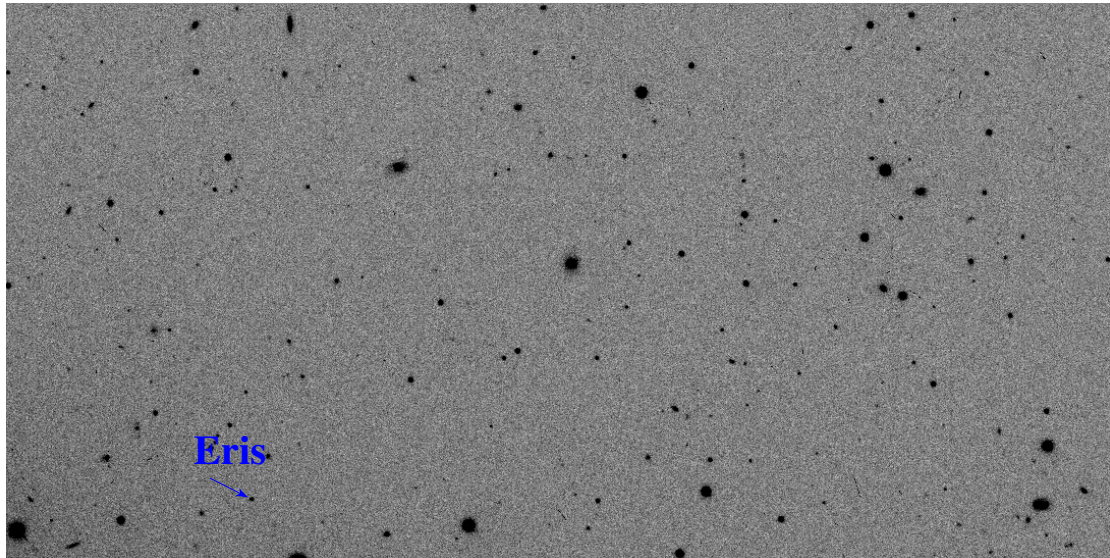


Figura 3.5: Imagem CCD gerada pela DECam na data 09-09-2013, com tempo de exposição de 90 segundos, onde identificamos o TNO Eris (mag = 18,8).

3.4 Determinação de posições astrométricas

Nós usamos a Plataforma para Redução Automática de Imagens Astronômicas (PRAIA; ASSAFIN *et al.*, 2011) para fazer a redução astrométrica das imagens CCDs e determinar as posições dos objetos identificados. O uso e desempenho do

PRAIA foram relatados por vários trabalhos (ver, por exemplo, ASSAFIN *et al.*, 2013; THUILLOT *et al.*, 2015; GOMES-JÚNIOR *et al.*, 2016) com relação a estudos do Sistema Solar.

O tempo médio para o PRAIA fazer a redução astrométrica de uma imagem CCD foi de aproximadamente 20 segundos, o que significa que para os pouco mais de 12,5 mil imagens CCDs (ver tabela 3.8) a estimativa do tempo de processamento linear (não paralelo) seria de aproximadamente 3 dias.

O PRAIA tem parâmetros de entrada predefinidos, no entanto, aqueles que influenciam na detecção de objetos precisaram ser modificados para que os objetos não fossem perdidos. A seguir os parâmetros que foram modificados.

- Faixa mínima e máxima permitida da largura à meia altura (FWHM).
- Largura do anel (em pixels) na busca espiral circular.
- Sabendo-se que σ é o desvio padrão do fundo de céu, devemos fornecer um número k tal que contagens acima de $k\sigma$ serão consideradas como contagens de objetos.

Isto fez com que cada imagem fosse reduzida 4 vezes e os resultados fossem consolidados num único arquivo. Por tal razão, havia a necessidade de processos paralelos para fazer a redução astrométrica de várias imagens simultaneamente e assim reduzir o tempo de análise.

Eu desenvolvi um código em Python para paralelizar as execuções do PRAIA, usando *Multiprocessing*¹⁵, uma biblioteca do Python que permite o uso simultâneo dos processadores de uma determinada máquina.

A presença de efeitos de distorção, também conhecidos como padrão de distorção de campo - FDP (do inglês: field distortion pattern), são esperados em detectores com grandes FoVs, como da DECam. Soluções comuns são, por exemplo, o uso de um polinômio de alto grau (nem sempre recomendado) para relacionar as coordenadas gnomônicas e do CCD de estrelas de referência, a determinação por força bruta de uma máscara de distorção (exemplo, ASSAFIN *et al.*, 2010), e a construção de um modelo empírico que leva em consideração os efeitos devidos à atmosfera e ao instrumento. Este último foi a solução adotada aqui para corrigir o FDP.

Tal solução (doravante C0) é baseada num modelo desenvolvido por BERNSTEIN *et al.* (2017b) e foi o primeiro passo para nossa determinação de posições. Este modelo fornece correções para os efeitos de distorção instrumental, incluindo termos de cor da ótica, fornecendo uma solução astrométrica para a DECam com erros rms abaixo de 10 mas. Esta solução astrométrica é obtida a partir de um

¹⁵<https://docs.python.org/2/library/multiprocessing.html>

modelo paramétrico que considera as coordenadas celestes de um objeto e suas respectivas coordenadas de pixel juntamente com um conjunto de circunstâncias de observação (por exemplo, cor do objeto, tempo de exposição, filtro), aproveitando comparações internas de cerca de 40 milhões de medições com alta razão sinal ruído de imagens estelares. Após essa correção, um polinômio de primeiro grau pode ser usado subsequentemente para relacionar coordenadas gnomônicas e do CCD de estrelas de referência, fornecendo soluções confiáveis de campos com baixa densidade de estrelas.

Foi desenvolvido um pipeline para gerenciar a execução do PRAIA, aplicar a correção de distorção e demais processos na etapa de redução astrométrica para um determinado objeto, portanto, o primeiro passo antes de aplicar este pipeline é agrupar todas as imagens por objeto. A seguir, características principais deste pipeline para a determinação das posições astrométricas.

1. Aplicação do PRAIA paralelizado, aproveitando os 24 núcleos da estação de trabalho Jupiter¹⁶, para fazer a detecção dos objetos nas imagens CCDs. Desta maneira 1.000 imagens são analisadas em aproximadamente 14 minutos, que em forma sequencial levaria cerca de 6 horas.
2. Aplicação do modelo de BERNSTEIN *et al.* (2017b), para corrigir os efeitos de distorção, usando como input as coordenadas (x, y) determinadas no item anterior.
3. Aplicação de uma segunda rodada do PRAIA usando as coordenadas (x, y) corrigidas. Neste caso já não são analisadas as imagens como no caso da primeira execução do PRAIA (item 1), aqui a análise inicia a partir das posições corrigidas (item anterior).

3.4.1 PRAIA

O PRAIA foi desenvolvida em Fortran 77 pelo Dr. Marcelo Assafin¹⁷, é uma ferramenta que determina posições precisas e fotometria de objetos a partir de um grande número de imagens CCDs, usando basicamente posições e fluxos de estrelas de referência, obtidos a partir de catálogos estelares. O PRAIA é composto por várias tasks, as quais descrevemos a seguir.

Header extraction: Task encarregada de extrair parâmetros necessários (coordenada do apontamento, data de observação, etc.) do header das imagens.

¹⁶Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2630 @2.30GHz.

¹⁷Professor do Observatório do Valongo - Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Astrometry: Task para fazer a redução astrométrica propriamente dita, posições dos objetos de referência são automaticamente detectadas com ajuda de catálogos estelares de referência. O Gaia é nosso catálogo de referência, que usamos o primeiro release (DR1) desde setembro de 2016, e a partir de abril de 2018, usamos o segundo release (DR2), até a próxima liberação de dados astrométricos.

Target search: Task que identifica e armazena, usando um formato padrão, as posições do objeto alvo. Efemérides do JPL são usadas para obter posições teóricas dos objetos e compará-las com as posições já determinadas pelo PRAIA astrometry. Embora que esta task já estar implementada nas últimas versões do PRAIA astrometry é importante considerar a separação dos processos de astrometria e de procura de posições do objeto alvo, principalmente, no caso de grande quantidade de dados.

Funcionamento do PRAIA astrometry

Aqui apresentamos de forma resumida o funcionamento do código PRAIA para fazer a astrometria.

1. Identificação de objetos na imagem CCD.
2. Determinação dos centroides (x, y) dos objetos identificados a partir de uma gaussiana circular.
3. Identificação das estrelas de referência na imagem a partir de um catálogo estelar (Gaia DR2). Isto é feito extraindo as posições das estrelas contidas numa região de tamanho duas vezes o tamanho angular do CCD e centrada no centro da imagem.
4. Aplicação da projeção gnomônica nas posições das estrelas de referência identificadas. Seguem as equações de transformação.

$$\begin{aligned}\xi &= \frac{\cos \delta \sin \Delta\alpha}{\sin \delta \sin \delta_0 + \cos \delta \cos \delta_0 \cos \Delta\alpha} \\ \eta &= \frac{\sin \delta \cos \delta_0 - \cos \delta \sin \delta_0 \cos \Delta\alpha}{\sin \delta \sin \delta_0 + \cos \delta \cos \delta_0 \cos \Delta\alpha}\end{aligned}\tag{3.1}$$

Onde:

(α_0, δ_0) são as coordenadas de um ponto de referência (centro ou esquina da imagem CCD) e $\Delta\alpha = \alpha - \alpha_0$.

5. Determinação dos coeficientes de relacionamento entre coordenadas (x, y) sobre a imagem CCD e a projeção gnomônica (ξ, η) das coordenadas equatoriais (α, δ) das estrelas de referência. Para um polinômio de grau um em (x, y) , temos.

$$\begin{pmatrix} \xi \\ \eta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b & c \\ d & e & f \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

Onde a, b, \dots, f são os coeficientes de relacionamento a serem determinados.

A determinação desses coeficientes é feito usando o método de mínimos quadrados.

O polinômio usado na equação 3.2 é de grau um, podendo ter também a necessidade de aplicar polinômios de maior grau. Nesses casos seria necessárias maior quantidade de estrelas de referência para determinar os respectivos coeficientes.

6. Com os coeficientes já determinados, aplica-se a equação 3.2 agora para determinar as coordenadas (ξ, η) para todos os objetos identificados na imagem CCD.
7. Finalmente, aplica-se a projeção gnomônica inversa (equações 3.3) para determinar as coordenadas celestes dos objetos.

$$\begin{aligned} \alpha &= \alpha_0 + \arctan \left(\frac{\xi}{\cos \delta_0 - \eta \sin \delta_0} \right) \\ \delta &= \arctan \left(\frac{\eta \cos \delta_0 + \sin \delta_0}{\sqrt{\xi^2 + (\cos \delta_0 - \eta \sin \delta_0)^2}} \right) \end{aligned} \quad (3.3)$$

A escala de pixel, que no caso da DECam é 0,263 segundos de arco por pixel, deve ser considerada antes de aplicar a projeção gnomônica direta e inversa. A escala de pixel deve ser multiplicada (no caso das equações 3.3) ou dividida (no caso das equações 3.1).

3.5 Refinamento das órbitas

Observar TNOs com os telescópios atuais é uma tarefa difícil, devido ao fato desses corpos estarem muito distantes, possuírem brilho tênue e ter órbitas de longos períodos (centenas de anos no caso dos TNOs) e, portanto, apenas uma fração da órbita está coberta. Por tais motivos, as órbitas deles ainda não estão bem determinadas. O DES está nos fornecendo uma quantidade considerável de imagens com

observações destes objetos. Fazendo uma redução astrométrica é possível determinar as posições deles, e assim, melhorar as órbitas atuais.

O refinamento das órbitas é obtido com o código Numerical Integration of the Motion of an Asteroid (NIMA; DESMARS *et al.*, 2015). O NIMA começa com os parâmetros orbitais existentes e, em seguida, corrige iterativamente o vetor de estado das diferenças entre observações e posições calculadas através de mínimos quadrados. O NIMA adota um esquema de pesagem específico que leva em consideração a precisão estimada de cada posição (σ_i), dependendo do observatório e do catálogo estelar usado como referência para determinar as posições observadas e o número de observações obtidas durante a mesma noite no mesmo observatório (N_i), bem como um possível bias devido ao observatório (b_i). A variância final da observação i é dada por $\omega_i^2 = N_i b_i^2 + \sigma_i^2$. Como consequência, o peso é dado por $1/\omega_i^2$. Esse esquema de pesagem é particularmente relevante quando consideramos posições de épocas antigas que não usam o catálogo *Gaia* como referência.

Os valores usados no esquema de pesagem do NIMA são descritos em DESMARS *et al.* (2015) e foram consolidados antes da liberação dos dados astrométricos da missão *Gaia*. Portanto, o código foi aprimorado para aproveitar as observações do DES e as liberações do *Gaia*. Dessa maneira, adotamos $\sigma_i = b_i = 0,125$ para observações reduzidas com o *Gaia* DR1 e $\sigma_i = b_i = 0,1$ para observações reduzidas com o *Gaia* DR2. Enfatizamos que o último é o caso das observações de DES aqui apresentadas.

É possível executar o NIMA, com a ajuda de poucos scripts, de maneira não supervisionada, para que seja adequado para um pipeline. Uma de suas saídas é a efeméride do objeto em um formato (*bsp* – binary Spacecraft and Planet Kernel) que pode ser facilmente usado pelas ferramentas SPICE/NAIF (ACTON, 1996; ACTON *et al.*, 2018) para derivar o vetor de estado de um determinado corpo para qualquer instante de tempo.

Cada um dos scripts do NIMA é executado tipicamente em forma sequencial. Seguem algumas observações importantes sobre NIMA.

- Parâmetros de entrada são fornecidos manualmente logo depois da execução de um dos scripts do NIMA.
- Os arquivos *bsp* e de posições astrométricas determinadas são fornecidas manualmente dentro do diretório do NIMA.
- No caso de objetos não numerados é necessário procurar o código *spk* do objeto e adicioná-lo manualmente num arquivo ASCII do NIMA.

Entretanto, eu desenvolvi um código em Python para gerenciar os scripts NIMA entre outras funções descritas a seguir.

- Todos os parâmetros de entrada são definidos num único arquivo de configuração.
- Os arquivos bps e de posições astrométricas são fornecidas automaticamente dentro do diretório do NIMA.
- Procura o código spk dentro dos arquivos bsp baixados da JPL e o adiciona no arquivo do NIMA.

O NIMA leva em torno de um minuto para refinar a órbita de um objeto e gerar um arquivo de efeméride válido para 10 anos, o que significa que para refinar as órbitas dos 202 objetos com posições astrométricas levaria cerca de 4 horas. Uma vez liberado o catálogo Gaia DR2 em abril de 2018, foi necessário fazer novamente os procedimentos de redução astrométrica e refinamento de órbitas. Para refinar as órbitas só foi necessário substituir as posições astrométricas determinadas usando Gaia DR1 com as determinadas usando Gaia DR2 e executar o código Python e esperar em torno de 4 horas para obter os resultados.

A figura 3.6 mostra um dos resultados obtidos, comparando as efemérides do NIMA com a fornecida pela JPL para o TNO 1999 RB₂₁₆. Com o apoio do nosso colaborador do Observatório do Paris, o Dr. Desmars, foram publicados em <http://lesia.obspm.fr/lucky-star/des/nima/>, os resultados do refinamento de órbitas dos 202 TNOs e Centauros.

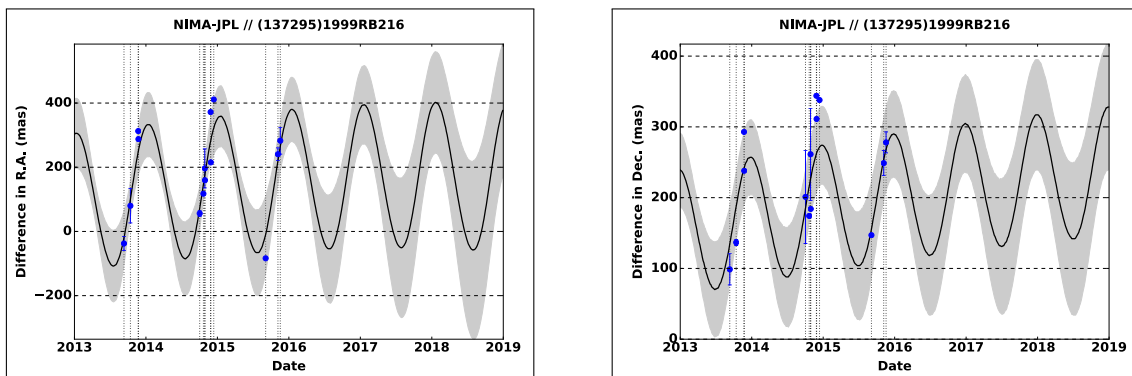


Figura 3.6: Diferença em ascensão reta (esquerda) e declinação (direita) entre as efemérides NIMA e JPL (linha preta). Pontos azuis representam posições oriundas das observações do DES. A região cinza representa a incerteza (1σ) da efeméride NIMA.

3.5.1 NIMA

O NIMA foi desenvolvido em Fortran 90 e refina a órbita já existente de objetos do Sistema Solar a partir de novas posições astrométricas. NIMA faz uma integração numérica usando o método de Gauss-Radau de ordem 15, para resolver a equação

de movimento (problema de n corpos, equação 3.4) devido à perturbação do Sol e dos oito planetas e depois ajusta as órbitas obtidas levando em conta as posições disponíveis na literatura e as determinadas a partir de novas observações.

$$\ddot{\vec{r}} = -\frac{G(M_{\odot} + m)}{r^3}\vec{r} - G\sum_{i=1}^{n=8}m_i\left(\frac{\vec{r} - \vec{r}_i}{|\vec{r} - \vec{r}_i|^3} + \frac{\vec{r}_i}{r_i^3}\right) \quad (3.4)$$

Onde:

G é a constante de gravitação universal.

M_{\odot} é a massa do Sol.

$m, \vec{r}, \ddot{\vec{r}}$ representam a massa, o vetor de posição e aceleração heliocêntrica do pequeno corpo do Sistema Solar respectivamente.

m_i, \vec{r}_i representam a massa e o vetor de posição do i -ésimo planeta ($i = 1, 2, \dots, 8$)

As condições iniciais para resolver a equação 3.4 são dadas pela posição (\vec{r}_0) e velocidade (\vec{v}_0) iniciais, as quais são obtidas a partir de um ajuste estatístico usando as posições observadas. Segue uma breve descrição dos serviços que o NIMA usa para obter informações de elementos orbitais iniciais, posições astrométricas já registradas, e efemérides de objetos.

AstDyS: Asteroid Dynamic Site, este site fornece dados sobre asteroides, incluindo posições astrométricas, elementos orbitais, efemérides com incerteza e muito mais. Detalhes de este serviço em: <https://newton.spacedys.com/astdys/>

MPC: O Minor Planet Center é a única localização mundial para o recebimento e distribuição de medições posicionais de planetas menores, cometas e satélites naturais irregulares externos dos principais planetas. O MPC é responsável pela identificação, designação e cômputo de órbita para todos esses objetos. Detalhes de este serviço em: <https://minorplanetcenter.net/>

JPL: Jet Propulsion Laboratory é um centro tecnológico de pesquisa da NASA, responsável pelo desenvolvimento de sondas espaciais não tripuladas. Entre as informações fornecidas pelo JPL temos as efemérides dos planetas, satélites e dos pequenos corpos do Sistema Solar.

Scripts do NIMA

O NIMA é composto por vários scripts que gerenciam os códigos Fortran desenvolvidos. A seguir, damos uma breve descrição destes scripts.

sc_wget: Acessa ao banco de dados do AstDyS ou MPC para baixar informações dos elementos orbitais e observações, e os transforma num formato específico.

sc_esoopd: Transforma as nossas posições astrométricas determinadas no formato padrão do NIMA. A seguir um exemplo dos parâmetros que deve conter o arquivo de entrada para este script.

1999 RB216.txt

1	01	35	49.5574	+03	36	38.104	23.123	2456545.87105049	W84	V
2	01	35	49.5485	+03	36	38.024	22.291	2456545.87398248	W84	V
3	01	35	49.5435	+03	36	38.009	22.117	2456545.87537180	W84	V

Onde as seis primeiras colunas representam ascensão reta e declinação no formato hmd e dms, respectivamente, as quatro colunas seguintes representam a magnitude determinada, a data juliana, o código do observatório (Cerro Tololo - DECam: W84) e o código do catálogo (Gaia DR2: V), respectivamente.

sc_cat: Concatena todas as posições em um arquivo.

sc_merge: Ponderação das posições dependendo do observatório e se a observação foi feita numa mesma noite.

sc_fit: Ajusta a órbita às observações.

sc_importbsp: Importa os arquivos bsp do JPL.

sc_diffjplomc: Compara as efemérides do NIMA e do JPL.

sc_makebsp: Gera um arquivo bsp com os coeficientes do polinômio de Chebyshev.

sc_ephem: Determina a efemérides (Ascensão reta, declinação, distancia, etc.) a partir do arquivo bsp ou da integração numérica.

3.5.2 SPICE

SPICE é um sistema de informações desenvolvido pelo Navigation and Ancillary Information Facility (NAIF) sob a direção da Divisão de Ciências Planetárias da NASA. Ele pode calcular vários tipos de parâmetros de geometria de observação em instantes específicos, por exemplo:

- Posição e velocidade de planetas, satélites, cometas, asteroides e espaçonaves.
- Dimensões, formas e orientação de planetas, satélites, cometas e asteroides.
- Orientação de uma espaçonave e suas diversas estruturas móveis.
- Localização do campo de visão do instrumento na superfície ou atmosfera de um planeta.

Os componentes lógicos do sistema SPICE usados para realizar esses componentes estão resumidos a seguir.

- S:** Efemérides de **S**pacecraft, dadas em função do tempo. (SPK)
- P:** Efemérides de **P**lanetas, satélites, cometas ou asteroides, ou mais geralmente, localização de qualquer corpo-alvo, dado em função do tempo. (também SPK)
- I:** Informações do **I**nstrumento contendo dados descritivos peculiares aos aspectos geométricos de um instrumento científico específico, como tamanho do campo de visão, forma e parâmetros de orientação. (IK)
- C:** Informações de orientação, contendo uma transformação, tradicionalmente denominada “matriz **C**”, que fornece ângulos de apontamento (orientação) no tempo para uma nave espacial na qual os instrumentos científicos estão montados. (CK)
- E:** Informações sobre **E**ventos, resumindo as atividades da missão - planejadas e imprevistas. Os dados de eventos estão contidos no conjunto de arquivos do SPICE E-kernel, que consiste em três componentes: Planos de ciência, Sequências e Notas. (EK)

SPICE Toolkit

O sistema SPICE inclui uma coleção de ferramentas, SPICE Toolkit¹⁸, cujo principal componente é uma biblioteca de APIs (sub-rotinas) necessárias para ler os arquivos kernels e calcular os parâmetros da geometria de observação (distância, RA, Dec, etc.) de interesse dos cientistas.

O SPICE Toolkit foi originalmente implementado em Fortran 77, mas agora também está disponível nas interfaces nativas C, IDL, MATLAB e Java. Terceiros oferecem o SPICE Toolkit em Python, Ruby, Swift e Julia.

Arquivos SPK

Os arquivos SPK (Spacecraft and Planet Kernel) são arquivos binários que podem ser interpolados para recuperar o estado (posição e velocidade) de um objeto a qualquer instante do tempo. Os arquivos SPK (com a extensão .bsp) podem conter efemérides para qualquer tipo de espaçonave, veículo ou corpo do Sistema Solar.

¹⁸<https://naif.jpl.nasa.gov/naif/toolkit.html>

3.6 Predição de ocultações estelares

A predição de ocultações estelares consiste em dizer quando e onde, sobre a Terra, a sombra resultante do evento de ocultação será visível. Para fazer a predição compara-se as posições de um TNO num certo intervalo de tempo, e as posições de estrelas situadas na vizinhança do seu caminho no céu. Uma ocultação estelar acontece quando as posições do TNO e de uma estrela forem muito próximas do ponto de vista de um certo observador, projetando uma sombra sobre ele na superfície do globo terrestre. A localização de observadores em diferentes pontos (ou cordas) da sombra projetada permite o estudo da forma do TNO.

Nesta seção, fazemos uma breve descrição das condições que devem cumprir tanto o objeto ocultador (TNO) como o objeto ocultado (estrela), para poder ocorrer uma ocultação estelar. Detalhes são apresentados em ASSAFIN *et al.* (2010).

Seleção de posições dos TNOs

Optamos impor algumas condições para o procedimento de determinação de ocultações, como dadas a seguir:

1. As efemérides geradas¹⁹ para os TNOs são geocêntricas e feitas para o período de tempo onde se pretende predizer alguma ocultação. Ainda, o passo do tempo deve ser suficientemente pequeno (1 minuto, por exemplo) para que as posições entre datas consecutivas possam ser interpoladas linearmente.
2. Considerar posições dos TNOs que cumpram a condição $\psi > 30^\circ$, onde ψ é definida pelo ângulo Sol-geocentro-TNO. Isto é feito para não levar em conta os eventos que, certamente, ocorreriam angularmente próximos ao Sol.

Busca de estrelas candidatas

Uma estrela é denominada candidata quando tem as condições de ser ocultada por algum TNO. As posições das estrelas são obtidas a partir do catálogo Gaia, e serão selecionadas as que pertencem à vizinhança da órbita do TNO.

Defina-se o raio de busca θ , como a soma do raio angular da Terra e do TNO visto do próprio TNO (ver figura 3.7). Ele pode ser calculado com a seguinte equação.

$$\theta = \arctan\left(\frac{R+r}{\ell}\right) \quad (3.5)$$

onde

ℓ é a distância Terra-TNO.

¹⁹Usamos as sub-rotinas do SPICE e os resultados do NIMA aplicados aos dados do MPC + DES, para gerar as efemérides do TNO.

R e r são os raios da Terra e do TNO respectivamente.

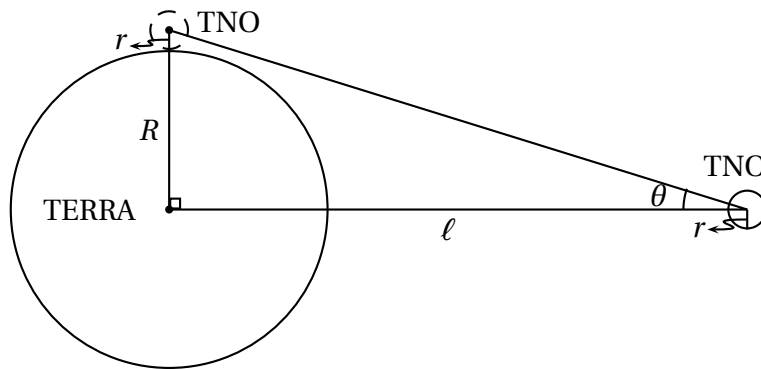


Figura 3.7: Geometria do sistema Terra-TNO, para calcular o raio de busca θ .

Se a distância angular entre a estrela e o TNO é menor que o raio de busca, seria possível a observação na Terra do evento.

A precisão nas efemérides dos TNOs é frequentemente baixa, por conta das poucas observações, o que o DES potencialmente ajuda a resolver quando se põe em prática uma rotina de refinamento das efemérides. Além disso, observações astrométricas do TNO em datas próximas ao evento ajudam a refinar a predição.

Predição de ocultação

Tendo as posições dos TNOs e das estrelas candidatas, podemos prever a ocorrência de uma ocultação. Para isso é preciso calcular alguns parâmetros para obter informações como a localização da sombra na Terra, instante de tempo no qual pode ser detectada, etc.

A figura 3.8 mostra as posições aparentes no plano tangente à esfera celeste com o observador no centro da Terra, a partir de duas posições arbitrárias (anterior e posterior ao encontro com a estrela) do TNO nos instantes t_1 e t_2 , separadas por uma distância D .

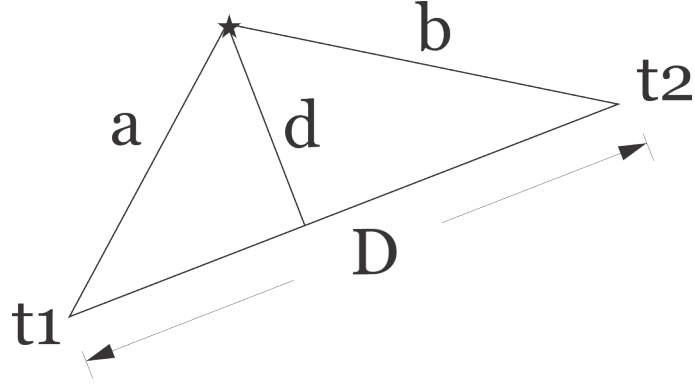


Figura 3.8: Configuração geométrica dos parâmetros para uma ocultação estelar. D é a distância de separação entre as posições anterior e posterior do TNO para os instantes t_1 e t_2 . a e b são as distâncias geocêntricas aparentes à estrela. d é a distancia mínima entre a estrela e o TNO.

Usando a geometria mostrada na figura 3.8, podemos calcular a distância mínima d entre o TNO e a estrela:

$$d = \sqrt{a^2 - \left(\frac{a^2 - b^2 + D^2}{2D}\right)^2} \quad (3.6)$$

Em particular, se o ângulo formado pelos lados a e b for 90° , a equação 3.6 reduz-se à conhecida relação $D \times d = a \times b$.

A partir da equação de movimento retilíneo uniforme, podemos calcular o instante central t_0 em que irá acontecer a maior aproximação. Ele é dado por:

$$t_0 = t_1 + (t_2 - t_1) \sqrt{\frac{a^2 - d^2}{D^2}} \quad (3.7)$$

onde $t_2 > t_1$.

Também pode-se calcular a velocidade v da sombra sobre a Terra através de

$$v = \frac{A \sin D}{t_2 - t_1} \quad (3.8)$$

onde A é a distância (dada em quilômetros) ao TNO. As velocidades das sombras são basicamente devidas à velocidade orbital da Terra.

O tempo solar local aproximado LST , que determina o período de tempo (dia ou noite) da Terra em que irá acontecer o evento, pode ser calculado com a seguinte equação:

$$LST = t_0 + long = t_0 + AR - MSTG \quad (3.9)$$

onde:

$long$: é a longitude do ponto sub-planetário. $long > 0$ correspondem a longitudes

leste e $long < 0$ a oeste.

AR : é a ascensão reta do TNO.

$MSTG$: é o Tempo Sideral Médio em Greenwich.

A figura 3.9 é a projeção da Terra e a perpendicular ao plano do desenho é a direção centro da Terra-estrela.

Define-se a aproximação máxima (CA) como a distância mínima (em segundos de arco) desde o geocentro até o centro do TNO no plano da projeção.

Define-se o ângulo de posição (PA) como o ângulo percorrido em sentido horário, desde o norte da Terra até o segmento definido por CA.

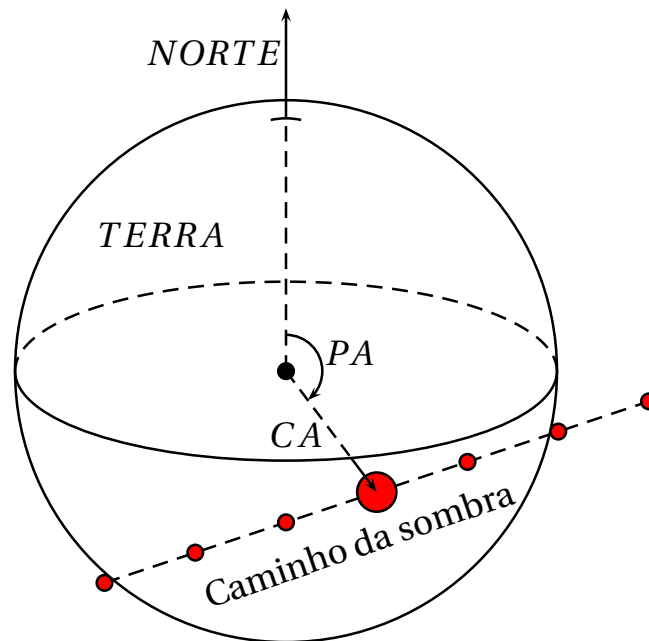


Figura 3.9: Geometria de um mapa de previsão de ocultação. Mostrando a distância mínima (CA) e o ângulo de posição (PA). O maior ponto vermelho representa a sombra do TNO no instante de aproximação máxima à estrela ocultada.

Exposições mais longas, permitidas pelos eventos mais lentos, facilitam a observação. Para destacar esses eventos, são normalizadas as magnitudes das estrelas para a velocidade típica das sombras ($v = 20$ km/s) para o TNO em oposição. Então, a magnitude M^* das estrelas, serão dadas por:

$$M^* = M + 2,5 \log_{10} \left(\frac{v}{20 \text{ km/s}} \right) \quad (3.10)$$

Considerando as relações anteriores para as efemérides dos TNOs geradas pelo NIMA é construída a tabela 3.9. A partir dela são gerados os mapas de previsões de ocultações (ver exemplo na figura 3.10).

year-m-d h:m:s UT	RA h m s	Dec d m s	C/A arcsec	P/A °	v km/s	Δ au	G^*
2019-08-15 15:12:37	00 37 17,3209	+01 33 39,786	0,296	152,72	-16,32	44,94	18,5
2019-08-19 09:16:29	00 37 07,2760	+01 32 22,853	0,149	153,20	-17,66	44,90	21,1
2019-10-16 21:27:25	00 33 24,4758	+01 06 51,334	0,424	336,77	-24,71	44,69	17,6
2019-12-03 13:21:45	00 31 00,6311	+00 52 21,955	0,196	341,32	-09,30	45,21	13,7

Tabela 3.9: Predição de ocultação estelar pelo TNO 1996 RR₂₀. Coluna (1): Data e a hora que irá acontecer o evento; Colunas (2) e (3): Coordenadas geocêntricas J2000 da estrela; Coluna (4): Aproximação máxima à estrela; Coluna (5): Ângulo de posição; Coluna (6): Velocidade da sombra; Coluna (7): Distância do TNO ao observador; Coluna (8): Magnitude normalizada G^* .

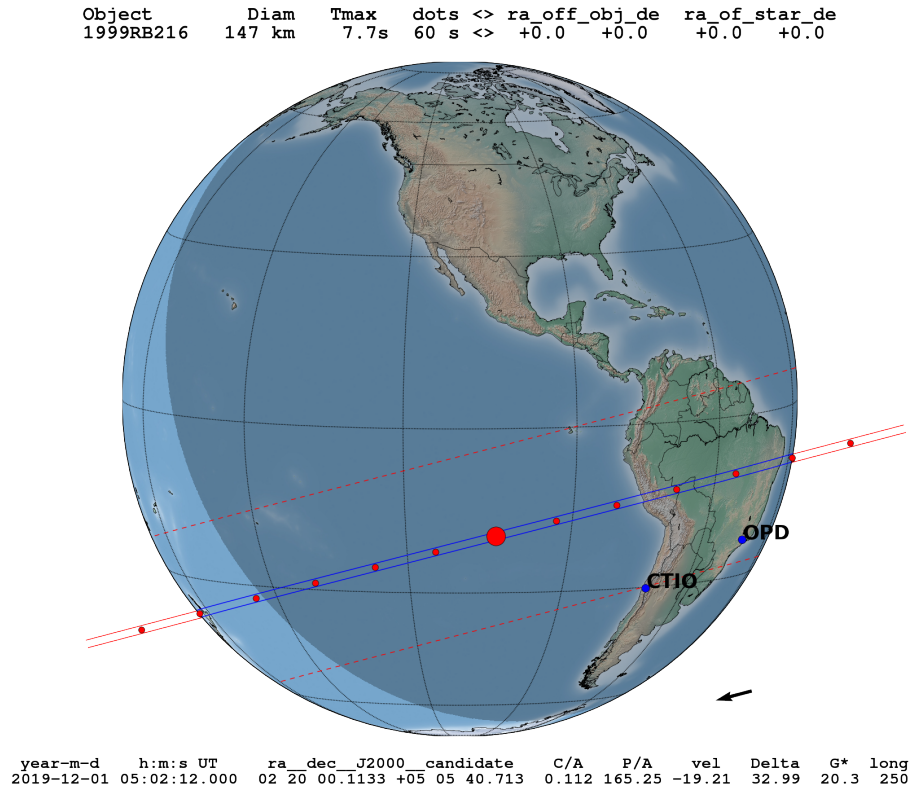


Figura 3.10: Mapa de predição de ocultação estelar pelo TNO 1999 RB₂₁₆: A região dentro das linhas de cor azul representa a trajetória da sombra do TNO, onde a distância de separação entre elas representa o tamanho da sombra. A região de cor cinza representa a noite. O maior ponto vermelho representa o momento quando acontece a máxima aproximação e os pontos vermelhos pequenos correspondem às posições a cada minuto de tempo. No rodapé se mostra informação do evento (ver tabela 3.9).

3.6.1 PRAIA OCC

Esta task do PRAIA, desenvolvida em Fortran pelo Dr. Assafin²⁰, identifica estrelas candidatas a serem ocultadas por pequenos corpos do Sistema Solar. Entre seus resultados, é gerada uma tabela com informações das estrelas e do evento de ocultação delas por um objeto do Sistema Solar (ver tabela 3.9).

O tempo de execução para procurar estrelas candidatas a serem ocultadas por um objeto específico (num intervalo de um ano) é de um minuto aproximadamente. A seguir os principais dados de entrada desta task.

Efemérides do objeto: Informações do objeto as quais são armazenadas num arquivo ascii. A seguir os principais parâmetros.

- Data e hora (UTC).
- Ascensão reta e declinação correspondente a data (item anterior), em formato sexagesimal.
- Distância geocêntrica do objeto em unidades de quilômetros.
- Ângulo de elongação solar (ângulo do sistema Sol-geocentro-objeto) em graus.

Catálogo estelar: Informações das estrelas que se encontram na vizinhança do objeto (ver, por exemplo, a figura 5.21). A seguir os principais parâmetros.

- Ascensão reta (baricêntrica) e a respectiva incerteza em unidades de horas e graus respectivamente.
- Declinação (baricêntrica) e a respectiva incerteza, ambos em graus.
- Movimento próprio em direção a RA. e Dec. e as respectivas incertezas, todos em graus/ano.

3.6.2 Mapa de predição de ocultação

O código para desenhar os mapas de predições de ocultações estelares (como mostrado na figura 3.10) foi desenvolvido em Python pelo Dr. A. Gomes²¹. Está baseado nas bibliotecas `basemap`²² e `astropy`²³. A entrada principal para este código é o arquivo gerado pelo PRAIA OCC (tabela 3.9).

²⁰Professor do Observatório do Valongo - UFRJ.

²¹Pós-doc UNESP Guaratinguetá.

²²<https://github.com/matplotlib/basemap>

²³<https://www.astropy.org/>

Capítulo 4

Análises e Resultados: astrometria e refinamento de órbitas

Neste capítulo, são basicamente apresentados os resultados obtidos por BANDA-HUARCA *et al.* (2019).

A alta qualidade das imagens do DES nos forneceu um conjunto preciso de posições dentro da faixa das magnitudes observadas. Dessa forma, optamos por agrupar os objetos aqui estudados de acordo com o número de observações e com a incerteza de suas efemérides existentes, e não com a precisão que obtivemos para as posições observadas. Ainda, usamos as posições das efemérides como parâmetro primário para identificar a posição observada de um determinado TNO/Centauro nas imagens. Isto não deve ser confundido com o uso do SkyBoT, que foi utilizado para nos alertar sobre a presença de objeto de interesse num dado CCD. Feita a astrometria nesse CCD, posições observadas eram comparadas com a posição do objeto dada pela efeméride e a proximidade entre elas foi o parâmetro primeiro para uma identificação positiva.

Os métodos que utilizamos aqui tiveram como objetivo evitar ao máximo detecções espúrias e levaram em conta a necessária menor intervenção possível do usuário. Foi assim, em particular, para a filtragem dos dados.

4.1 Filtragem

A determinação das posições de TNOs e Centauros a partir das imagens do DES foi sujeita a pelo menos três restrições, as quais são descritas a seguir.

- A posição da efeméride do alvo deve cair dentro de uma caixa de tamanho $4'' \times 4''$ centrado em sua contraparte observacional. Se tiver mais de um objeto nesta caixa, todos os candidatos serão listados. Num segundo passo (que ocorre mesmo quando apenas um candidato é selecionado), as magnitudes são

utilizadas como critério. Eventualmente, candidatos (mesmo que haja apenas um) podem ser eliminados.

- Uma filtragem iterativa de 3σ nos offsets das posições, obtida a partir das diferenças entre as observações e uma efeméride de referência, para eliminar dados fora do esperado.
- A terceira restrição é baseada em uma breve inspeção das magnitudes obtidas no banco de dados do DES para cada filtro. Diferenças maiores que $\Delta = 0,9 \text{ mag}$ entre os valores mais brilhantes e os mais fracos em cada filtro, quando várias medidas estavam disponíveis, foram investigadas e eventualmente eliminadas. Esse valor de Δ leva em consideração uma variação máxima de $\sigma_S = 0,15$ (valor absoluto) na magnitude devido à rotação do objeto, uma incerteza máxima de $\sigma_M = 0,1$ na magnitude observada e uma variação máxima de $\sigma_P = 0,25$ (valor absoluto) na magnitude observada devido ao ângulo de fase. Em outras palavras $\Delta \sim 3 \times \sqrt{\sigma_S^2 + \sigma_M^2 + \sigma_P^2}$.

Esperava-se que essas restrições proporcionassem uma identificação confiável dos objetos do Sistema Solar nas imagens, com a eliminação mínima de bons dados. No entanto, um ajuste de órbita preliminar de alguns objetos ainda mostrou a presença de valores atípicos reais (erros de identificação). Para resolver isso, um quarto filtro foi aplicado aos nossos dados e afetou principalmente as fontes cujas efemérides apresentavam grandes incertezas (fontes de extensão e duvidosa, ver a seção seguinte). Este filtro tem como entrada os offsets que permaneceram da aplicação dos filtros anteriores e funciona da seguinte maneira.

Primeiro, uma média (m_0) e um desvio padrão (s_0) são obtidos a partir de um processo iterativo de σ -clipping, onde σ é um valor baixo (1,5 no presente caso). O desvio padrão adotado é o maior valor entre 10 mas e s_0 , conforme dado pelas iterações. Em seguida, foi mantida toda posição cujo offset distava de m_0 até N vezes o valor de s_0 . Mais frequentemente, $N = 5$ foi utilizado.

Como resultado desse processo, as identificações errôneas de TNOs e Centauros das imagens foram reduzidas ao mínimo, embora ainda seja possível encontrar dados atípicos reais principalmente nas fontes duvidosas.

4.2 Organização

Nossos resultados em astrometria estão organizados nas tabelas 4.4 a 4.6 e a respectiva distribuição das fontes no céu pode ser vista na figura 4.1.

A tabela 4.4 (principal) considera aquelas fontes para as quais a incerteza na efeméride ($1\sigma_E$) em ambos R.A./decl. é menor ou igual a $2''$ para TNOs e Centauros

e o número de observações (N) é maior ou igual a 3. A tabela 4.5 (extensão) considera aquelas fontes para as quais a incerteza na efeméride é $2'' < \sigma_E \leq 12''$ e $N \geq 5$. A tabela 4.6 (duvidosa) considera as demais fontes. Todas as incertezas nas efemérides usadas nessas tabelas foram obtidas do JPL em 27 de abril de 2018 e são referidas a 1 de janeiro de 2014 às 0h UTC. Observe que essas incertezas são dadas conforme aparecem nas respectivas efemérides, ou seja, valores de 3σ .

Observe que a escolha da caixa quadrada $4''$, embora um pouco arbitrária, é um bom compromisso dentro da organização de nossos resultados para manter identificações de fontes confiáveis nas tabelas 4.4 e 4.5, a maioria na tabela 4.4. Poucos objetos seriam movidos da tabela 4.5 para a 4.4 se tivéssemos optado, por exemplo, por uma caixa quadrada de $5''$ ou $6''$. Isso ocorre porque os objetos na tabela 4.5 freqüentemente têm pelo menos uma coordenada (R.A./decl.) com uma grande incerteza na efemérides quando comparados às respectivas colunas na tabela 4.4. De qualquer forma, como mostrado mais adiante, os objetos na Tabela 4.5 também são uma contribuição para o refinamento da órbita.

4.2.1 A tabela de extensão: justificativa

A maioria (90%) das imagens CCD tratadas aqui possui menos de 1,100 objetos detectados. Sabendo que o tamanho de um CCD da DECam é $\sim 9' \times 18'$, podemos considerar que existe um objeto¹ em média, dentro de uma caixa de $24'' \times 24''$. Dessa forma, espera-se que uma caixa desse tamanho centralizada na posição de um objeto (calculada a partir de efemérides) na tabela 4.5 contenha a respectiva posição observada e uma estrela no campo. Se algum deles cair dentro de uma caixa de $4'' \times 4''$ ao redor da posição da efeméride, então essa posição observada será sinalizada como um alvo elegível. Se não for eliminado pelas outras etapas do processo de filtragem, essa posição observada será selecionada para refinar a respectiva órbita.

Adotamos o número cinco como o número mínimo de posições selecionadas filtradas que um objeto com uma incerteza na efeméride de $2'' < \sigma_E \leq 12''$ deve aparecer na tabela extensão. As órbitas para os objetos nesta tabela não têm a mesma qualidade que para os objetos na tabela 4.4. No entanto, conforme ilustrado na figura 3.6 (comparado com a figura 4.4, mostrada mais adiante no texto), as cinco ou mais posições de cada objeto nessa tabela são uma contribuição relevante para o refinamento de suas respectivas órbitas.

¹Qualquer sinal no CCD reconhecido como um objeto (estrela, objeto do Sistema Solar etc.).

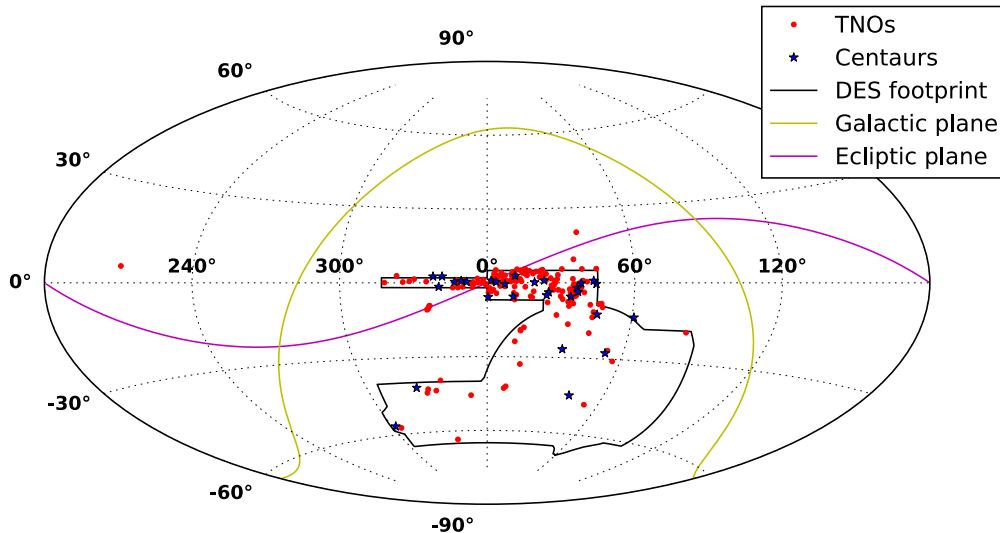


Figura 4.1: Projeção Hammer-Aitoff da esfera celeste para os TNOs (pontos vermelhos) e Centauros (estrelas azuis) para os quais pelo menos uma posição foi determinada, o footprint do DES é representado pela linha preta e os planos eclíptico (linha roxa) e galáctico (linha amarela) são mostrados também.

4.3 Precisão

Na análise astrométrica dessas imagens, é interessante introduzir aqui o conceito de magnitude limite, conforme apresentado por NEILSEN *et al.* (2015) e também discutido por MORGANSON *et al.* (2018).

A magnitude limite é aquela em que a magnitude de uma estrela é medida com uma incerteza de 0,1 mag. Pode-se mostrar que está relacionada a uma quantidade τ por

$$m_{lim} = m_0 + 1,25 \log \tau, \quad (4.1)$$

onde τ é um fator de escala para o tempo de exposição nominal (fornecido pelo header da imagem). Como consequência, um tempo de exposição efetivo pode ser definido como τ vezes o tempo de exposição nominal. A quantidade τ e a magnitude limite, portanto, podem ser usadas como um parâmetro de qualidade para uma determinada imagem. Para determinar a magnitude limite na banda r mostrada nas figuras 4.2 e 4.3, o valor $m_0 = 23,1$ foi obtido de NEILSEN *et al.* (2015) e os valores de τ foram obtidos diretamente no banco de dados DES para cada CCD (MORGANSON *et al.*, 2018).

A equação 4.1 é empírica e remete ao conceito de magnitude limite determinado para o DES. Esta não é a equação tradicional que se utiliza para determinar magnitude dado o fluxo e a constante instrumental. Esta equação leva em conta a qualidade da imagem e valores de m_0 também são fornecidos pelo DES (os valores de τ também são fornecidos). Uma noite de boa qualidade, em particular, tem como

resultado uma magnitude limite maior.

A precisão das observações para os objetos apresentados nas tabelas 4.4–4.5 (colunas 5 e 6) é ilustrada na figura 4.2, onde a magnitude limite média (22,9) na banda r (linha tracejada) define um limite aproximado nos painéis superiores a partir do qual as incertezas se tornam maiores, principalmente quando o número de observações é baixo. Também mostra que as fontes com um grande número (centenas) de observações têm magnitudes próximas ou mais fracas que essa magnitude limite.

Dois características relevantes são mostradas na figura 4.2. Em primeiro lugar, os painéis inferiores mostram que, mesmo em frames com o menor tempo de exposição (90 s), detectamos fontes com r tão fracas quanto $\sim 24,0$ com uma qualidade comparável à dos frames com um tempo de exposição de 400 s graças à excelente qualidade das imagens. Vale ressaltar que os objetos mais fracos são mais de 1 mag mais fracos que a magnitude limite média na banda r . Em segundo lugar, também é possível observar que o intervalo de incertezas em ascensão reta é maior do que em declinação. Essa característica provavelmente resulta do fato de que as incertezas nas efemérides (colunas 3 e 4, tabelas 4.4–4.6) são, em média, maiores em ascensão reta do que em declinação, uma vez que não verificamos uma diferença tão grande entre nossas medições em ascensão reta e declinação como discutido abaixo.

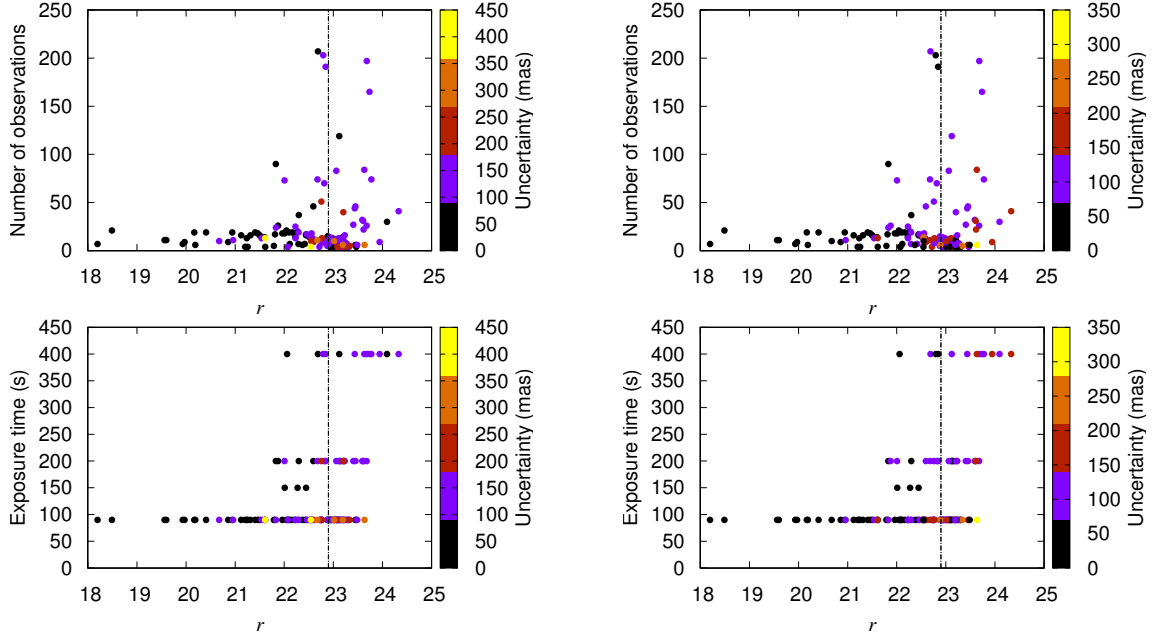


Figura 4.2: Incerteza na posição em função da magnitude e do número de observações em ascensão reta (painéis da esquerda) e declinação (painéis da direita) para os TNOs e Centauros nas tabelas 4.4 e 4.5. Nos painéis superiores, o número de observações é dado em função da magnitude. Nos painéis inferiores, os tempos de exposição são dados em função da magnitude. No caso de diferentes tempos de exposição para o mesmo objeto, o mais longo foi considerado. Em todos os painéis, a incerteza na posição é dada em mas e é codificada por cores. A linha tracejada fornece o valor da mediana (22.9) da magnitude limite na banda r para essas observações. Nos painéis superiores, o TNO (437360) 2013 TV₁₅₈ (ver tabela 4.4) não é mostrado devido ao seu grande número de observações (438). Em todos os painéis, o TNO 2015 RW₂₄₅ não é mostrado porque sua grande incerteza impediu uma visualização clara da variação de cores. Fonte: BANDA-HUARCA *et al.* (2019).

Os desvios padrão nas tabelas 4.4–4.6 (colunas 5 e 6), obtidos a partir das diferenças entre as posições observadas e as das respectivas efemérides JPL, é uma maneira comum de expressar a precisão na posição dos alvos do Sistema Solar. Essas diferenças variam em função do tempo conforme a incerteza nas efemérides aumentam, de modo que, no presente estudo, os desvios padrão fornecidos por essas colunas superestimam numericamente a precisão interna (ou repetibilidade) das medidas astrométricas.

Um segundo modelo empírico astrométrico (doravante C1), também desenvolvido pela colaboração DES e baseado em BERNSTEIN *et al.* (2017b), fornece soluções astrométricas aprimoradas para todas as exposições do DES para o primeiro a quarto ano do levantamento. Em C1, acredita-se que as soluções instrumentais sejam precisas com RMS de menos de 3 mas por coordenada (ver BERNSTEIN *et al.*, 2017b). Como consequência, toda medição astrométrica do DES será limitada pelas distorções atmosféricas estocásticas, tipicamente RMS de ~ 10 mas em uma única ex-

posição nesta solução. Observe que, em comparação com C0, C1 está disponível para um conjunto menor de exposições do DES.

Comparamos as posições que determinamos para TNOs e Centauros com todas aquelas resultantes de C1. Esta comparação está resumida na tabela 4.1, onde foram mantidas todas as diferenças que encontramos entre nossos resultados e os de C1. É importante observar, no entanto, que C1 não fornece uma solução para todos os CCDs. Ressaltamos que C1 é usado apenas para fornecer uma estimativa mais realista da precisão interna de nossas medições, bem como uma comparação entre nossas posições e as do modelo empírico astrométrico mais recente desenvolvido pela colaboração DES. C1 não participa de nenhuma das determinações astrométricas fornecidas aqui.

Classe	$\Delta\alpha\cos\delta$	$\Delta\delta$	$\sigma_\alpha\cos\delta$	σ_δ	Medições
Dinâmica	(mas)				
TNO	3	-4	11	9	142
Centauro	2	-5	12	5	22

Tabela 4.1: Diferenças entre os resultados astrométricos aqui apresentados e o modelo empírico do DES. Colunas (2) e (3): média das diferenças entre este trabalho e o modelo empírico em ascensão reta e declinação, respectivamente. Colunas (4) e (5): desvio padrão das medições utilizadas para determinar os valores nas colunas (2) e (3), respectivamente. Sentido das diferenças: este trabalho menos o modelo empírico.

Os desvios padrão mostrados na tabela 4.1 (colunas 4 e 5) são uma estimativa mais confiável da precisão interna de nossas medições, em comparação com os obtidos nas tabelas 4.4–4.5. Essa precisão interna é dada pelo desvio padrão das medições, não pela média. Portanto, a pequena diferença sistemática entre as duas soluções (colunas 2 e 3) não pode ser considerada insignificante. Parte deles, pelo menos, pode ser explicada pelo fato de o modelo empírico ser baseado no *Gaia* Data Release 1 (Gaia DR1; LINDEGREN *et al.*, 2016) que não apresenta movimentos próprios para a maioria das estrelas. Também vale ressaltar que, quando nossas posições são referidas ao Gaia DR1 (ou seja, o *Gaia* DR1 é usado como referência para astrometria), os valores desses desvios-padrão em R.A. e decl. são mais parecidos entre si.

Por outro lado, uma estimativa realista da precisão final na posição dos alvos (ou quão precisas suas coordenadas equatoriais são dadas no International Celestial Reference Frame (MA *et al.*, 1998)) pode ser obtida através da raiz do valor quadrático médio (RMS) das estrelas de referência, conforme indicado pelas diferenças entre as posições observadas e do catálogo e a precisão na determinação do centroide do

objeto. Este último, bem como a RMS das estrelas de referência para diferentes filtros e faixas de magnitude, são fornecidos pela tabela 4.2. Nesse contexto, essa precisão final para as duas coordenadas equatoriais é obtida, no nível de 1σ , a partir da quantidade

$$\sigma_F = \sqrt{\sigma_C^2 + \sigma_R^2}, \quad (4.2)$$

onde σ_C é a incerteza na determinação do centroide dos objetos e σ_R é a RMS das estrelas de referência. Para o filtro r , por exemplo, $12 \text{ mas} < \sigma_F < 20 \text{ mas}$.

Intervalo de mag.	<i>g</i>	<i>r</i>	<i>i</i>	<i>z</i>	<i>g</i>	<i>r</i>	<i>i</i>	<i>z</i>
	Centroide (mas)				Estrelas de ref. (mas)			
$18 \leq \text{mag} < 19$	7	5	5	5	14	11	11	10
$19 \leq \text{mag} < 20$	11	6	5	6	14	12	11	10
$20 \leq \text{mag} < 21$	17	9	7	8	15	12	11	11
$22 \leq \text{mag}$	26	13	10	12	15	15	12	12

Tabela 4.2: Valores gerais de incerteza. Coluna (1): intervalo de magnitude. Colunas (2)–(5): precisão na determinação do centroide dos TNOs e Centauros em função da magnitude para um determinado filtro. Colunas (6)–(9): RMS das estrelas de referência em função da magnitude para um determinado filtro. Nota: essas magnitudes não se correlacionam diretamente com as de *Gaia*.

4.4 Cronometragem

Ao lidar com objetos do Sistema Solar, o tempo de exposição médio (tempo de abertura do obturador mais metade do tempo de exposição) é de particular importância. A DECam possui um obturador que leva um tempo (cerca de 1 s) para atravessar o plano focal, portanto a média real do tempo exposto depende da posição no plano focal. Para compensar esta característica, o tempo de exposição médio foi obtido adicionando

$$0,5 \times (\text{exposure time} + 1,05 \text{ s}) \quad (4.3)$$

ao valor do MJD conforme lido no header das imagens (see FLAUGHER *et al.*, 2015). Isto se torna particularmente relevante ao lidar com objetos do Sistema Solar interno.

4.5 Eficiência de detecção

Na figura 4.3, mostramos a eficiência de detecção medida pelo número de posições observadas dividido pelo número de imagens para um determinado objeto. Esta

figura possui contribuições de todas as imagens correspondidas aos objetos nas tabelas 4.4 e 4.5, incluindo aquelas tiradas sob céu não fotométrico. Essa eficiência justifica as estatísticas de detecção mais favoráveis mostradas na tabela 4.3 (coluna 3) em comparação com as estimativas inicialmente fornecidas pela tabela 3.3. A coluna (2) da tabela 4.3 indica a quantidade de objetos (TNOs e Centauros) que foram identificados pelo SkyBoT nas regiões observadas pelo DES, e a coluna (3) representa o número total de objetos que foram efetivamente medidos no processo da redução astrométrica. Os principais fatores para as diferenças entre essas colunas foram: (i) Incerteza grande na efeméride do objetos; (ii) Seleção de objetos muito fracos ($V > 24$ mag) pelo SkyBoT. É verdade que a tabela 3.3, ao contrário da tabela 4.3, considera apenas os objetos para os quais a incerteza nas efemérides é $\leq 2''$. No entanto, a tabela 4.4 sozinha, com 114 entradas, corrobora esse melhor desempenho.

Objeto	Total	Ast.	Pos.	<i>g</i>	<i>r</i>	<i>i</i>	<i>z</i>	<i>griz</i>
TNOs	270	177	3.454	54	93	75	48	34
Centauros	67	25	545	9	6	9	6	3
TOTAL	337	202	3.999	63	99	84	54	37

Tabela 4.3: Estatística geral de imagens que contêm observações de TNOs e Centauros conhecidos. Coluna (2): Número total de objetos identificados; Coluna (3): Número total de objetos com pelo menos uma posição determinada; Coluna (4): Número total de posições determinadas; Colunas (5)-(8): número de objetos com pelo menos 3 medições de magnitude em cada filtro indicado; Colunas (9): Número de objetos com pelo menos 3 medições de magnitude em cada um dos quatro filtros. Nota: havia quatro posições medidas na banda Y e nenhuma medida na banda u .

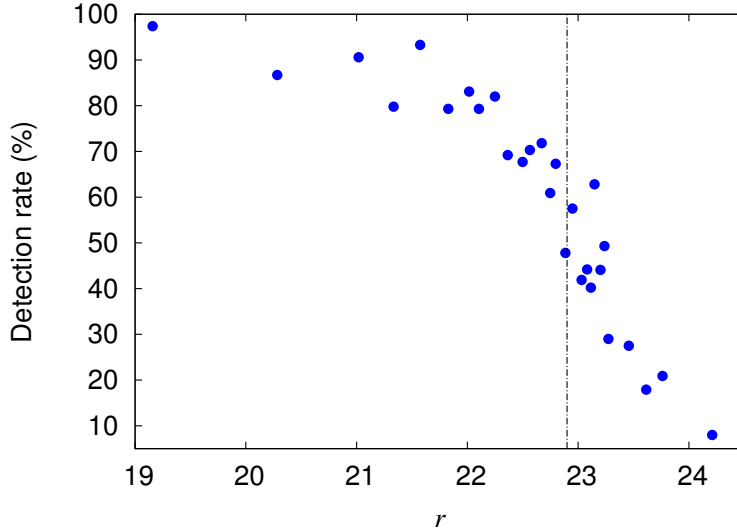


Figura 4.3: Eficiência de detecção em função da magnitude. Não são aplicadas restrições à qualidade da imagem. A linha vertical tracejada representa a magnitude limite na banda r (22,9). Somente TNOs e Centauros nas tabelas 4.4 - 4.5 com pelo menos uma magnitude medida na banda r foram considerados. Fonte: BANDA-HUARCA *et al.* (2019).

4.6 Órbitas

O refinamento de órbita é um processo relativamente simples usando o integrador NIMA, uma vez que as posições são determinadas. Através do NIMA, um arquivo de efemérides (formato *bsp*) é obtido para cada um dos 177 TNOs e cada um dos 25 Centauros (ver tabela 4.3), a partir dos quais o vetor de estado heliocêntrico equatorial J2000 de cada corpo para qualquer instante no tempo² pode ser obtido com a ajuda das ferramentas do SPICE/NAIF.

Com relação à ocultação estelar, basta estar ciente de um evento de ocultação com um ou dois anos de antecedência, para que as efemérides do objeto possam ser mais intensamente refinadas, se necessário, e as respectivas missões de observação para a ocultação possam ser organizadas. Dessa forma, essas efemérides devem ser suficientemente precisas para 1–2 anos após as observações mais recentes e atualizações constantes devem ser fornecidas. Idealmente, consideramos uma efeméride suficientemente precisa quando sua incerteza 1σ é menor que o tamanho angular do respectivo corpo ocultador e muito poucos objetos –(10199) Chariklo e Plutão entre eles– têm essa precisão nas efemérides. Observações como as da DECam têm um valor inestimável para mudar esse cenário.

Uma desvantagem dos arquivos *bsp* é que eles não carregam informações sobre

²Limitado a um intervalo de poucas décadas (por exemplo, 2015-2025) para evitar arquivos grandes.

incertezas. Nosso site dedicado³ fornece uma tabela com a qualidade da órbita, na qual incertezas são dadas em etapas de seis meses para cada alvo. Essas incertezas variam desde poucas a centenas de mili-segundos de arco (mas), dependendo principalmente da qualidade astrométrica da época atual de observações.

O resultado do refinamento da efeméride de um objeto é mostrado na figura 3.6 (objeto da tabela 4.5) e 4.4 (objeto da tabela 4.4). Elas comparam a órbita refinada com sua contraparte do JPL e mostram a incerteza da órbita refinada, juntamente com as posições recentemente observadas do respectivo corpo do Sistema Solar. Entre outros, ajuda a ter uma primeira ideia do trabalho ainda necessário para alcançar incertezas adequadas para previsões bem-sucedidas.

O padrão de ondulação visto na figura 4.4 é uma característica comum. É uma consequência das diferentes distâncias heliocêntricas dos corpos do Sistema Solar, determinadas a partir de NIMA e JPL, combinadas com o movimento da Terra ao redor do Sol. Levantamentos profundos do céu, como o DES, também desempenham um papel relevante para melhorar a determinação dessas distâncias, fornecendo observações em diferentes ângulos de fase.

As órbitas determinadas neste trabalho podem ser encontradas no endereço <http://lesia.obspm.fr/lucky-star/des/nima>. Para cada objeto, um arquivo de texto lista as posições determinadas aqui, bem como o respectivo histórico observacional através do AstDys⁴ (MPC, se o objeto não for encontrado no AstDys), que foram usados para determinar a órbita. A incerteza da órbita 1σ ($\sigma_\alpha \cos \delta$ e σ_δ) é fornecida para um período de dois anos em passos de seis meses a partir da última observação. As próprias órbitas estão disponíveis no formato *bsp*. Detalhes sobre o conteúdo das páginas são fornecidos em um arquivo README.

³<https://lesia.obspm.fr/lucky-star/des/>

⁴<https://newton.spacedys.com/astdys/>

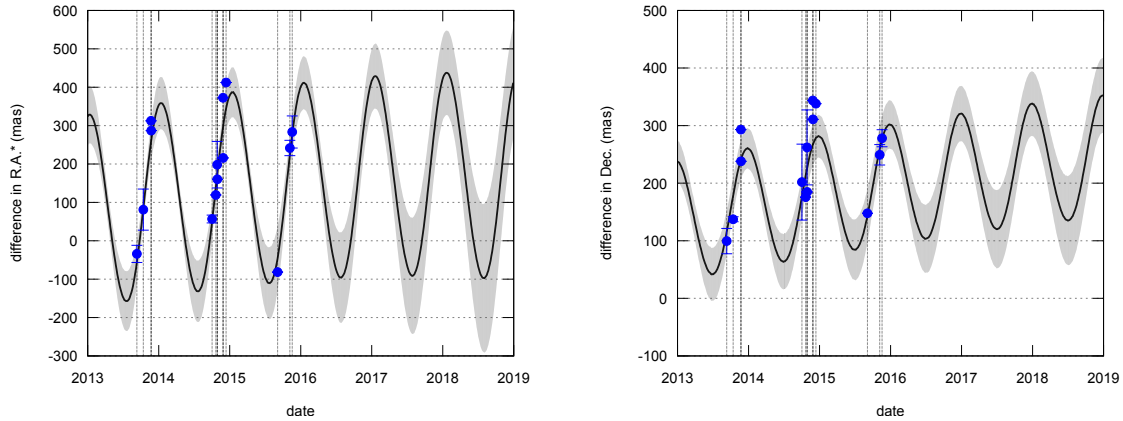


Figura 4.4: Exemplo de refinamento de órbita para o TNO (137295) 1999 RB₂₁₆. A efeméride JPL#18 é usada para determinar as diferenças NIMA menos JPL. Este objeto pertence ao grupo principal do TNO (tabela 4.4). Os pontos azuis representam as posições determinadas a partir das observações do DES. Fonte: BANDA-HUARCA *et al.* (2019).

4.7 O plano excentricidade - semieixo maior

Uma característica importante de levantamentos como o DES é a possibilidade de fornecer uma melhor visão sobre teorias dinâmicas, à medida que o número de objetos, nos quais tais teorias podem ser empregáveis, aumenta através de novas descobertas. Isso é ilustrado com a ajuda da figura 4.5.

Considerando explicitamente os elementos orbitais, é interessante notar que o MPC lista, *até o momento*, 48 objetos com $q > 40$ au e $a > 50$ au. Eles constituem uma população notável de objetos destacados, para os quais mecanismos capazes de aumentar seu periélio são um assunto de interesse. Três deles – 2013 VD₂₄, 2014 QR₄₄₁ e 2005 TB₁₉₀ – foram observados pelo DES, os dois primeiros sendo descobertos pelo levantamento. Todos eles são mostrados na figura 4.5. A diferença de símbolos para uma mesma classe de objeto (TNO ou Centauro) é para destacar os que foram descobertos pela colaboração DES. TNOs são representados por diamantes laranjas (descobertos pelo DES) e círculos vermelhos. Centauros são representados por pentágonos magentas (descobertos pelo DES) e triângulos azuis. Em preto estão objetos que não foram tratados neste trabalho.

GOMES (2011) mostrou que existe um caminho dinâmico entre uma partícula dispersada, induzida pela migração dos planetas gigantes, e a órbita estável semelhante à de 2004 XR₁₉₀ (quadrado preto na figura 4.5, objeto não observado pelo DES). Esse caminho resulta de uma combinação da migração de Netuno e a ressonância de movimento médio (MMR) mais a ressonância de Kozai. Uma das características desse caminho dinâmico é que as novas órbitas estáveis escapam da MMR de Netuno. A descoberta de mais objetos através de levantamentos profundos

do céu com $q > 40$ au e $a > 50$ au pode ajudar a confirmar esse caminho dinâmico.

2013 VD₂₄ (próximo à ressonância 5:2) e 2014 QR₄₄₁ (próximo à ressonância 7:2) estão potencialmente entre esses objetos. Integrações numéricas das equações de movimento são necessárias para verificar se eles não estão presos nas ressonâncias indicadas na figura 4.5.

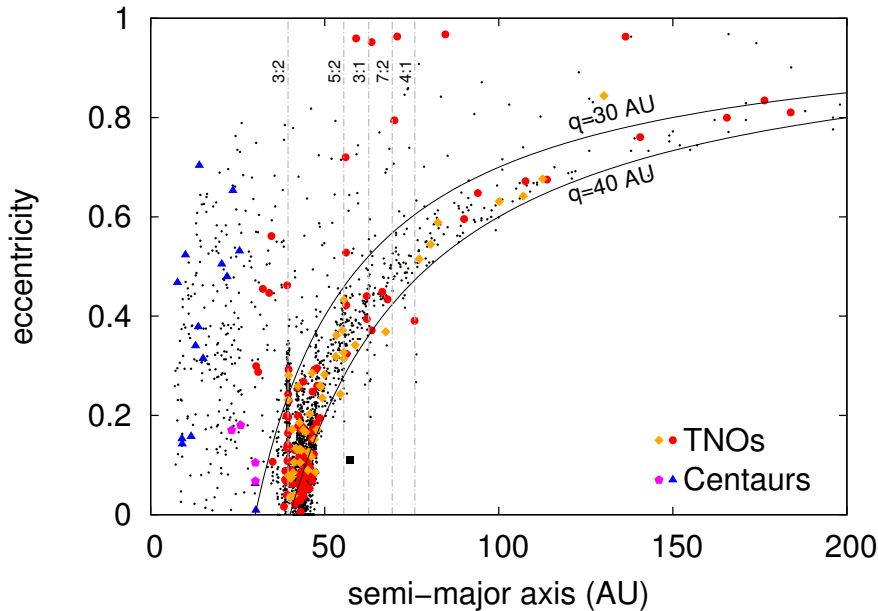


Figura 4.5: Distribuição dos TNOs e Centauros cujas órbitas foram refinadas (círculos vermelhos, diamantes laranjas, triângulos azuis e pentágonos magentas), juntamente com outros retirados do MPC (pequenos pontos pretos), no plano $a \times e$. Algumas ressonâncias de movimento médio (MMR) com Netuno também são indicadas. Objetos descobertos pelo DES são dados pelos diamantes laranjas (TNOs) e pentágonos magentas (Centauros). O quadrado preto mostra o objeto de disco dispersado 2004 XR₁₉₀, não observado pelo DES. Fonte: BANDA-HUARCA *et al.* (2019).

4.8 Mapas de ocultação

Um site dedicado também fornece acesso a mapas de previsão de ocultação para os TNOs e Centauros neste trabalho.

Esses mapas podem ser encontrados em <http://lesia.obspm.fr/lucky-star/des/predictions> junto com um link para campanhas específicas em andamento, onde são feitos intensos esforços astrométricos para a melhoria da órbita. Essas campanhas específicas são aquelas para as quais alertas mundiais são enviados. As informações básicas fornecidas pelos mapas são ilustradas pela figura 4.6.

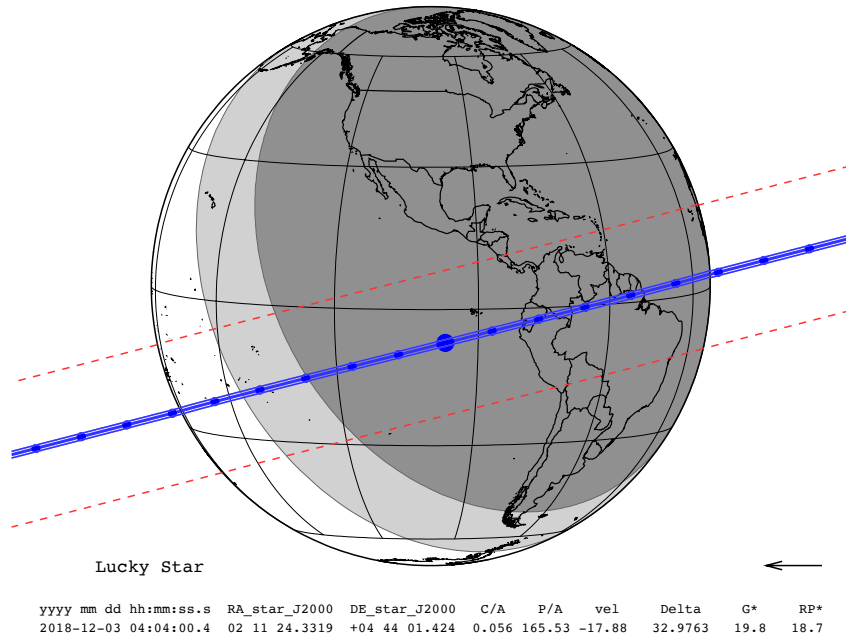


Figura 4.6: Exemplo de resultado de previsão para o TNO (137295) 1999 RB₂₁₆. Mapa de ocultação mostrando a data e hora (UTC) da máxima aproximação (maior ponto azul) entre o caminho da sombra e o geocentro; coordenada equatorial da estrela candidata a ser ocultada; a máxima aproximação (distância angular vista do corpo ocultador, em segundos de arco, entre o geocentro e o maior ponto azul); o ângulo de posição (ângulo medido, em graus, do polo norte ao segmento que liga o geocentro e o maior ponto azul, contado no sentido horário); uma estimativa da velocidade da sombra na Terra (km s^{-1}); a distância geocêntrica do corpo ocultador (au); a magnitude G *Gaia* DR2 da estrela ocultada normalizada a uma velocidade de referência da sombra de 20 km s^{-1} ; e a magnitude da estrela ocultada do fotômetro vermelho *Gaia* DR2 também normalizada com a mesma velocidade de referência da sombra. As áreas escuras e brancas indicam a noite e o dia, respectivamente. A zona cinza mostra os limites da penumbra (ver também ASSAFIN *et al.*, 2010, para uma descrição detalhada). A distância entre as linhas azuis indica o diâmetro do corpo ocultador. A incerteza de previsão é dada pelas linhas tracejadas vermelhas. A seta no canto inferior direito do mapa indica o sentido do movimento da sombra. Fonte: BANDA-HUARCA *et al.* (2019).

Os mapas de previsão, gráficos com incertezas nas efemérides, bem como as respectivas efemérides (arquivos bsp) estão disponíveis e são atualizados constantemente nos sites mencionados anteriormente no texto.

Objeto	V		$\alpha-3\sigma$	$\delta-3\sigma$	σ_{α^*}	σ_{δ}	Exp. (s)	P	D	I	Filtros	
			(mas)									min.
TNO												
1999 OZ3	23,1	0,1	2015	928	69	68	200	200	6	6	6	6r
2001 QP297	23,2	0,3	2605	1889	152	152	90	90	4	4	15	2r1i
2001 QQ297	23,19	0,06	2761	2168	285	134	90	90	6	6	20	2r
2001 QQ322	22,8	0,2	3154	1736	180	165	90	90	13	13	18	4r4i2z
2001 QS322	23,1	0,1	1774	1399	91	103	90	90	12	13	21	6r2i2z
2003 QQ91	23,4	0,1	1802	1662	83	174	90	90	6	6	16	1r1i

2003 QT91	23,5	0,1	3074	2141	60	89	90	90	4	4	15	1r1i
2003 QV90	22,9	0,1	4122	2598	196	124	90	90	3	3	17	1i
2003 QY111	23,3	0,4	3386	2144	191	219	90	90	5	5	17	2r
2003 QZ111	23,2	0,1	4725	2510	172	63	90	90	11	11	19	3r3i
2003 SQ317	23,0	0,1	4030	1745	98	94	90	90	10	14	19	3g4r1i1z
2003 SR317	23,2	0,1	438	311	174	115	90	90	4	4	15	1r1i
2003 UJ292	22,6	0,4	474	294	135	90	90	90	5	5	9	2i2z
2004 SC60	22,886	0,008	177	151	39	53	90	90	7	7	7	2g3r1i1z
2006 QF181	23,31	0,09	258	196	73	118	90	90	4	4	22	2r1i
2006 QQ180	23,3	0,1	1373	973	116	98	90	90	15	15	19	1g4r2i5z
2006 UO321	23,5	0,1	333	279	274	204	90	90	10	10	22	1g2r2i
2007 TD418	24,27	0,06	2190	738	154	123	90	200	26	29	133	4g6r4i2z
2007 TZ417	23,7	0,2	1356	1598	56	276	90	90	14	14	31	4g5r1i
2010 RD188	22,17	0,02	1718	1630	429	209	90	90	13	13	13	3g4r3i3z
2010 RF188	23,4	0,1	437	285	262	58	90	90	10	10	12	1g3r4i2z
2010 RF64	21,5	0,1	2213	1188	175	94	90	90	11	11	16	3g3r3i1z
2010 RO64	22,12	0,05	141	128	37	43	90	90	4	4	10	2g1r1i
2010 TJ	22,00	0,04	1854	1785	102	95	90	90	13	14	15	2g3r2i4z
2010 TY53	20,90	0,07	138	176	37	13	90	90	19	20	20	6g7r1i5z
2012 TC324	22,81	0,06	122	103	97	119	90	90	24	24	26	5g3r5i6z
2012 TD324	23,1	0,1	708	444	260	181	90	90	9	9	14	4g1r1i2z
2012 YO9	23,6	0,2	1711	1759	169	174	90	200	22	25	174	5r2i
2013 QP95	23,4	0,1	144	261	93	67	90	400	203	218	321	20g21r40i84z
2013 RB98	23,50	0,10	870	1004	190	117	90	200	51	53	92	4g11r12i13z
2013 RD98	24,13	0,06	314	399	163	137	90	400	165	188	655	4g25r32i19z
2013 RR98	23,85	0,02	3450	3244	98	129	90	90	14	16	30	2g2r4i5z
2013 SE99	24,0	0,1	982	1195	226	232	150	400	30	46	479	3i
2013 SZ99	23,6	0,2	458	357	273	349	90	90	6	6	19	1r1i
2013 TH159	24,2	0,2	5163	3873	171	158	200	400	41	60	670	1g7r1i
2013 TM159	23,3	0,2	727	486	129	122	90	90	17	17	24	2g3r4i3z
2013 UK15	23,2	0,1	4669	2236	248	58	90	90	3	3	6	1r1i
2013 UO15	22,9	0,1	320	254	56	96	90	90	4	4	10	1r1i
2013 UQ15	23,440	0,004	473	387	120	86	90	90	5	5	11	2g3r
2013 UR15	23,70	0,20	492	336	168	77	90	90	6	6	16	1g1r2i
2014 GE54	22,81	0,07	151	128	41	43	150	150	20	21	35	6g6r4i3z
2014 LO28	21,69	0,08	213	107	30	37	90	90	13	13	14	5g3r3i1z
2014 OD394	22,93	0,08	3146	663	56	40	90	90	6	6	14	1g2r2i1z
2014 OQ394	22,29	0,09	152	114	55	79	90	90	7	7	8	3r2i1z
2014 OR394	22,7	0,1	241	165	100	185	90	90	4	4	5	1r1i1z
2014 QA442	21,113	0,003	272	290	114	52	90	90	10	10	26	2g4r2i2z
2014 QC442	23,3	0,1	2772	683	363	58	90	90	4	5	9	1g1r1i1z
2014 QE442	23,73	0,05	4058	2250	90	104	90	200	10	17	37	3g1r4i
2014 QF442	23,8	0,3	5780	5998	149	151	90	90	13	14	25	3g4r2i
2014 QG442	23,03	0,05	3160	3239	140	272	90	90	14	14	22	4g4r6i
2014 QL441	22,8	0,2	2024	683	136	130	90	200	73	102	111	11g14r16i29z
2014 QM441	23,5	0,2	1225	470	152	110	90	200	70	86	153	6g15r21i21z
2014 QR441	23,7	0,1	1625	2738	130	87	90	200	83	93	177	11g22r19i17z
2014 QU441	26,0	0,1	5857	3317	117	104	90	200	27	29	106	1g8r5i1z
2014 SK349	22,7	0,1	248	190	33	54	90	90	21	22	22	6g5r6i4z
2014 SQ350	24,00	0,08	3726	2697	112	126	90	400	44	53	208	5g9r12i2z
2014 SZ348	24,44	0,08	911	1313	131	115	90	400	197	239	515	7g36r52i45z
2014 TT85	23,6	0,2	620	845	168	149	90	200	31	39	260	6r6i
2014 UF224	24,1	0,1	1050	1558	158	163	90	400	84	105	499	3g15r14i7z
2014 UZ224	23,75	0,02	2322	3439	89	75	90	90	13	13	19	2g4r5i1z
2014 XY40	23,01	0,05	2780	2735	138	87	90	90	13	13	15	3g4r3i3z
2015 PD312	23,6	0,1	5337	2765	172	125	90	200	16	21	55	1g4r4i
2015 PF312	22,82	0,07	1832	726	75	68	90	200	37	39	57	8g10r8i7z
2015 RR245	22,624	0,001	118	90	19	54	90	90	5	5	6	2g2r1i
2015 RT245	22,9	0,1	1582	1000	113	70	90	90	9	9	16	3r4i2z
2015 RU245	23,9	0,2	4749	799	88	111	90	90	9	13	20	1g2r2i
2015 RW245	23,11	0,09	5624	5717	655	445	90	90	6	6	16	1r1i1z
2015 TS350	23,06	0,09	866	2444	51	79	90	90	7	8	11	1g1r4z
2015 UK84	23,22	0,08	5265	5214	40	98	90	90	14	14	19	2g3r4i5z
2002 PA149	23,2	0,1	2322	1471	177	139	90	90	11	11	16	1g2r4i2z
2004 TY364	21,01	0,09	182	209	71	28	90	90	19	19	19	4g6r4i4z
2005 PQ21	23,5	0,1	1828	1179	89	50	90	90	8	8	18	1g2r2i
Eris	19,05	0,02	120	109	8	8	90	90	21	22	22	6g3r5i7z
1999 RB216	23,1	0,1	777	382	143	82	90	90	25	25	26	6g6r6i6z
2001 QG298	22,5	0,2	127	101	44	46	90	90	14	14	14	4g4r2i4z
2003 UY117	20,97	0,08	128	99	20	82	90	90	3	3	4	1i2z
2004 UX10	21,00	0,02	75	76	48	20	90	90	6	6	6	1g3r1i1z
2005 RN43	20,36	0,08	104	77	8	10	90	90	11	11	11	3g2r2i4z
2005 SA278	22,6	0,1	153	138	43	25	90	90	19	19	22	7g4r5i2z
2005 TB190	21,65	0,09	108	73	79	30	90	90	19	19	19	6g4r4i4z
2004 PB112	23,9	0,2	1376	1124	122	101	90	90	8	8	10	1g2r3i1z
2005 QU182	21,26	0,03	140	128	88	50	90	90	9	9	10	1g1r3i4z
2003 QW90	22,25	0,03	99	76	31	50	90	90	16	17	19	4g3r5i4z
2007 RW10	21,67	0,07	89	91	47	20	90	90	16	17	17	4g3r5i4z
1997 RT5	23,3	0,2	2466	1746	116	58	90	90	7	7	16	3r4i
1999 OE4	23,16	0,05	594	498	60	31	200	200	6	6	6	6r

1999 RN215	22,9	0,3	1936	1607	127	247	90	90	6	6	17	3r2i
2003 SP317	23,49	0,04	2827	1930	101	34	90	90	6	6	21	2r1z
2013 TV158	22,8	0,1	101	121	52	46	90	400	438	467	504	44g72r101i214z
1999 OX3	20,972	0,005	90	66	14	20	90	90	9	9	9	2g3r2i2z
2012 WD36	24,0	0,1	376	416	156	129	90	200	46	51	195	4g12r6i2z
1999 OM4	23,2	0,1	584	574	32	76	200	200	6	6	6	6r
2001 QF298	22,0	0,1	123	97	34	49	90	90	16	16	16	4g4r4i4z
2005 PU21	23,24	0,07	137	97	122	73	90	90	19	20	21	4g4r4i5z
Lempo	20,59	0,04	76	66	32	18	90	90	11	12	12	2g2r4i3z
2013 RM98	22,4	0,2	121	92	79	67	90	150	18	18	21	7g3r5i3z
2014 QN441	22,8	0,2	113	148	60	40	90	200	90	94	109	14g19r20i36z
2014 QB442	23,3	0,1	148	125	64	42	90	90	19	21	26	3g6r5i5z
2014 QS441	22,2	0,2	586	601	70	85	90	200	26	27	49	6g6r5i9z
2012 VU113	24,0	0,2	285	404	181	108	90	200	40	47	107	3g14r7i4z
2012 VV113	23,6	0,1	448	545	163	139	90	200	32	38	196	4r8i2z
2012 VR113	23,3	0,1	359	310	97	92	90	200	74	78	114	7g16r17i21z
2012 VS113	23,5	0,1	515	426	119	68	90	400	191	200	254	24g32r52i70z
2013 TJ159	23,2	0,1	2334	1310	77	58	90	150	17	18	24	1g3r5i4z
2001 QF331	23,458	0,007	344	271	138	89	90	90	11	11	17	2g3r3i1z
2008 SO266	22,3	0,2	121	134	38	51	90	90	19	19	19	6g6r4i3z
2010 RE188	22,8	0,1	286	198	99	45	90	90	4	4	5	1g1r1i1z
2013 QO95	23,4	0,1	439	371	76	105	90	200	46	52	81	7g10r12i12z
2013 SP99	23,3	0,2	416	280	178	132	90	90	8	8	17	2r2i
2013 SQ99	23,2	0,1	322	239	129	57	90	90	10	10	19	1g2r4i
2013 SA100	23,4	0,3	352	258	65	83	90	90	15	15	20	2g4r6i2z
2013 UL15	23,8	0,2	392	253	78	69	90	90	4	4	11	1g3r
2015 SO20	22,5	0,1	127	105	49	27	90	90	17	19	20	4g4r5i3z
2000 QB243	23,8	0,1	2956	2056	68	102	90	90	6	6	7	1g2r2i1z

Centauro

2004 DA62	23,30	0,03	1471	4914	90	36	90	90	4	4	15	2r2i
2007 UM126	22,5	0,1	4629	815	83	54	90	90	18	19	22	7g4r5i1z
2011 SO277	23,3	0,1	420	368	45	64	90	90	16	17	19	4g1r6i4z
2012 PD26	22,72	0,09	1591	783	311	172	90	90	11	13	15	5g2r1i2z
2013 RG98	23,3	0,1	264	780	85	78	90	400	207	224	271	23g31r41i97z1Y
2014 OX393	22,70	0,06	779	452	86	62	90	90	4	4	5	1g1r1i1z
2014 QO441	23,63	0,06	254	350	87	97	90	400	119	145	301	13g19r31i34z
2014 QP441	23,8	0,3	866	593	111	95	90	400	74	123	436	2g17r17i11z
2014 SB349	23,80	0,04	2793	1964	110	39	90	200	12	18	62	2g3r4i2z
2014 SS303	22,07	0,05	5559	2124	71	52	90	90	4	5	7	1r1i2z
2015 RV245	23,61	0,07	2878	3169	260	23	90	90	4	4	7	2g1r1i
2015 VV1	21,77	0,03	85	87	27	36	90	90	4	4	4	1g2r1i
Chiron	18,5	0,2	53	50	18	13	90	90	7	7	7	3g1r1i2z
2014 SR303	22,0	0,2	95	79	27	30	90	90	18	19	22	6g6r3i3z

Tabela 4.4: Estatísticas da redução dos TNOs e Centauros: Fonte principal. Coluna (1): nome do objeto; Coluna (2) e (3): magnitude média e sua incerteza obtida a partir do filtro mais azul; Colunas (4) e (5): incerteza na posição das efemérides em R.A. e decl., respectivamente; Colunas (6) e (7): desvio-padrão, obtidos a partir das posições observadas, menos as das respectivas efemérides do JPL, em R.A. e decl. respectivamente; Colunas (8) e (9): tempos de exposição mínimos e máximos das imagens a partir da qual foi obtida uma posição; Colunas (10), (11) e (12): número de posições obtidas, número de detecções entregues pelo código astrométrico (todas as posições, sem eliminações) e número total de imagens com tempos de exposição maiores ou iguais a 50 s, respectivamente; Colunas (13): número de magnitudes por filtro encontrado em um determinado objeto no banco de dados DES. Os objetos descobertos pela colaboração DES estão marcados em azul.

Objeto	V	σ_{α^*}				Exp. (s)	P	D	I	Filtros		
		$\alpha-3\sigma$	$\delta-3\sigma$	(mas)							min.	max.
TNO												
2000 OL67	23,2	0,2	15828	7732	42	61	90	90	6	6	16	2r2i1z
2013 RP98	23,58	0,08	20450	5490	57	62	90	90	7	7	15	2g1r3i1z
2013 RQ98	23,0	0,2	27691	13113	80	115	90	90	7	11	29	3r2i
2002 PD149	23,6	0,2	17727	8159	150	90	90	90	7	7	14	1g2r1i1z
2003 QX111	23,0	0,2	9090	3775	98	106	90	90	9	11	19	2r4i3z
2014 SR350	23,1	0,1	20122	7973	97	88	90	90	9	12	26	4r3i
2015 PL312	23,94	0,08	30292	15722	112	169	90	400	9	23	199	3r

2014 UY224	23,53	0,06	9915	9898	103	126	90	90	12	12	19	2g4r3ilz
2014 UC225	23,39	0,09	11304	6057	128	97	90	90	13	13	21	3g5r3i2z
2014 UN225	23,1	0,1	32391	24659	43	49	90	90	14	16	17	4g3r4i2z
2014 VW37	23,3	0,1	3657	7506	120	93	90	90	18	18	21	4g3r5i4z
2013 RF98	24,1	0,1	6582	6114	87	109	200	400	30	55	301	5r7i1z

Centauro

2013 PQ37	19,93	0,06	31300	12480	0,053	0,016	90	90	7	7	7	2r2i3z
-----------	-------	------	-------	-------	-------	-------	----	----	---	---	---	--------

Tabela 4.5: Estatísticas da redução dos TNOs e Centauros: Fonte de extensão. O mesmo da tabela 4.4.

Objeto	V	$\alpha-3\sigma$	$\delta-3\sigma$ (mas)	σ_{α^*}	σ_{δ}	Exp. (s)		P	D	I	Filtros	
						min.	max.					
TNO												
1996 RR20	22,802	0,006	7994	3676	221	177	90	90	4	4	15	2ilz
1999 RG215	23,7	0,2	2919	1919			90	90	1	1	9	1r
1999 RK215	24,23		2590	2135			90	90	1	1	15	
2000 PC30	23,8	0,2	47499	19797	174	74	200	200	4	4	6	3r
2000 PY29	23,9	0,2	9129	4247	97	97	200	200	4	4	6	1r
2000 QD226	23,65		> 10 ⁶	> 10 ⁶			90	90	1	1	21	
2001 QH298	22,88	0,09	1824	1851			90	90	1	1	16	1g
2001 QO297	23,6	0,2	22524	9941	154	148	90	90	3	3	19	1g1r1i
2002 PD155	23,53		20548	11298			90	90	1	1	22	
2002 PG150	21,61	0,07	> 10 ⁶	> 10 ⁶			90	90	1	1	13	1z
2002 PK149	22,48	0,09	> 10 ⁶	> 10 ⁶			90	90	1	1	12	1g
2003 QB91	23,1	0,1	11356	5215	493	51	90	90	4	4	22	1r1i
2005 PE23	26,93		> 10 ⁶	> 10 ⁶			90	90	1	1	21	
2005 PP21	22,88		> 10 ⁶	> 10 ⁶			90	90	1	1	11	
2005 SE278	22,19	0,07	1897	1498	47	30	90	90	2	2	3	1i1z
2006 QC181	22,00	0,05	> 10 ⁶	> 10 ⁶			90	90	1	1	15	1g
2006 QD181	22,88		> 10 ⁶	> 10 ⁶			90	90	1	1	13	
2006 QZ180	23,59		> 10 ⁶	> 10 ⁶			90	90	1	1	23	
2008 UA332	23,03	0,08	> 10 ⁶	> 10 ⁶			90	90	1	1	17	1g
2010 JH124	23,2	0,1	20165	1810	798	1,050	90	150	3	3	43	1r1i
2013 KZ18	21,65		136	104			90	90	1	1	4	1z
2013 RO98	22,74	0,08	> 10 ⁶	> 10 ⁶	44	72	90	90	16	16	18	4g4r4i4z
2013 UP15	24,06		370	260			90	90	1	1	7	
2013 VD24	24,6	0,2	107390	54984	113	172	330	400	5	9	408	1r
2013 VJ24	23,90		> 10 ⁶	> 10 ⁶			90	90	1	1	15	
2014 NB66	22,86	0,02	217	115	50	69	90	90	2	2	4	2g
2014 PR70	22,98	0,07	226	136	175	190	90	90	2	2	2	1g1z
2014 RS63	22,62	0,06	85434	52414	61	131	90	90	6	6	13	3i1z
2014 SN350	22,87	0,09	28123	37105	169	147	90	90	6	6	21	3r1i
2014 SO350	24,0	0,2	91741	33931	229	67	90	90	7	8	23	1g2r3i
2014 TB86	23,2	0,1	165206	42723	68	69	90	90	9	11	23	1g3r2i2z
2014 TE86	23,2	0,3	23334	38078	190	140	90	90	9	9	19	2g3r1i
2014 TF86	23,5	0,2	47829	27854	150	119	90	90	12	12	26	1g5r2i2z
2014 TU85	23,38	0,02	860527	132551	256	95	90	200	4	4	46	2r1i
2014 UA225	23,37	0,06	441418	196089	66	89	90	90	11	11	22	3g2r3i3z
2014 UB225	22,74	0,05	> 10 ⁶	> 10 ⁶	57	41	90	90	7	7	10	3r1i2z
2014 VT37	24,06	0,09	196302	93079	106	123	150	200	11	11	74	2g3r1i
2014 YL50	23,4	0,1	43878	78972	129	178	90	90	12	12	14	4g3r3i1z
2014 XZ40	23,53	0,02	72326	56308	52	128	90	90	5	5	18	2g2r1i
2015 PK312	25,01		> 10 ⁶	224438	330	1,328	90	330	3	3	133	
2015 QT11	24,3	0,2	465277	218826	188	179	150	400	9	11	239	1g2i
2015 RS245	24,05		46613	5685	833	929	90	200	4	4	87	
2015 RX245	24,35		1320	1461	161	446	90	90	2	2	28	
2015 SV20	22,56		> 10 ⁶	> 10 ⁶			90	90	1	1	13	
2015 TN178	21,4	0,5	175	641	267	371	90	90	2	2	2	2i
2016 QP85	23,6	0,2	> 10 ⁶	306619	660	236	90	90	3	3	13	1r
1999 RA216	22,7	0,1	2402	1746	190	216	90	90	2	2	12	1i
2004 PG115	20,63	0,01	132	77			90	90	1	1	1	1r
2004 VN112	23,42		748	816			90	90	1	1	1	
2014 OB394	21,42	0,03	136	97	37	37	90	90	2	2	2	1i1z
2016 BP81	23,2	0,1	397	276	74	137	90	90	2	2	3	1g1i
Centauro												
2007 VL305	22,7	0,1	11377	2924	266	245	90	90	3	3	7	1r
2011 OF45	21,12	0,04	565	334			90	90	1	1	1	1z
2013 RN30	22,6	0,2	7971879	5872040	516	1,049	90	90	3	3	22	2g1z
2013 SV99	24,1	0,1	2145099	1273035	192	151	90	400	16	20	55	4g2r5i
2013 TS20	21,83	0,03	36400409	14095067			90	90	1	1	6	1g
2014 SW223	21,83	0,05	762	545			90	90	1	1	1	1i
2014 TK34	21,14	0,03	310	197			90	90	1	1	1	1i

2015 VT152	23,5	0,1	1501899	1234480	112	41	90	90	6	9	16	lg2r3i
2016 VF1	21,71	0,04	53403030	272552177	644	1,161	90	90	3	3	20	1i
2011 ON45	21,04	0,07	115	74			90	90	1	1	1	1z

Tabela 4.6: Estatísticas da redução dos TNOs e Centauros: Fonte duvidosa. O mesmo da tabela 4.4.

4.9 Efeitos de fase sobre a posição

Efeitos devido à fase solar influenciam na observação de corpos do Sistema Solar. Estes efeitos não foram considerados em nossas reduções e sua influência pode ser estimada com auxílio da figura 4.7.

Nessa figura, φ é o ângulo de fase. A porção iluminada do corpo (semi-círculo AC) é dada pelo hemisfério voltado para o Sol. Assim, o ângulo Sol- \widehat{O} -C é reto. A porção visível a partir da Terra é dada pelo setor B-O-C. Assim, o ângulo Terra- \widehat{O} -D é reto. O segmento \overline{OM} é bissetor do ângulo B- \widehat{O} -C. Nossa hipótese, aqui, é que um observador na Terra verá M como o centro da imagem. Assim, a diferença angular (Δ) entre M e O representa a diferença angular entre o centro de fato do corpo e aquele que é visto devido à fase solar.

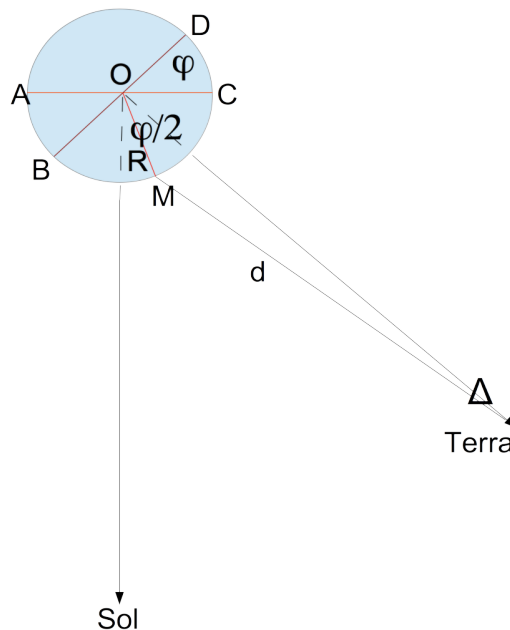


Figura 4.7: Representação geométrica do efeito de fase.

$$\frac{R}{\sin \Delta} = \frac{d}{\sin(\frac{\varphi}{2})}, \quad (4.4)$$

onde d é a distância do observador ao objeto observado, R é seu raio, Δ é a correção da posição pela fase e φ é ângulo de fase observado.

Devido à distância dos objetos e seus pequenos diâmetros, podemos considerar que $\sin \Delta \approx \Delta$. Desta forma, a equação 4.4 pode ser escrita como

$$\Delta = \theta \cdot \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right), \quad (4.5)$$

onde $\theta = R/d$ é o raio aparente do objeto.

Esse deslocamento acontece no plano formado pelo Sol, pela Terra e pelo corpo observado, e representa o deslocamento total da posição devido à fase. Ainda, nenhuma lei de reflexão foi utilizada. Portanto, o valor de suas componentes em ascensão reta e declinação são menores ou iguais a aqueles obtidos pela equação 4.5. Assim, podemos estimar o efeito da fase em dois casos separadamente: entre 15 e 30 au e além de 30 au.

Éris é o TNO de maior diâmetro, observado neste trabalho. O raio dele, como estimado por SICARDY *et al.* (2011), é 1.163 ± 6 km. Tomando, então $d = 30$ au, e $\phi = 2^\circ$, temos que $\Delta < 1$ mas.

Chariklo (10199) é o maior Centauro conhecido, o raio dele (estimado por BRAGA-RIBAS *et al.* (2014a)) é 124 ± 9 km. Tomando, então $d = 15$ au, e $\phi = 4^\circ$, temos que $\Delta < 0,5$ mas.

Em qualquer das classes (TNO/Centauro), as incertezas que obtivemos nas posições são maiores do que os valores apresentados acima.

4.10 Precisão em posição - estimando até onde podemos ir

A determinação de posições a partir de imagens CCD está sujeita a várias fontes de erros sistemáticos. Uma dessas fontes, aquela derivada do próprio catálogo de referência, não existindo mais desde a liberação da astrometria da missão espacial Gaia. No entanto, distorções procedentes do conjunto óptico do instrumento (por exemplo, ASSAFIN *et al.*, 2010; PLEWA *et al.*, 2018), da eletrônica (por exemplo, ZACHARIAS *et al.*, 2010) e de refração cromática (por exemplo, BENEDETTI-ROSSI *et al.*, 2014), continuam presentes.

Tais efeitos interferem no caminho que leva coordenadas (X, Y) sobre o CCD a coordenadas celestes ascensão reta e declinação. O conhecimento desses efeitos, assim como sua modelagem, dizem o quanto a precisão das coordenadas celestes foi degradada em relação à precisão das coordenadas sobre o CCD.

De fato, é razoável assumir que a precisão obtida na determinação das coordenadas (X, Y) - centroide do objeto - é a limitante numérica inferior para a precisão das

coordenadas celestes. Neste contexto, a determinação da incerteza nesse centroide é importante.

Como início, podemos considerar a seguinte equação (KING, 1983):

$$\eta_i = c \cdot f_i + B, \quad (4.6)$$

onde c é o total de contagens do objeto, f_i é a fração desse total contida no píxel i (com $\sum f_i = 1$) e B é o valor do fundo do céu. Dessa forma, η_i representa o total de contagens contido no píxel i .

Uma imagem CCD amostra, de forma discreta, a distribuição do fluxo luminoso da estrela sobre a superfície dela. A determinação do centroide dessa distribuição, com frequência, é obtida com o auxílio de uma função contínua. A escolha dessa função é etapa natural para soluções da equação 4.6 em sua forma diferencial:

$$\delta\eta_i = \delta c \cdot f_i + c \frac{\partial f_i}{\partial x} \delta x + c \frac{\partial f_i}{\partial y} \delta y \quad (4.7)$$

O conjunto de equações dado pela equação 4.7 pode ser representado matricialmente da seguinte maneira:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \frac{f_1}{\sigma_{\eta_1}} & c \frac{\partial f_1}{\partial x} & c \frac{\partial f_1}{\partial y} \\ \frac{f_2}{\sigma_{\eta_2}} & c \frac{\partial f_2}{\partial x} & c \frac{\partial f_2}{\partial y} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{f_N}{\sigma_{\eta_N}} & c \frac{\partial f_N}{\partial x} & c \frac{\partial f_N}{\partial y} \end{bmatrix}}_A \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} \delta c \\ \delta x \\ \delta y \end{bmatrix}}_X = \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{\eta_1}{\sigma_{\eta_1}} \\ \frac{\eta_2}{\sigma_{\eta_1}} \\ \vdots \\ \frac{\eta_N}{\sigma_{\eta_1}} \end{bmatrix}}_Y. \quad (4.8)$$

É relevante considerar a ponderação do sistema representado pelas equações 4.8, tendo em conta as diferentes contagens contidas em cada píxel que formam a imagem do objeto. Sabendo que a geração de elétrons num CCD é dada pela distribuição de Poisson, tem-se $\sigma_{\eta_i}^2 = c \cdot f_i + B$. A solução por mínimos quadrados da equação 4.8 pode então ser obtida da seguinte forma:

$$\begin{aligned} [A] \cdot X &= Y \\ [A^T A] \cdot X &= [A^T] \cdot Y \\ X &= [A^T A]^{-1} [A^T] \cdot Y \end{aligned} \quad (4.9)$$

A matriz $[A^T A]^{-1}$ é de especial interesse, devido que sua diagonal principal conterà as incertezas de δc , δx e δy .

A segunda linha da equação 4.9 contém as *equações normais*. Nelas, por simetria, apenas os termos em sua diagonal principal não são nulos (KING, 1983). Estes

termos são calculados, explicitamente, com auxílio da matrix A :

$$\begin{aligned} & \sum \frac{f_i^2}{c \cdot f_i + B} \\ c^2 \sum \frac{1}{c \cdot f_i + B} \left(\frac{\partial f_i}{\partial x} \right)^2 \\ c^2 \sum \frac{1}{c \cdot f_i + B} \left(\frac{\partial f_i}{\partial y} \right)^2 \end{aligned} \quad (4.10)$$

lembrando que $\sigma_{\eta_i}^2 = c \cdot f_i + B$.

A partir daqui, os primeiros resultados são obtidos a partir de hipóteses importantes. Uma delas, refere-se à escolha da *Point Spread Function* (PSF). De todo modo, vamos a essas hipóteses:

1. A Razão Sinal-Ruído (SNR) do alvo é dominada pelo sinal.
2. O objeto está bem amostrado sobre os píxels, quer dizer que, os píxels podem ser considerados pequenos em relação à área sobre a qual o objeto se espalha sobre o CCD. Desta forma, a distribuição do fluxo do objeto sobre o CCD pode ser convenientemente aproximada por uma função contínua.

Através do primeiro item, podemos escrever a segunda expressão dada pela equação 4.10 como:

$$c \sum \frac{1}{f_i} \left(\frac{\partial f_i}{\partial x} \right)^2 \quad (4.11)$$

O segundo item, por sua vez, permite escrever a equação 4.11 da seguinte forma:

$$c \iint \frac{1}{\Phi} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)^2 dx dy \quad (4.12)$$

A questão agora é, como mencionado anteriormente, escolher a função Φ . Essa função será uma gaussiana circular e que leva em consideração que $\sum f_i = 1$:

$$\Phi = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp \left(-\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{2\sigma^2} \right) \quad (4.13)$$

Definida assim a função Φ , temos:

$$\frac{1}{\Phi} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)^2 = \frac{(x-x_0)^2}{2\pi\sigma^6} \exp \left(-\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{2\sigma^2} \right) \quad (4.14)$$

Dessa forma, tem-se⁵ (MIGHELL, 2005)

$$c \iint \frac{1}{\Phi} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)^2 dx dy = \frac{c}{\sigma^2} \quad (4.15)$$

⁵Ou através da ferramenta <https://www.integral-calculator.com/>

Lembrando que a incerteza procurada é dada pela raiz quadrada do inverso da segunda expressão na equação 4.10 temos, para a determinação da incerteza do centroide em x ,

$$\sigma_x = \frac{\sigma_{PSF}}{\sqrt{c}} \quad (4.16)$$

onde σ_{PSF} refere-se ao parâmetro da gaussiana dada pela equação 4.13. Por simetria, a mesma expressão vale para a incerteza do centroide em y .

É interessante ver também a primeira expressão na equação 4.10. Ela fornece a incerteza na medida do fluxo e, seguindo as mesmas hipóteses que nos permitiram escrever a equação 4.12, é dada por

$$\sum \frac{f_i^2}{c \cdot f_i + B} = \sum \frac{f_i^2}{c \cdot f_i} = \frac{1}{c} \iint \Phi dx dy = \frac{1}{c} \quad (4.17)$$

Ou seja, a incerteza na medida do fluxo é \sqrt{c} . Se lembrarmos da expressão da SNR (HOWELL, 2000)

$$SNR = \frac{c}{\sqrt{c + n_{pix}(B_i + N_D + N_R^2)}} \quad (4.18)$$

onde c^6 é o número de elétrons procedentes da fonte, N_D é o número total de elétrons por píxel procedentes da corrente de escuro e N_R^2 é o número de elétrons por pixel procedentes do ruído de leitura. Tomando, a partir das hipóteses acima, que o sinal da fonte é dominante sobre outros sinais, então a equação 4.18 é resumido a

$$SNR = \sqrt{c} \quad (4.19)$$

Então,

$$\sigma_x = \frac{\sigma_{PSF}}{SNR} \quad (4.20)$$

Lembrando que a FWHM (*Full Width at Half Maximum*, comumente utilizada como medida direta do *seeing*) vale $2\sqrt{2 \ln 2} \sigma_{PSF}$, podemos reescrever a equação 4.20 como

$$\sigma_x = \frac{FWHM}{2\sqrt{2 \ln 2} SNR} \quad (4.21)$$

Assim, um objeto bem amostrado e cuja SNR é dominada pelo sinal (do objeto), a precisão na determinação do centroide quando SNR= 100 e *seeing*= 1'' é

$$\sigma_{x_{brilhante}} = \sigma_{y_{brilhante}} = 0,004'' \quad (4.22)$$

Essa incerteza é um limitante numérico inferior para a incerteza final em posição, ou seja, incertezas em ascensão reta e declinação serão, no melhor dos casos, tão

⁶Note: o número de elétrons relaciona-se com as contagens, efetivamente lidas dos CCDs, através do ganho (G).

precisas quanto forem as dos respectivos centroides.

A situação oposta àquela que acabamos de analisar é quando o objeto continua bem amostrado mas o sinal, agora, é dominado pelo céu. Dessa forma, a segunda expressão dada pela equação 4.10 pode ser escrita como

$$c^2 \sum \frac{1}{B} \left(\frac{\partial f_i}{\partial x} \right)^2 \quad (4.23)$$

e, como o objeto continua bem amostrado, vale novamente que

$$\frac{c^2}{B} \iint \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)^2 dx dy. \quad (4.24)$$

Lembrando que tomamos Φ como uma gaussiana circular, temos que a equação 4.24 vale

$$\frac{c^2}{B} \iint \frac{(x - x_0)^2 \exp\left(-\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{\sigma^2}\right)}{4\pi^2 \sigma^8} = \frac{c^2}{8B\pi\sigma^4}. \quad (4.25)$$

Ou seja,

$$\sigma_x^2 = \frac{8B\pi\sigma^4}{c^2} \implies \sigma_x = 2\sqrt{2\pi}\sigma_{PSF}^2 \frac{\sqrt{B}}{c} \quad (4.26)$$

Tendo em conta a equação 4.18 e o sinal do céu como dominante, a equação 4.26 pode ser reescrita como

$$\sigma_{x_{fraco}} = \sigma_{y_{fraco}} = \frac{2\sqrt{2\pi}\sigma_{PSF}^2}{SNR}. \quad (4.27)$$

Fora dos casos extremos apresentados, uma avaliação da incerteza no centroide pode ser dada por

$$\sigma_{x,y} = \sqrt{\frac{\sigma_{x,y_{brilhante}}^2 + \sigma_{x,y_{fraco}}^2}{2}}. \quad (4.28)$$

A figura 4.8 mostra uma imagem de Éris, o TNO mais brilhante observado ($g \sim 19$). A identificação da imagem na qual ele foi medido é D00507393_i.c35-r2379p01_immasked.fits. Com auxílio do IRAF, medimos o fluxo do objeto, obtendo 170.313 ADUs ou 42.578 elétrons levando em conta o ganho da DECam ($4e^-/ADU$). O *seeing* medido foi de $0,96''$. Com isto, a equação 4.21 nos dá uma incerteza no centroide de 5 mas . A tabela 4.4 mostra 8 mas para a incerteza em RA e DEC.

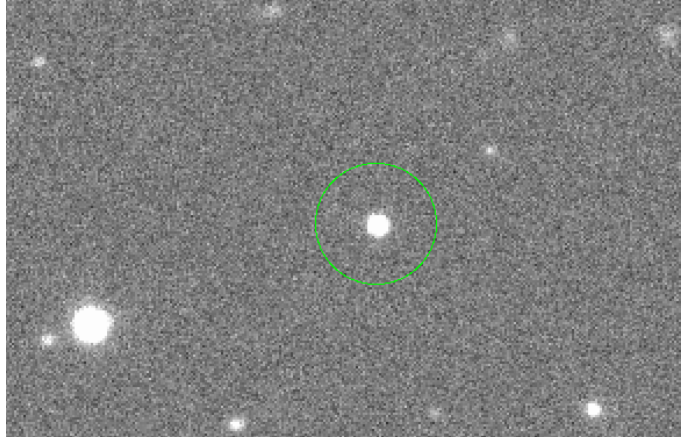


Figura 4.8: Extrato de imagem com o TNO Éris destacado pelo círculo verde.

A figura 4.9 mostra uma imagem de 2004 TY₃₆₄, um TNO com $g \sim 21$. A identificação da imagem na qual ele foi medido é D00370726_i.c29_r2182p01_immasked.fits. Com auxílio do IRAF, medimos o fluxo do objeto, obtendo 54.608 ADUs ou 13.652 elétrons. O *seeing* medido foi de 1,06". Como o fundo de céu foi subtraído das imagens que utilizamos, aproximamos sua contribuição ao ruído por $\pi r^2 \sigma_{bkg}$ (NEWBERRY, 1991), onde r é o raio, em píxels, utilizado no cálculo do fluxo do objeto e σ_{bkg} é o desvio padrão das contagens do fundo do céu. Com auxílio do IRAF, obtivemos $r = 10, 15$ e $\sigma_{bkg} = 73$ ADUs (ou 18 elétrons). A SNR resultante é 40. Com isto, a equação 4.27 nos dá uma incerteza no centroide de 25 *mas*. A equação 4.21 nos dá uma incerteza de 11 *mas*. Finalmente, a equação 4.28 dá uma incerteza de 19 *mas*. A tabela 4.4 mostra 71 *mas* e 28 *mas* para as incertezas em RA e DEC, respectivamente.

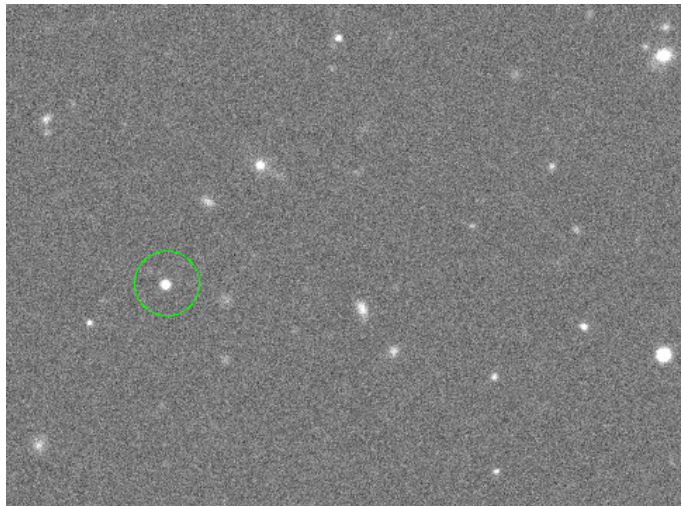


Figura 4.9: Extrato de imagem com o TNO 2004 TY₃₆₄ destacado pelo círculo verde.

A determinação das incertezas em RA e DEC na tabela 4.4, como mencionado, é dada pelo desvio padrão das diferenças entre as posições observadas e de efemérides

para cada objeto. Como efemérides perdem precisão com o passar do tempo, objetos observados ao longo de alguns anos terão suas incertezas, como determinadas pela tabela, aumentadas de forma artificial visto que essas incertezas são determinadas através da comparação entre posições observadas e posições das efemérides. O primeiro exemplo mostrado - Éris - indica que nossos procedimentos astrométricos não se afastaram muito da melhor precisão que estimamos poder obter. O segundo exemplo - 2004 TY₃₆₄ - já mostra uma grande diferença entre a melhor precisão estimada para posição e aquela obtida. Vale lembrar que a tabela 4.4 mostra incertezas nas posições de efemérides maiores para 2004 TY₃₆₄ em comparação a Éris. Ainda, o ajuste de órbita realizado com o NIMA mostra que se esta última efeméride tivesse sido utilizada no lugar da do JPL, os desvios-padrão teriam sido menores (figura 4.10).

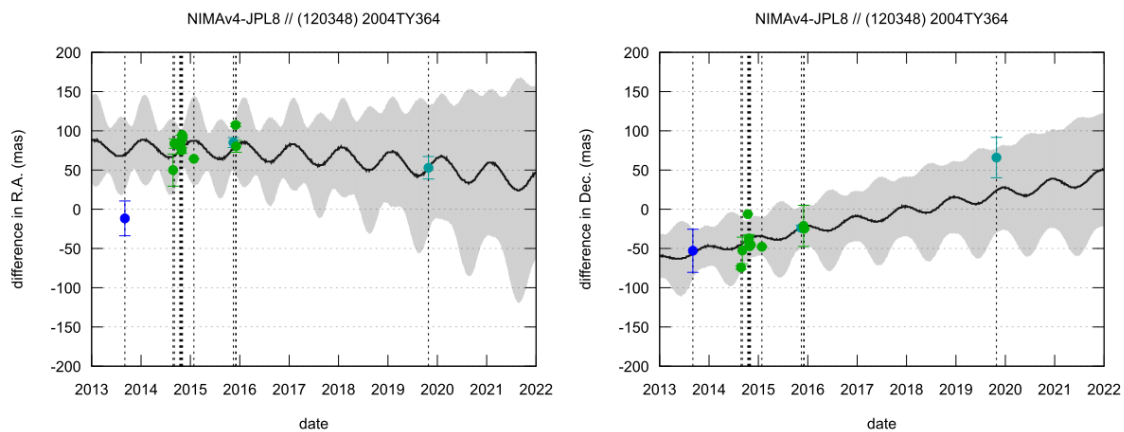


Figura 4.10: Diferença em ascensão reta (esquerda) e declinação (direita) entre as efemérides NIMA e JPL (linha preta) para o TNO 2004 TY₃₆₄. Pontos verdes representam posições oriundas das observações do DES. A região cinza representa a incerteza (1σ) da efeméride NIMA. A incerteza na órbita, para JAN/2020, é de 77 mas em RA e 54 mas em DEC. Esta é a versão mais recente dessa efeméride, como dada por <https://lesia.obspm.fr/lucky-star/obj.php?p=499>.

Poderíamos dizer que esses desvios padrão são menores porque o ajuste da órbita de 2004 TY₃₆₄ foi feito utilizando-se os dados do DES e que isto não necessariamente representa uma órbita mais precisa. Assim, mostramos também a órbita mais recente que temos para Éris (figura 4.11). Vemos nessa figura que as posições de Éris determinadas com o DES praticamente coincidem com a órbita determinada. O destaque aqui é que ocultações por Éris (2010 e 2013, veja <http://occultations.ct.utfpr.edu.br/results/>) foram observadas e as posições de Éris oriundas dessas ocultações foram utilizadas nessa efeméride, o que a torna bastante precisa.

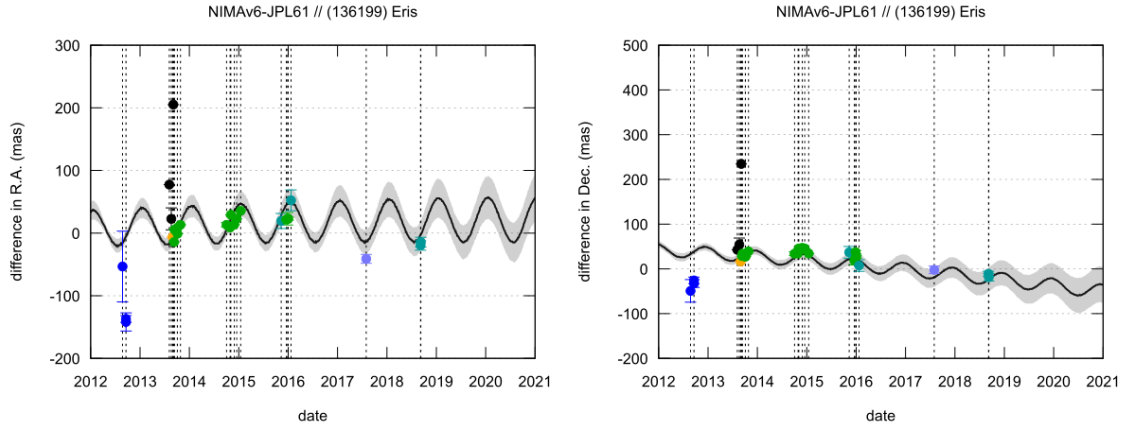


Figura 4.11: Diferença em ascensão reta (esquerda) e declinação (direita) entre as efemérides NIMA e JPL (linha preta) para Éris. Pontos verdes representam posições oriundas das observações do DES. A região cinza representa a incerteza (1σ) da efeméride NIMA. A incerteza na órbita, para JAN/2020, é de 34 mas em RA e em DEC. Esta é a versão mais recente dessa efeméride, como dada por <https://lesia.obspm.fr/lucky-star/obj.php?p=359>.

Mais de 90% das imagens tiveram tempos de integração de 90 s. Tipicamente, o movimento diferencial dos objetos estudados será inferior ao tamanho do pixel. Para o restante, os tempos de integração variam entre 150 s e 400 s. Não fizemos nenhum estudo aprofundado sobre o efeito de alongamento da imagem e sua influência na determinação da magnitude limite e na precisão astrométrica. No entanto, os resultados mostram (por exemplo, figura 4.2) que os tempos de exposição mais longos não afetaram de forma negativa a qualidade da astrometria. Igualmente, não examinamos explicitamente este efeito sobre as magnitudes. Novamente, não obtivemos resultados fotométricos que deponham contra a qualidade da imagem por conta dos tempos de integração mais longos (i.e. ≥ 150 s). Examinamos uma imagem do objeto 2013 TV₁₅₈ cuja integração foi de 400 s e sua largura à meia altura não o diferencia das estrelas de campo. De todo modo, como mencionado anteriormente, não fizemos nenhuma verificação dedicada sobre o eventual alongamento de imagens.

Capítulo 5

Aplicação Web

Neste capítulo detalhamos os procedimentos para implementar os diversos softwares existentes e códigos desenvolvidos que foram descritos no capítulo 3 numa plataforma de alto desempenho, fornecida pelo LIneA, para gerenciar todos os processos, desde ingestão de dados, execução de processos e visualização dos resultados.

Grande esforço em colaboração com pessoal de informática foi empregado nesta fase, cujo objetivo é transportar nossos procedimentos para fazer astrometria, refinamento de órbitas e predição de ocultações estelares, num contexto de grandes massas de dados.

5.1 Conceitos preliminares

Nesta seção definimos alguns dos principais conceitos usados neste trabalho, os quais serão de ajuda para um melhor entendimento em seções posteriores.

Fluxograma: Descrição gráfica de um determinado processo ou algoritmo. É usado principalmente para documentar e comunicar processos complexos usando diagramas simples e fáceis de entender. Processos, banco de dados, input/output, entre outros, são representados por figuras geométricas (retângulos, elipses, etc.) os quais são interconectados com setas, determinando assim uma sequência ordenada de instruções, condições e dependências.

Componente: Parte de um sistema maior, pode ser reutilizado, pode estar contido num pipeline, também pode funcionar separadamente e de forma independentemente.

Wrapper: Interface do input e output para um determinado programa. Por exemplo, um código Python chamando algumas sub-rotinas de um código Fortran.

Pipeline: Sistema que gerencia um conjunto de componentes e suas dependências de forma ordenada. O pipeline se encarrega de fornecer os parâmetros ne-

cessários de entrada para todos os componentes e gerenciar as execuções de forma linear e/ou paralela.

Framework: Template com várias funções predefinidas, de maneira mais genérica possível (evitando redefinição de funções), para a criação de interfaces gráficas. Problemas semelhantes podem ser resolvidos usando um mesmo Framework. Django é um exemplo de um framework para aplicações web gratuito e de código aberto, escrito em Python.

Contêiner: Ambiente isolado que empacota códigos, scripts, e/ou softwares e suas respectivas dependências, garantindo dessa forma que a aplicação seja executada em qualquer máquina sem a necessidade de se preocupar com dependências. Um contêiner é uma espécie de máquina virtual, dentro dele é possível gerenciar alguns recursos como memória, rede, sistema operacional, aplicação, serviço, etc.

Backend: Termo utilizado no desenvolvimento web, responsável por responder as requisições feitas através da interface e direcionar para o componente, seja fazendo uma consulta no banco de dados, arquivos ou acessando um serviço externo. É responsável também por gerenciar todos os pedidos de execução de processos, guardando o status, tempo de duração, usuário que solicitou, configurações usadas e resultados obtidos.

Frontend: Termo utilizado no desenvolvimento web, responsável pelas interfaces e todas as interações do usuário com o sistema, manipulação de arquivos e execuções de códigos. Todas essas atividades passam a ser gerenciadas através de interfaces, direto pelo navegador, podendo ser acessada de qualquer lugar em qualquer dispositivo com acesso a internet.

5.2 Metodologia

É importante considerar que os códigos desenvolvidos e os softwares mencionados no capítulo 3 precisam ser adaptados, havendo a necessidade de criação de wrappers em alguns casos, para sua implementação no ambiente de alto desempenho. Esta etapa de implementação é um trabalho complexo que requer a colaboração de profissionais na área de computação, por tal motivo, esta etapa é feita em colaboração com o pessoal de informática do LIneA e sob minha coordenação. Reuniões regulares com o pessoal do LIneA ocorrem duas vezes por mês, nas quais são discutidas e definidas diversas tarefas para a implementação.

Segue uma organização e distribuição da nossa área de atuação nesta etapa.

Pessoal de ciência: Composto por mim e sob a supervisão dos meus orientadores, o Dr. Julio Camargo e o Dr. Ricardo Ogando. A seguir as principais tarefas.

- Fazer as modificações respectivas dos softwares para que possam ser implementados no ambiente de alto desempenho.
- Desenvolver códigos e/ou pipelines para analisar os resultados gerados (gerar gráficos, formatar resultados, transformação de formatos de arquivos).
- Desenvolver códigos para gerenciar os softwares, para ter um uso adequado sequencialmente e de maneira automática.
- Fornecer ao pessoal de informática as informações necessárias de arquivos e/ou parâmetros de entrada/saída de todos os códigos e softwares, requerimentos e validação.
- Analisar resultados depois da respectiva implementação no ambiente.

Pessoal de informática: Composto principalmente pelos programadores Glauber Costa, Carlos Alean de Souza, e Guilherme Soares. A seguir as principais tarefas.

- Encapsular os softwares, usando o contêiner Docker para gerenciar os recursos computacionais necessários para a execução sob demanda.
- Implementar, no ambiente de alto desempenho, os códigos e pipelines desenvolvidos por mim.
- Implementar o registro do histórico dos processos (tempo de execução, datas, estados) e a proveniência.
- Implementar o gerenciamento dos bancos de dados, criação e atualização de tabelas com os dados gerados.
- Manutenção do ambiente de alto desempenho, verificação do estado da máquina, etc.
- Desenhar interfaces gráficas das diversas etapas.

A figura 5.1 mostra um desenho da aplicação web desenvolvida, onde podemos observar como foi feito o gerenciamento das diferentes ferramentas, serviços e clusters disponíveis. Python é nossa linguagem de programação para o desenvolvimento do backend, sendo também utilizado o framework Django. Para desenvolver o frontend, foi adotado o framework React JS¹. PostgreSQL é nosso sistema gerenciador

¹Biblioteca JavaScript de código aberto para criar interfaces de usuário.

de banco de dados. NGINX² é nosso servidor web (HTTP) para processar as solicitações dos usuários da rede garantindo que a troca de informações seja efetuada. Por ser uma aplicação web utilizando o padrão REST³, todos os dados gerenciados pela aplicação podem ser acessados através de APIs, que podem ser disponibilizadas respeitando uma política de permissões. Dessa forma, torna-se também um serviço que pode ser consumido por outras aplicações. O cluster ICE-X, o gerenciador de jobs HTCondor, catálogos estelares (Gaia DR1 e DR2, entre outros) são alguns exemplos da infraestrutura disponível do LIneA.

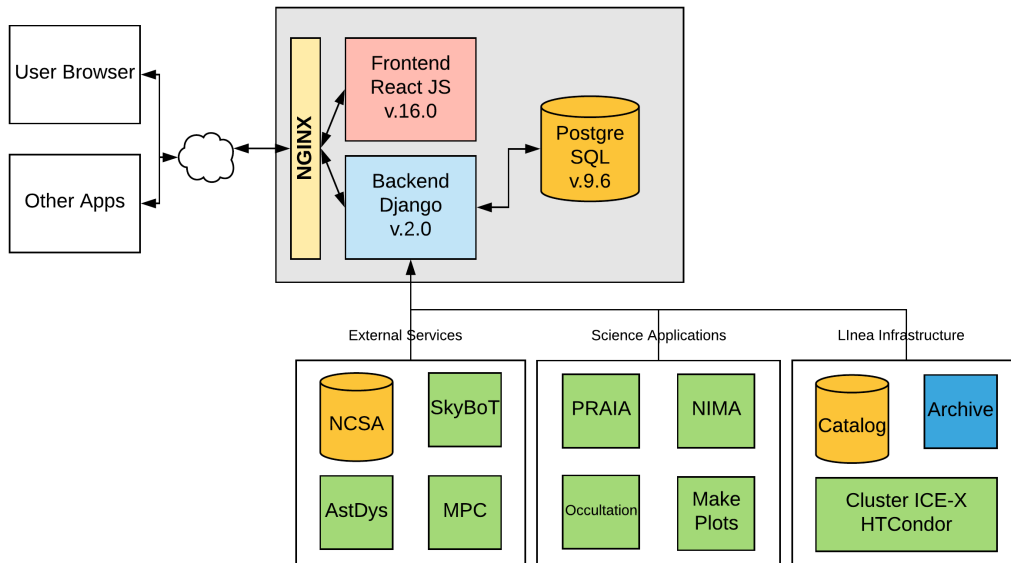


Figura 5.1: Desenho da aplicação web do projeto TNO, mostrando as diferentes etapas, serviços, ferramentas e clusters.

A figura 5.2 é o fluxograma mostrando os diversos pipelines desenvolvidos e seus respectivos componentes assim como os dados e produtos de entrada/saída. Cada pipeline será explicado nas seções seguintes.

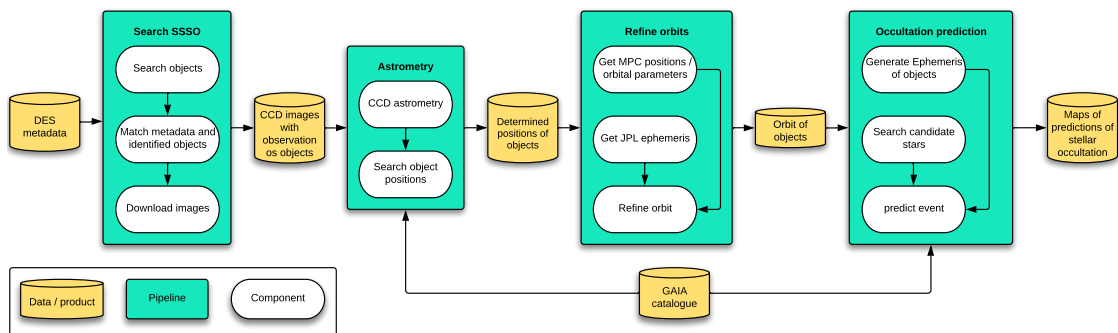


Figura 5.2: Fluxograma de todo o processo de predição de ocultações estelares por TNOs/Centauros identificados nas imagens do DES.

²<https://www.nginx.com/>

³Transferência Representacional de Estado (do inglês: Representational State Transfer) é um estilo de arquitetura de software que define um conjunto de restrições a serem usados para a criação de serviços Web.

5.3 Visão geral da interface

A interface da aplicação web é mostrada na figura 5.3, está dividida em dois painéis, o painel da direita é usada para a definição dos parâmetros de entrada, execução dos processos, visualização dos resultados e o painel da esquerda é usado para navegar nas diversas etapas, cujo ordem de execução é de cima para baixo. A seguir a lista das etapas (detalhadas nas seções seguintes).

Dashboard: Informação, gráficos, e estatística geral de todas as etapas.

Pointings: Etapa para a obtenção dos metadados do DES.

Search SSSO: Etapa de identificação de pequenos corpos do Sistema Solar (SSSO: Small Solar System Objects). A submissão de consultas para o serviço SkyBoT é feito na opção “Execute SkyBoT”, enquanto que, a visualização dos resultados é mostrado ao selecionar a opção “Result”.

Filter Objects: Etapa para fazer diversas filtragens e selecionar objetos de interesse (TNOs e Centauros no nosso caso).

Astrometry: Etapa para fazer a redução astrométrica de imagens CCDs com observações de objetos de interesse.

Refine Orbit: Etapa para fazer o refinamento das órbitas dos objetos.

Prediction of Occultation: Etapa para fazer a predição de eventos de ocultação estelar por pequenos corpos do Sistema Solar. As etapas “Occultations” e “Occultation Calendar” são formas de visualização dos resultados das predições.

Através da opção “Input Files” é possível ter acesso a algumas informações (obtidas usando serviços externos) que foram usadas como entradas para as etapas acima mencionadas. A seguir uma breve descrição deles.

Bsp_Jpl: Mostra a informação dos arquivos bsp baixados do JPL, eles contém as efemérides dos objetos do Sistema Solar.

Observation: Mostra a informação dos arquivos que contém observações, registradas no MPC, dos objetos do Sistema Solar.

Orbital Parameter: Mostra a informação dos arquivos que contém os parâmetros orbitais dos objetos do Sistema Solar (ver figura 5.3).

Johnston Archives: Visualização personalizada da informação mostrada em <http://www.johnstonsarchive.net/astro/tnoslist.html>.

Details	Name	Source	Filename	Download Start Time	Download Finish Time	File Size	External Uri	Download Uri
	Eris	AstDys	Eris.eq0	2019-11-26 14:52:00	2019-11-26 14:52:01	1815	https://newton.spacedys.c...	https://newton.spacedys.c...
	2004 DA62	AstDys	2004_DA62.eq0	2020-01-30 14:45:31	2020-01-30 14:45:32	1817	https://newton.spacedys.c...	https://newton.spacedys.c...
	2006 BF208	AstDys	2006_BF208.eq0	2020-01-30 14:45:31	2020-01-30 14:45:32	1818	https://newton.spacedys.c...	https://newton.spacedys.c...
	2006 RJ103	AstDys	2006_RJ103.eq0	2020-01-30 14:45:31	2020-01-30 14:45:32	1818	https://newton.spacedys.c...	https://newton.spacedys.c...
	2007 UM126	MPC	2007_UM126.eqm	2020-01-30 14:45:32	2020-01-30 14:45:35	117	https://minorplanetcenter...	
	2011 ON45	AstDys	2011_ON45.eq0	2020-01-30 14:45:31	2020-01-30 14:45:33	1815	https://newton.spacedys.c...	https://newton.spacedys.c...
	2011 SO277	MPC	2011_SO277.eqm	2020-01-30 14:45:32	2020-01-30 14:45:34	116	https://minorplanetcenter...	
	2012 PD26	AstDys	2012_PD26.eq0	2020-01-30 14:45:31	2020-01-30 14:45:34	1817	https://newton.spacedys.c...	https://newton.spacedys.c...
	2013 NS11	AstDys	2013_NS11.eq0	2020-01-30 14:45:31	2020-01-30 14:45:33	1817	https://newton.spacedys.c...	https://newton.spacedys.c...
	2013 RG98	AstDys	2013_RG98.eq0	2020-01-30 14:45:31	2020-01-30 14:45:32	1817	https://newton.spacedys.c...	https://newton.spacedys.c...

Figura 5.3: Interface da aplicação web para fazer o estudo de objetos do Sistema Solar.

5.3.1 Usuários

A aplicação web será liberado ao público interessado em estudar os objetos do Sistema Solar através de ocultações estelares. As diferentes classes de usuários ainda não foram bem definidas. A seguir uma breve descrição das principais propostas de usuários.

Usuário comum: Usuário que pode utilizar alguns dos módulos da aplicação (astrometria, refinamento de órbita e predição de ocultações) para processar os dados dele. Para ser um usuário comum bastaria realizar um registro e concordar com os termos de uso e compromisso.

Usuário PI: Investigador principal que lidera projetos (exemplo: DES, LSST, entre outros levantamentos) que podem ser realizados usando a aplicação web. Este usuário pode utilizar todos os serviços sem restrição. Para ser um usuário PI é preciso, além de realizar um registro, ser aprovado pelo LIneA.

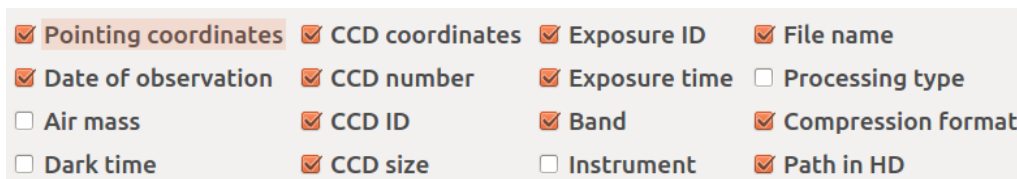
Usuário admin: Pessoal de informática, designado pelo LIneA, encarregado da manutenção e atualizações da aplicação.

5.4 Obtenção de metadados

Usando a DECam os cientistas do DES coletaram 50 TB de dados em 758 noites de observação durante seis anos (desde 31 de agosto de 2013 até 9 de Janeiro de 2019). Esses dados são armazenados e analisados no National Center for Supercomputing Applications⁴ (NCSA) da Universidade de Illinois nos Estados Unidos.

Este pipeline consiste basicamente em obter, através de consultas no banco de dados do DES, os metadados (informações dos dados) de todas as imagens geradas pela DECam para o projeto DES. Informações das consultas (quando foram feitas, tempo de execução, parâmetros solicitados, proveniência, etc.) e os resultados são registrados em banco de dados locais.

Input: A entrada para este pipeline é uma lista de parâmetros a serem extraídos. A figura 5.4 mostra a forma de como será feito a seleção dos parâmetros de entrada (detalhes destes parâmetros na tabela 3.1).



<input checked="" type="checkbox"/> Pointing coordinates	<input checked="" type="checkbox"/> CCD coordinates	<input checked="" type="checkbox"/> Exposure ID	<input checked="" type="checkbox"/> File name
<input checked="" type="checkbox"/> Date of observation	<input checked="" type="checkbox"/> CCD number	<input checked="" type="checkbox"/> Exposure time	<input type="checkbox"/> Processing type
<input type="checkbox"/> Air mass	<input checked="" type="checkbox"/> CCD ID	<input checked="" type="checkbox"/> Band	<input checked="" type="checkbox"/> Compression format
<input type="checkbox"/> Dark time	<input checked="" type="checkbox"/> CCD size	<input type="checkbox"/> Instrument	<input checked="" type="checkbox"/> Path in HD

Figura 5.4: Seleção dos parâmetros de entrada através da interface gráfica.

Output: Como saída temos uma tabela com todos os parâmetros solicitados (ver figura 5.5), informações gerais dos resultados obtidos (ver tabela 5.1) e gráficos mostrando a distribuição das exposições por ano, tempo de exposição, e banda (ver figura 5.6).

As etapas estão organizadas para serem executadas em sequência, devido que o resultado de uma é a entrada de outra. Neste caso, o resultado obtido aqui é fornecido para a etapa Search SSSO (descrito na seção seguinte).

Os metadados dos seis anos do levantamento DES já foram baixados e armazenados num banco de dados local, que pode ser acessado internamente pela aplicação web. Atualmente, essa aplicação está em processo de reestruturamento, algumas melhorias estão sendo implementadas. Os parâmetros mostrados na interface (figura 5.4) serão obtidos no processo de “filter object”.

⁴<http://www.ncsa.illinois.edu/>

LineA Pointings N

List With All Pointings

Search...

Details	Observation Date	Filename	CCD Number	Band	Expos time (s)	ra_cent (deg)	dec_cent (deg)	Downloaded
<i>i</i>	2019-01-30	D00817885_Y_c01_r4061p...	1	Y	20	186.442	0.903	✗
<i>i</i>	2019-01-30	D00817885_Y_c02_r4061p...	2	Y	20	186.752	0.902	✗
<i>i</i>	2019-01-30	D00817885_Y_c03_r4061p...	3	Y	20	187.063	0.902	✗
<i>i</i>	2019-01-30	D00817885_Y_c04_r4061p...	4	Y	20	186.286	0.739	✗
<i>i</i>	2019-01-30	D00817885_Y_c05_r4061p...	5	Y	20	186.597	0.739	✗
<i>i</i>	2019-01-30	D00817885_Y_c06_r4061p...	6	Y	20	186.907	0.738	✗
<i>i</i>	2019-01-30	D00817885_Y_c07_r4061p...	7	Y	20	187.218	0.738	✗
<i>i</i>	2019-01-30	D00817885_Y_c08_r4061p...	8	Y	20	186.130	0.575	✗
<i>i</i>	2019-01-30	D00817885_Y_c09_r4061p...	9	Y	20	186.441	0.575	✗
<i>i</i>	2019-01-30	D00817885_Y_c10_r4061p...	10	Y	20	186.752	0.574	✗

Rows per page: 10 1-10 of 13762500 < 1 2 3 ... 1376250 >

TNO: 1.0.0 Powered by LineA

Figura 5.5: Visualização dos metadados obtidos, correspondente a 135.525 exposições (13.762.500 imagens CCD) gerados nos seis anos de operação do DES. Através dos botões da coluna “Details” é possível visualizar a informação completa de cada imagem CCD. As coordenadas dos centros das imagens CCDs são mostradas nas colunas “ra_cent” e “dec_cent”. O simbolo “✗” indica que o arquivo de imagem ainda não foi baixado.

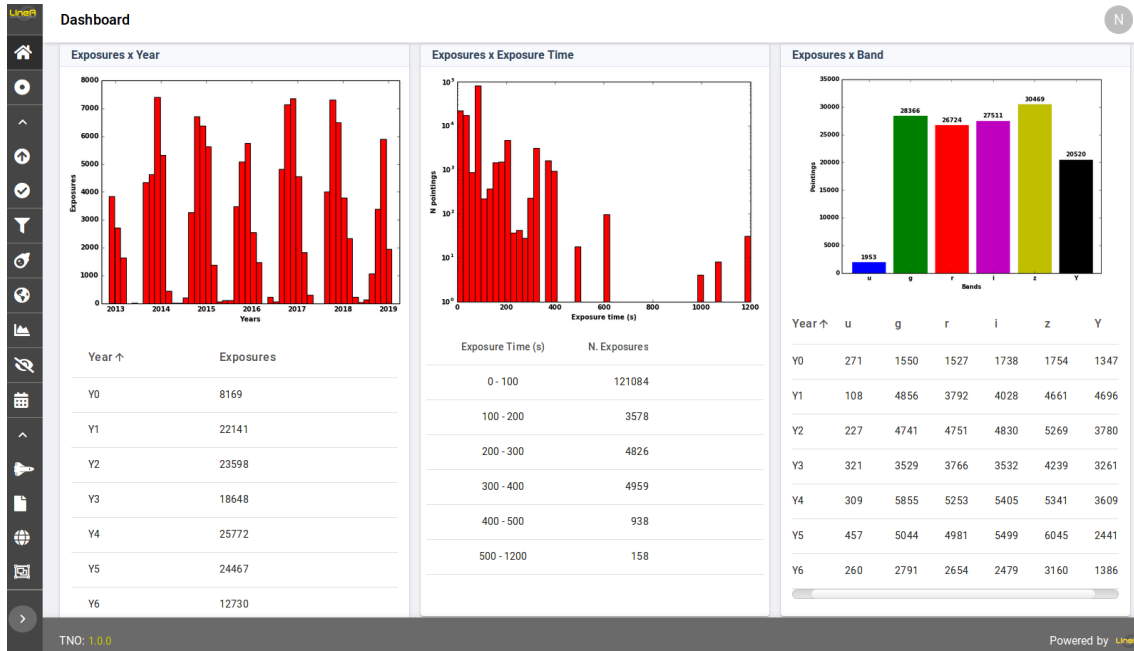


Figura 5.6: Histogramas das exposições do DES, por ano, tempo de exposição e banda. Vale mencionar que em 2013 foi gerado menos quantidade de dados devido a alterações climáticas ocasionadas pelo fenômeno “El niño”.

Ano	Exposições	Bandas					
		<i>u</i>	<i>g</i>	<i>r</i>	<i>i</i>	<i>z</i>	<i>Y</i>
2012	8.169	271	1.550	1.527	1.738	1.754	1.347
2013	22.141	108	4.856	3.792	4.028	4.661	4.696
2014	23.598	227	4.741	4.751	4.830	5.269	3.780
2015	18.648	321	3.529	3.766	3.532	4.239	3.261
2016	25.772	309	5.855	5.253	5.405	5.341	3.609
2017	24.467	457	5.044	4.981	5.499	6.045	2.441
2018	12.730	260	2.791	2.654	2.479	3.160	1.386
Total	135.525	1.953	28.366	26.724	27.511	30.469	20.520

Tabela 5.1: Total de exposições da DECam, distribuídos por bandas para os seis anos de funcionamento do DES, e ao período de verificação científica (novembro de 2012 até fevereiro de 2013).

5.5 Pipeline Search SSSO

Este pipeline identifica todas as imagens CCDs do DES que têm observações de objetos conhecidos do Sistema Solar. Para cumprir este objetivo, foi implementado um gerenciador do serviço SkyBoT (descrito no capítulo 3) para fazer a procura dos objetos no campo de visão de uma imagem da DECam (área circular de 1,1 graus de

raio), o resultado é armazenado numa tabela num banco de dados local. Aplicando a operação “join” entre as duas tabelas (metadados e objetos identificados) é possível associá-los.

5.5.1 Componente Search Objects

Este componente gerencia o uso do serviço SkyBoT para identificar os objetos conhecidos do Sistema Solar em cada exposição. A lista com todos os objetos identificados é armazenado numa tabela do banco de dados local. A figura 5.7 mostra os objetos identificados (pontos vermelhos) numa região circular onde está o mosaico de CCDs (retângulos azuis) que representa uma exposição da DECam. É importante mencionar que a busca de objetos é feito numa área circular a diferença do que foi feito anteriormente (descrito no capítulo 3), onde a busca era por CCD. A vantagem de uma busca por CCD (área retangular) é a obtenção direta dos objetos identificados mas a desvantagem é que este procedimento é demorado devido a necessidade de serem feitas 62 consultas (uma consulta por CCD) no SkyBoT para uma exposição. Por outro lado, uma busca por exposição (área circular) é mais rápida, no entanto, para saber que objetos se encontram nas imagens CCDs tem que ser feito um procedimento de associação entre as tabelas dos objetos identificados e os metadados, levando as coordenadas dos CCDs e os gaps horizontal e vertical existentes entre eles.

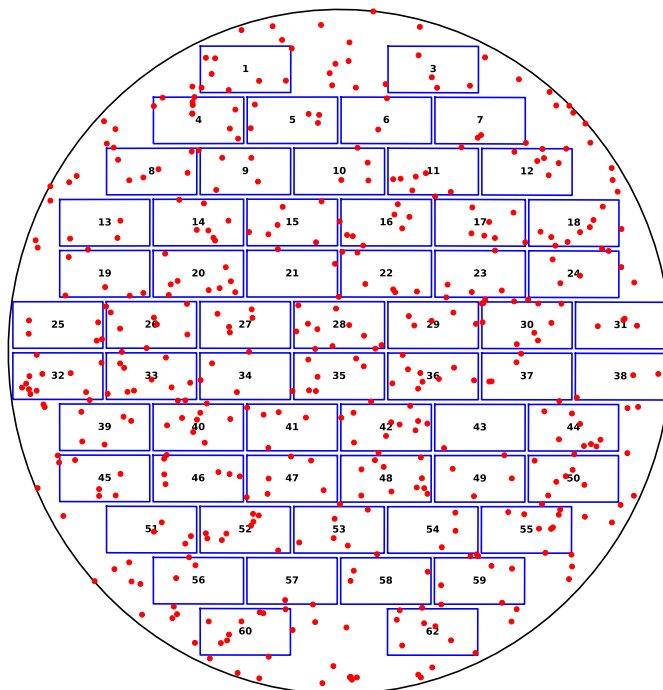


Figura 5.7: Objetos identificados (pontos vermelhos) pelo SkyBoT numa região circular dentro da qual estão os CCDs (retângulos azuis) que compõem a DECam. Os CCDs 2 e 61 são os que estão queimados.

A tabela 5.2 é uma comparação do tempo estimado⁵ para fazer a identificação de objetos usando o serviço SkyBoT disponibilizado pelo observatório de Paris (IMCCE) e seu espelho instalado no LIneA e tendo como referência o FoV da DECam e dos CCDs.

FoV da identificação	N	SkyBoT	
		IMCCE	LIneA
Retângulo (CCD)	4.292.847	180 dias	20 dias
Círculo (DECam)	71.028	4 dias	10 horas

Tabela 5.2: Estimativa do tempo para analisar os dados do DES DR1. A DECam é composta por 62 CCDs.

5.5.2 Componente Match metadata - objects

Este componente faz a associação entre as tabelas dos objetos identificados e os metadados, quer dizer que, depois da aplicação deste componente poderemos saber os objetos do Sistema Solar que foram observadas em cada CCD da DECam.

Na figura 5.7 os únicos parâmetros de associação que se conhecem são as coordenadas do apontamento (centro do FoV circular). O pessoal de informática do LIneA (com conhecimento mais profundo de banco de dados e operações entre tabelas) junto comigo (com conhecimento de definições dos parâmetros, organização das tabelas) desenvolvemos um algoritmo para fazer a associação entre os metadados e os objetos identificados.

5.5.3 Input/Output do pipeline

As principais entradas para o pipeline SSSO são:

- Código de localização do observatório⁶.
- Campo de visão, definido por um círculo ou retângulo.
- Metadados (Coordenadas do apontamento, data de observação, etc.) que é o resultado da etapa anterior.

A figura 5.8 é a interface para fazer a submissão para o SkyBoT. No painel superior esquerdo é mostrado o intervalo de datas para fazer a identificação dos objetos nas imagens CCDs, assim como também o tempo estimado para fazer isso.

⁵A velocidade de busca varia com as novas atualizações do SkyBoT.

⁶Lista de códigos em: <https://www.minorplanetcenter.net/iau/lists/ObsCodes.html>

No painel superior direito é mostrado o histograma das exposições. No painel inferior é mostrado o histórico dos processos.

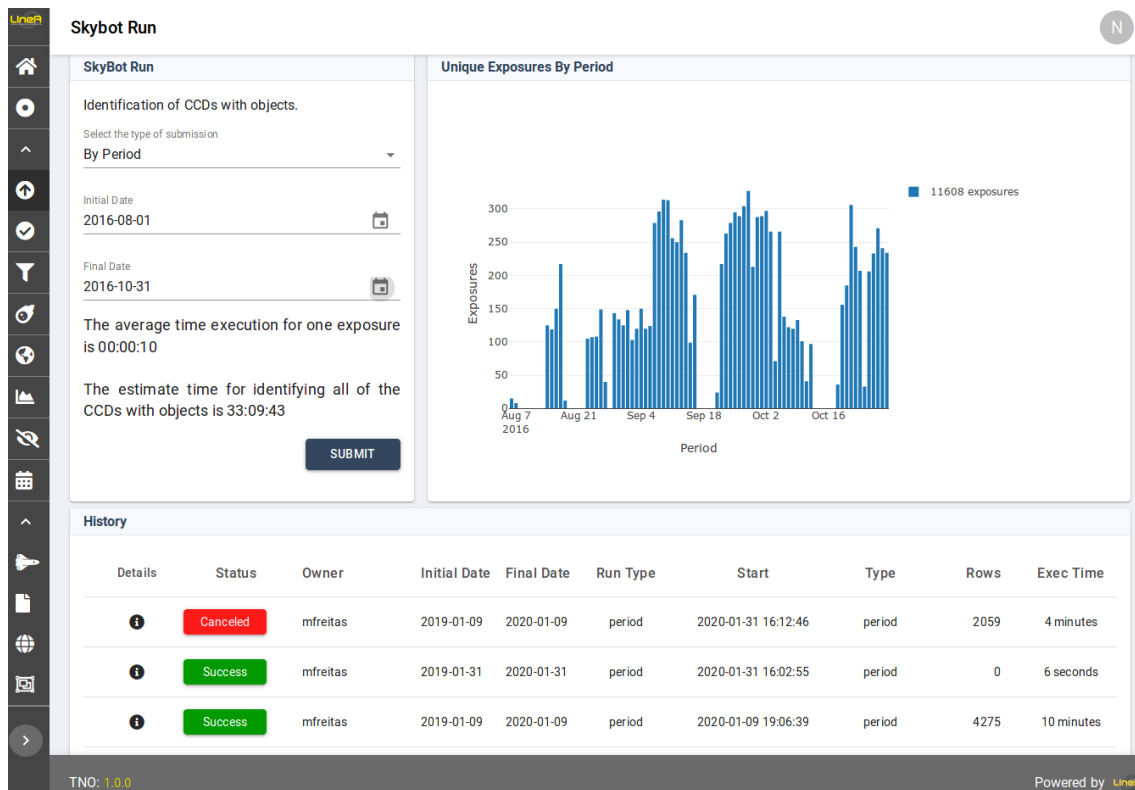


Figura 5.8: Interface gráfica da seleção de parâmetros de entrada, onde também é mostrado o histórico dos processos.

O produto resultante é uma tabela com a lista de objetos identificados (ver figura 5.9). Um dos parâmetros desta tabela é o identificador da imagem CCD, assim podemos saber os objetos que foram observados nas imagens CCDs.

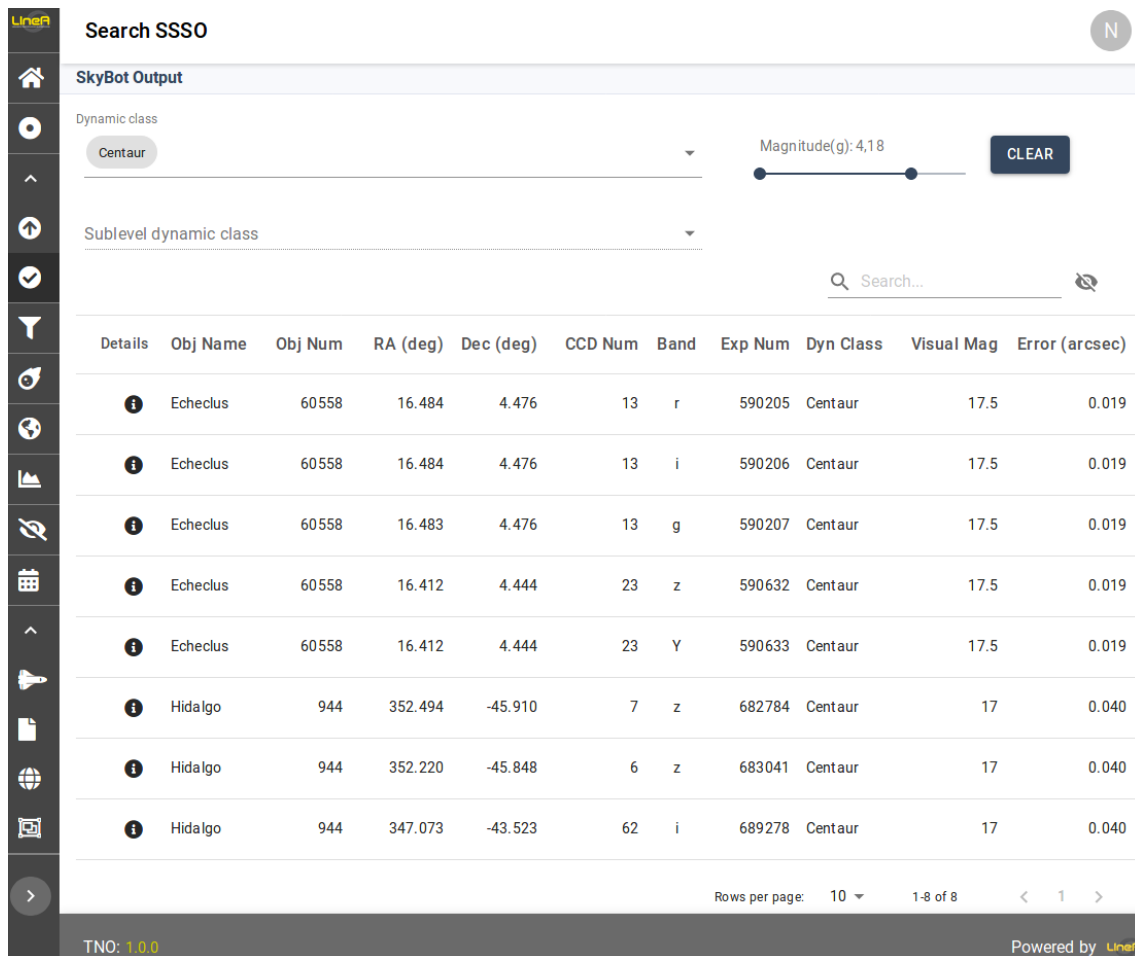


Figura 5.9: Resultado do pipeline SSSO. Visualização dos objetos identificados, onde a coluna “Exp Num” representa o número da exposição.

5.6 Filter Objects

A aplicação de alguns filtros, tais como magnitude visual, classe dinâmica entre outros é feita nesta etapa, cujo objetivo é fazer a seleção dos objetos de interesse a partir da lista de objetos identificados nas imagens CCDs (descrito na seção anterior). Diversas queries foram desenvolvidas, para extrair informações de objetos específicos, os quais são procurados por nome ou classe dinâmica.

A figura 5.10 é a interface de esta etapa, onde os objetos de interesse, o limite na magnitude visual e o valor mínimo para a diferença de tempo entre observações são definidos pelo usuário. Após a aplicação desses filtros, uma tabela com informações estatísticas das observações dos objetos é visualizado no painel direito. Os metadados das observações dos objetos de interesse podem ser salvados no sistema usando o botão “Save”.

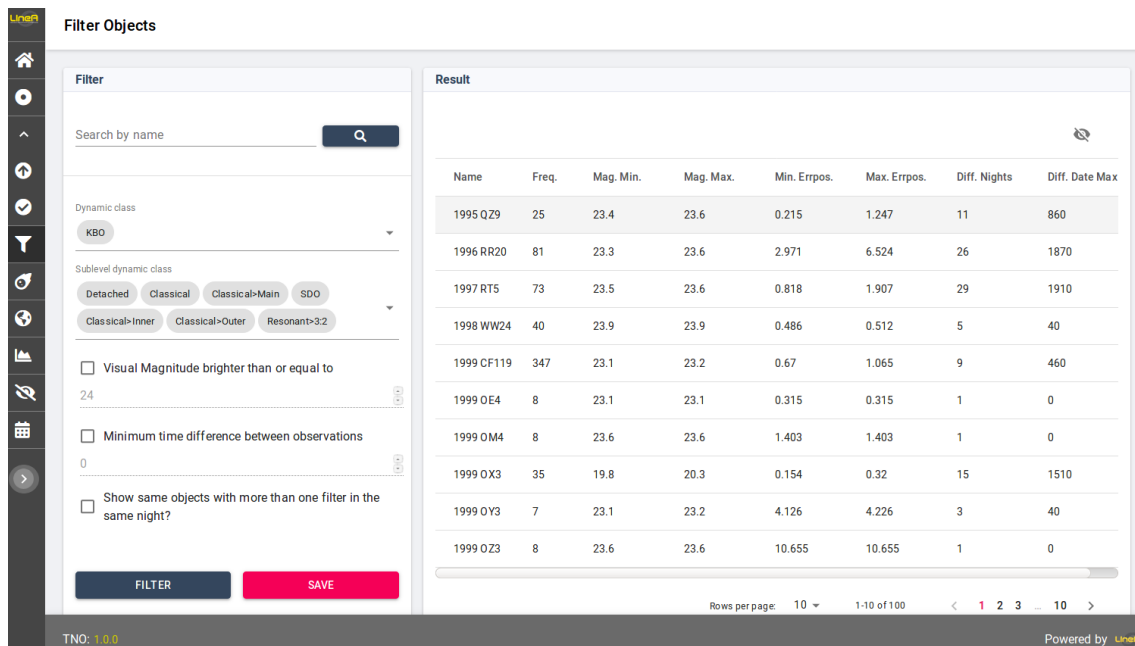


Figura 5.10: Interface do “Filter Objects”. Painel esquerdo: Definição dos objetos de interesse, e seleção de filtros a serem aplicados. Painel direito: Informação estatística das observações dos objetos de interesse.

A seguir uma breve descrição dos parâmetros da tabela mostrada na figura 5.10.

Name: Nome do objeto de interesse. A designação provisória é usada, no caso o objeto não ter um nome oficial.

Freq.: Frequência de observação, representa o número de imagens CCDs que tem observações do objeto.

Mag. Min./Max: Magnitude mínima/máxima do objeto.

Min./Max. Errpos.: Mínimo/máximo valor da incerteza na posição do objeto.

Diff. Nights: Noites diferentes, representa o número de noites nas quais foi observado o objeto. Um objeto poderia ser observado várias vezes numa mesma noite.

Diff. Date Max: Diferença máxima de datas, representa o máximo valor da diferença entre duas observações consecutivas de um objeto.

5.6.1 Input/output

As principais entradas para esta etapa são listadas a seguir:

- Nome ou classe dinâmica dos objetos de interesse.

- Definição de limites na magnitude visual, na diferença de tempo entre duas observações consecutivas. Estes filtros são opcionais.
- Tabela com a lista de objetos identificados, é o resultado do pipeline SSO (seção prévia). Esta tabela é automaticamente fornecida como uma das entradas.

O produto resultante, mostrado na figura 5.11, é uma tabela com informações dos objetos de interesse (classe dinâmica, coordenadas, incerteza na posição, etc.) e uma informação estatística (total de objetos, exposições e imagens CCDs, etc.)

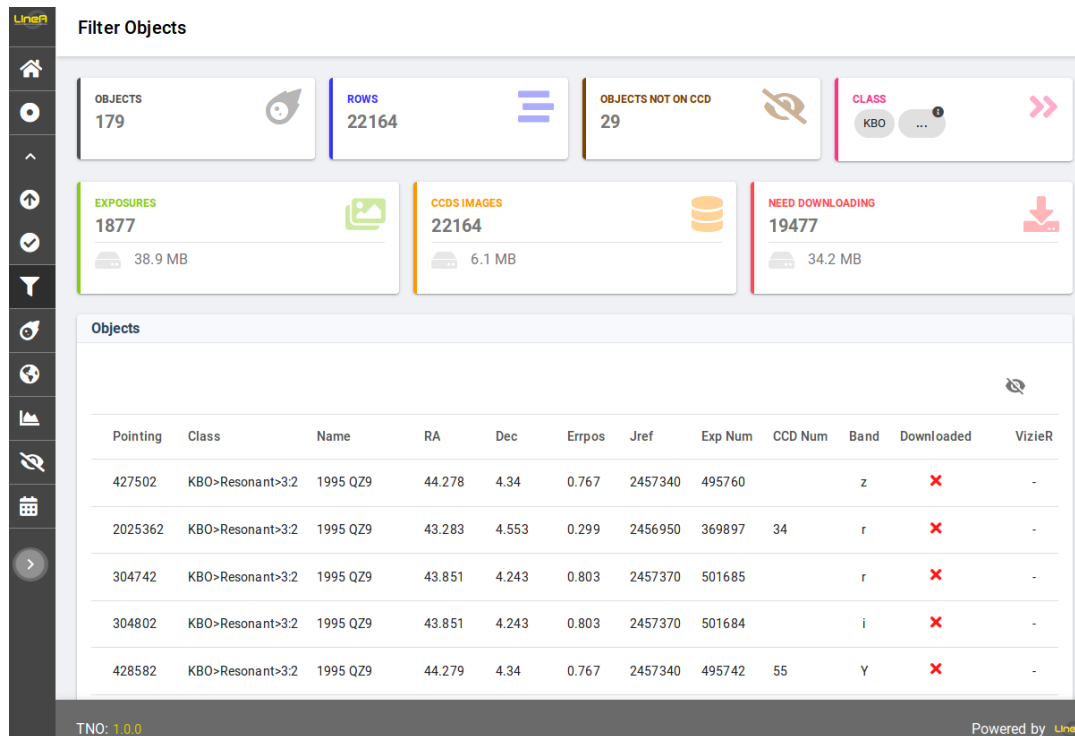


Figura 5.11: Resultado do “Filter objects”. Estatística e lista de TNOs encontrados.

5.7 Pipeline Astrometria

Este pipeline faz o processo de redução astrométrica de imagens CCDs usando o catálogo estelar Gaia DR2 e seleciona as posições determinadas correspondentes aos objetos do Sistema Solar.

O PRAIA (descrito no capítulo 3), código desenvolvido em Fortran, é encapsulada no contêiner Docker. Ao ser solicitado pela interface uma execução do PRAIA, o backend prepara os dados de entrada, cria o arquivo de configuração utilizando os parâmetros escolhidos na interface, passa para o gerenciador de workflows *Parsl*⁷ que fica encarregado de levantar N instâncias em paralelo do contêiner PRAIA no Cluster, cada contêiner recebe um conjunto de inputs, processa e retorna os resultados.

⁷Biblioteca Python para programar e executar fluxos de trabalho orientados a dados (dataflows) em paralelo.

Em seguida o contêiner é destruído. O backend vai então guardar os resultados para uso nas etapas seguintes ou análise pela interface. Nesta arquitetura, é possível acrescentar mais componentes científicos tratando como plugins, basta que sejam encapsulados com Docker e que a aplicação tenha os inputs necessários. Durante a execução, cada módulo se comunica com o backend passando informações da sua execução, que ficam em tempo real disponíveis na interface.

5.7.1 Componente: Astrometry

Este componente identifica objetos numa imagem CCD, os mede com ajustes Gausianos simétricos bidimensionais, reconhece as estrelas usando o catálogo estelar Gaia DR2 e determina as posições (RA, Dec.) dos objetos identificados. O pacote PRAIA astrometry é a ferramenta principal deste componente. O LIneA fez a ingestão do catálogo Gaia DR1 e DR2 nas máquinas locais, para a qual, foi necessário pouco mais de 3 TB de espaço em disco rígido.

Antes da execução deste componente é necessário a preparação dos dados de entrada, os quais são descritos a seguir.

- Verificação da disponibilidade de todos os arquivos fits das imagens CCDs nas quais foi identificado um objeto do Sistema Solar de interesse. Um processo de download das imagens ainda não baixadas é executado automaticamente. Todos os arquivos de imagens baixados estão armazenados num diretório específico de uma máquina do LIneA.
- Execução do *PRAIA header extraction* (apresentado no capítulo 3) para obter informações necessárias (Coordenadas do centro da imagem CCD, data de observação, tempo de exposição, etc.) do header de uma imagem. Estas informações são armazenadas num arquivo ASCII.
- Obtenção de posições das estrelas localizadas numa região circular, dentro da qual se encontra a imagem CCD. A figura 5.12 mostra o limite da região circular para fazer as consultas no catálogo estelar Gaia DR2 e assim, obter as estrelas contidas nesta região.

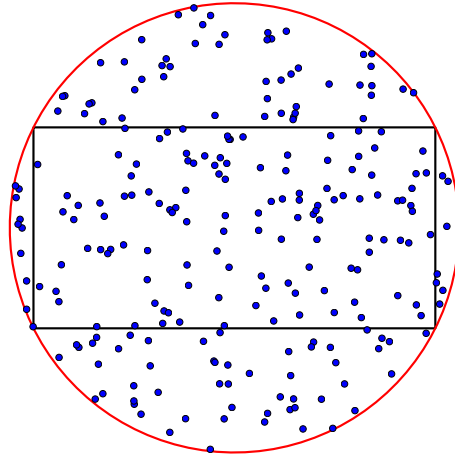


Figura 5.12: Círculo (linha vermelha) dentro da qual se encontram as estrelas (pontos azuis) e a imagem CCD (linhas pretas).

Tendo os dados de entrada prontos (imagens CCDs e informações das estrelas de referência respectivas) é feita a execução em paralelo do PRAIA Astrometry, processo gerenciado pelo HTCondor⁸. Segue os principais passos deste processo.

- Definição de um arquivo de configuração. Arquivos de entrada/saída, código a ser executado, número de núcleos, entre outros definidos neste arquivo de configuração.
- O arquivo de configuração é submetido para o HTCondor. Ele procura núcleos disponíveis e faz sua distribuição dependendo da quantidade de tarefas a fazer.
- O HTCondor procura o código e os respectivos dados de entrada, os transfere para o espaço de memória relacionado ao núcleo específico onde será realizada a execução.
- O código é executado no respectivo núcleo e o resultado é transferido para o diretório onde foi feita a submissão.
- Todos os arquivos transferidos e gerados na área do núcleo são deletados (liberação de memória).

Tivemos algumas dificuldades na implementação deste processo de paralelização devido que o PRAIA astrometry precisa estar no mesmo diretório onde os arquivos de imagens de entrada estão, o que significa que, é necessário que o HTCondor faça transferência dos arquivos fits (1 arquivo \sim 85 MB) desde o diretório das imagens para o espaço de memória do respectivo núcleo. Por exemplo, se queremos fazer a

⁸Estrutura de software de alto rendimento para paralelização de tarefas computacionalmente intensivas.

redução astrométrica de 1.000 imagens CCDs seria necessário um processo de transferência de aproximadamente 85 GB. Para evitar fazer a transferência das imagens criamos links simbólicos⁹ referentes a eles na área do núcleo.

O resultado principal desta componente é um arquivo com informações dos objetos identificados na imagem. Segue os principais parâmetros deste arquivo resultante.

- Coordenadas sobre o CCD (Gaussiana circular) de todos os objetos medidos no campo, em unidades de pixels.
- Coordenadas reduzidas (RA, Dec.), em unidades de horas e graus respectivamente.
- Data Juliana referente a exposição.
- Número de estrelas de referência identificadas em campo.
- Tempo de exposição em segundos.

5.7.2 Componente: Search objects positions

Esta componente procura objetos do Sistema Solar numa lista de objetos cujas posições, entre outros parâmetros, foram determinadas pelo componente Astrometry. Posições para as datas de observação são calculadas a partir de efemérides (arquivos bsp) e por comparação com a posição determinada pela astrometria é possível saber qual corresponde ao objeto do Sistema Solar. A identificação dos objetos não será possível se a incerteza das efemérides for muito grande. Normalmente, se a incerteza na efeméride do objeto for muito grande ($> 2''$), nenhuma identificação é retornada. De todo modo, esta é uma questão sem solução fácil visto que a quantidade de dados não privilegia a investigação individual de cada imagem.

As posições de um objeto do Sistema Solar são calculadas usando a biblioteca *Spiceypy*¹⁰ (ANNEX, 2017), que é um wrapper Python para o *SPICE toolkit*¹¹, ferramenta essencial no campo da ciência planetária da geometria do Sistema Solar. A vantagem deste wrapper é o uso das sub-rotinas do SPICE de forma simples e rápida a partir de códigos Python. Todas as posições calculadas e a respectiva data juliana são armazenadas num arquivo de alvos.

Os arquivos de alvos e o resultante da astrometria são os dados de entrada para o pacote *PRAIA targets search* que faz o relacionamento entre um objeto do Sistema Solar e uma das posições determinadas na astrometria. Esta posição com os

⁹Mecanismo que faz referência a outro arquivo ou diretório em outra localização.

¹⁰<https://github.com/AndrewAnnex/SpiceyPy>

¹¹<https://naif.jpl.nasa.gov/naif/toolkit.html>

demais parâmetros determinados na astrometria são armazenados num arquivo, de tal maneira que este arquivo teria só as posições determinadas do objeto do Sistema Solar.

O offset, diferença entre as posições determinadas na astrometria e aquela calculada de efemérides, em unidades de segundo de arco, é a informação que é adicionada à informação correspondente do objeto do Sistema Solar que foi extraída do resultado do componente `astrometry`.

Como exemplo visual do resultado deste pipeline mostramos na figura 5.13 uma posição de um objeto do Sistema Solar, a qual foi determinada a partir de uma imagem CCD, mostrando também as posições de estrelas, obtidas usando o catálogo estelar Gaia DR2, encontradas dentro do campo.

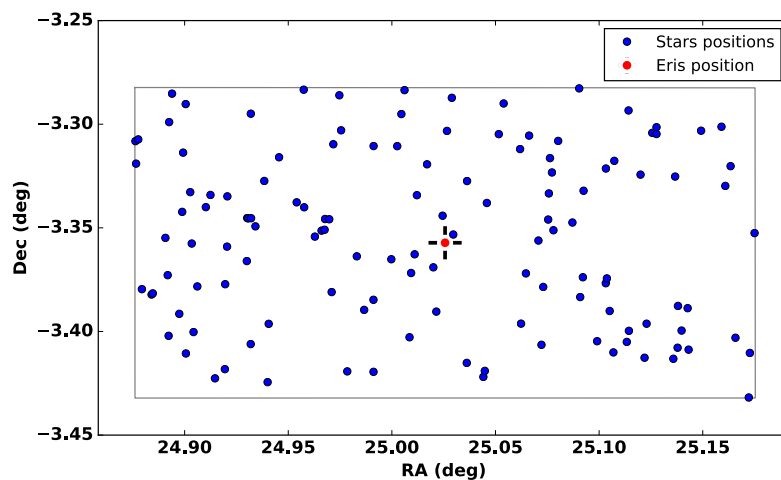


Figura 5.13: Área de cobertura de uma imagem CCD, mostrando as estrelas (pontos azuis) e o TNO Eris (ponto vermelho).

5.7.3 Input/output do pipeline

Os principais parâmetros de entrada são brevemente descritos a seguir.

Input Object List: Define da lista de objetos de interesse. Todas as listas geradas pelo pipeline `Filter Objects` (seção anterior) estão disponíveis aqui para que o usuário possa selecionar uma delas.

Reference Catalog: Define do catálogo estelar de referência, tendo como padrão o Gaia DR2.

Configuration: Define um arquivo de configurações com os parâmetros de entrada para o PRAIA `astrometry`. Todos estes parâmetros já foram pre-definidos e adaptados à aplicação web, no entanto, o usuário tem a opção, através da interface, de redefinir alguns deles.

O resultado deste pipeline é uma lista de arquivos (um arquivo por objeto) com as posições determinadas (uma posição por linha) a partir das imagens CCDs. O conteúdo do arquivo resultante para o TNO 1999 RB₂₁₆ é mostrado a seguir.

1	01	35	49.5574	+03	36	38.104	23.123	2456545.87105049	W84	V
2	01	35	49.5485	+03	36	38.024	22.291	2456545.87398248	W84	V
3	01	35	49.5435	+03	36	38.009	22.117	2456545.87537180	W84	V

Onde as primeiras seis colunas são a ascensão reta e declinação respectivamente, e as seguintes quatro colunas são a magnitude, data juliana, código do observatório¹² e código do catálogo estelar¹³ respectivamente.

A figura 5.14 mostra os resultados obtidos para o TNO 1999 RA₂₁₆. Duas posições foram determinadas, cujas informações são mostradas no painel inferior. Como podemos ver no gráfico do painel superior direito, a maior parte de tempo de execução foi dedicado para fazer o processo de redução astrométrica.

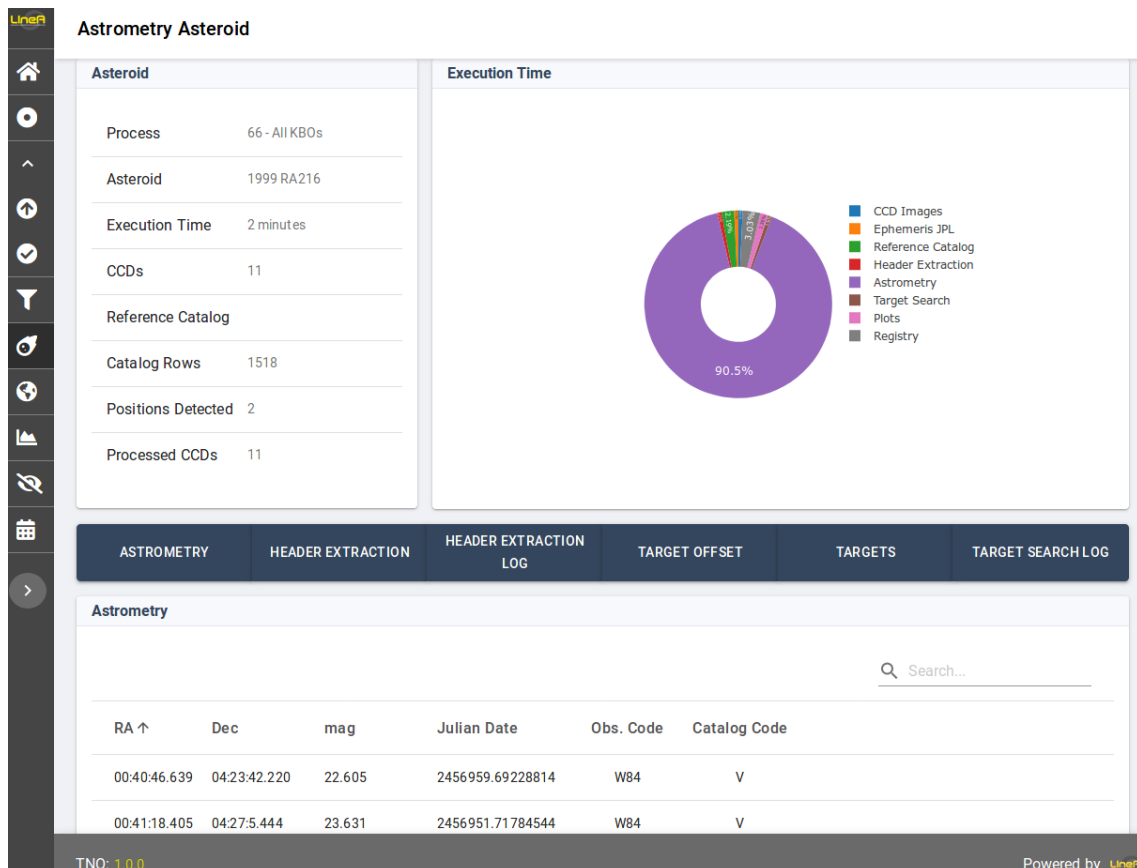


Figura 5.14: Visualização dos resultados do pipeline Astrometry para os Centauros identificados nas imagens CCDs do DES.

¹²<https://www.minorplanetcenter.net/iau/lists/ObsCodes.html>

¹³<https://minorplanetcenter.net/iau/info/CatalogueCodes.html>

5.8 Pipeline: Refinamento de órbita

O integrador numérico NIMA (descrito no capítulo 3) é implementado neste pipeline com o objetivo de fazer o processo de refinamento de órbita de qualquer objeto conhecido do Sistema Solar, combinando posições astrométricas já disponíveis no banco de dados do MPC, com aquelas determinadas a partir de novas observações. Estas posições podem ser determinadas usando o pipeline Astrometry (descrito na seção anterior).

Antes do NIMA ser encapsulado no contêiner Docker (da mesma maneira que o PRAIA) eu fiz algumas modificações para separar o NIMA em duas principais etapas, as quais são descritas a seguir.

Dependência de rede: Processo de busca de informação dos elementos orbitais e posições astrométricas registradas no MPC, e efemérides dos objetos.

Processamento: Processo de integração numérica das equações de movimento e ajuste de órbita utilizando como entradas principais os dados obtidos no item anterior e também as posições astrométricas determinadas.

A órbita de um objeto é refinada com uma execução do NIMA. Num contexto de grandes massas de dados é recomendável separar os processos de dependência de rede e processamento, dessa maneira o processamento não seria afetada se a rede cair. Para evitar a dependência da rede em cada execução do NIMA, foi desenvolvido um algoritmo (componente: Get object data) para procurar os dados necessários em serviços disponíveis na rede, e armazená-los nas máquinas locais do LIneA. Assim, o NIMA procura localmente esses dados ao invés de acessar na rede. Desta maneira é possível paralelizar os processos separadamente.

A figura 5.15 mostra o fluxograma do processo de refinamento de órbita. A etapa inicial é a obtenção de dados dos objetos usando o serviços AstDyS, MPC e JPL. Esses dados combinados com as posições determinadas pela astrometria são fornecidas para o NIMA e o resultado principal dele é um arquivo binário (formato bsp) com as efemérides dos objetos.

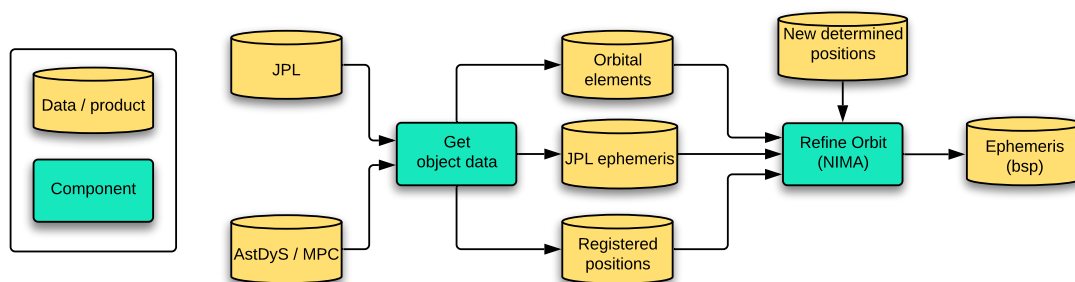


Figura 5.15: Fluxograma do processo de refinamento de órbitas de objetos do Sistema Solar.

5.8.1 Componente: Get object data

Este componente foi desenvolvido em Python e tem como objetivo procurar alguns dados de objetos do Sistema Solar em serviços disponíveis na rede. Está dividido em duas etapas, a primeira é a busca das informações de elementos orbitais e posições astrométricas e a segunda etapa é a obtenção de arquivos binários bsp que contém a efemérides de objeto.

O AstDyS disponibiliza as informações dos elementos orbitais e posições astrométricas de um objeto em arquivos ascii, enquanto que, o MPC os mostra num site (formato HTML) criado temporariamente (deletado automaticamente após alguns minutos) depois da consulta ser feita. O número de consultas no MPC, feito num intervalo curto de tempo, tem um limite devido que uma URL é criada para cada consulta, e se esse limite for excedido, o acesso ao MPC será bloqueado para a IP da máquina (e de toda a rede dele) onde foi feito a consulta.

O AstDyS é consultado primeiro, se os dados do objeto ainda não estiverem no seu banco de dados¹⁴, procura-se então no banco de dados do MPC, e para isso usamos BeautifulSoup¹⁵ que é uma biblioteca do Python para extrair dados de sites com formatos HTML e XML.

Novas posições são registradas com regular frequência no MPC, por tal motivo foi necessário programar um processo de atualização automática uma vez por mês para levar em conta estes novos dados e neste caso uma notificação seria enviada à componente de refinamento de órbita para informar que é necessário fazer uma nova determinação da órbita.

O estado (posição e velocidade em função do tempo) de um objeto do Sistema Solar é obtido usando o serviço do JPL. O componente de refinamento de órbita usa esta informação para comparar com a efeméride refinada e assim saber de quanto é a melhoria na determinação da órbita. O JPL atualiza com certa frequência as efemérides dos objetos e, portanto, foi definido também um processo de atualização cada dois meses.

O número/nome do objeto e um intervalo de datas de referência para as efemérides são as principais entradas deste componente, e o resultado por objeto são três arquivos, dois em formato ASCII com as informações das posições astrométricas e dos elementos orbitais e um arquivo em formato binário com o estado do objeto. Estes arquivos obtidos são armazenados nas máquinas locais do LIneA.

Este componente foi paralelizado para reduzir o tempo de download dos dados, e assim é possível baixar os dados de vários objetos simultaneamente.

¹⁴Pode acontecer com os objetos recentemente descobertos, devido que é necessário um procedimento de registro, que poderia levar desde alguns dias até alguns meses.

¹⁵<https://www.crummy.com/software/BeautifulSoup/bs4/doc/>

5.8.2 Componente: Refine Orbit

O objetivo desta componente é refinar a órbita dos objetos do Sistema Solar, usando como entrada principal o resultado da componente anterior e as posições astrométricas determinadas a partir de novas observações.

Tivemos algumas dificuldades na implementação do NIMA na plataforma do LIneA, devido à dependência do software inkscape (editor de gráficos vetoriais). O problema é a alta demanda de uso de recursos gráficos para uma tarefa relativamente simples (conversão de formato de imagem vectorial para pdf/png). Para fazer o encapsulamento num contêiner de maneira eficiente é necessário que os códigos e as dependências respectivas demandem a menor quantidade de recurso possível. Para resolver esta dificuldade analisei o código NIMA e passei para Python as rotinas do NIMA que geram os gráficos, usando a biblioteca *matplotlib*¹⁶ para fazer os gráficos e salvá-los diretamente em formatos de imagens pdf e/ou png. Dessa maneira foi possível evitar a dependência do inkscape.

O tempo médio para refinar a órbita de um objeto é de aproximadamente um minuto e como este pipeline também foi paralelizado, podemos refinar simultaneamente as órbitas de 100 objetos nesse mesmo tempo no caso de ter a mesma quantidade de núcleos disponíveis.

5.8.3 Input/output do pipeline

A entrada principal para este pipeline é uma lista de objetos, as quais tem posições astrométricas determinadas a partir de novas observações. Estas posições podem ser obtidas usando o pipeline de astrometria (seção anterior) ou determinadas externamente, levando em conta as informações requeridas.

¹⁶<https://matplotlib.org/>

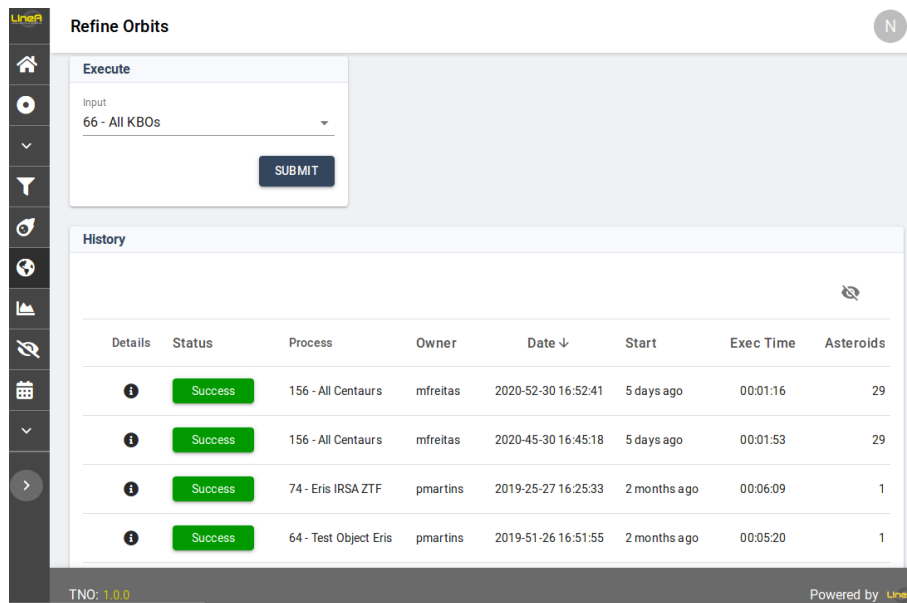


Figura 5.16: Seleção da lista de objetos (Input) do pipeline de refinamento de órbita, mostrando também o histórico dos processos.

O Resultado principal deste pipeline é um arquivo binário (formato bsp) que contém os coeficientes do polinômio de Chebyshev (representação matemática dos dados da efemérides) de um objeto do Sistema Solar.

A figura 5.17 mostra a lista de arquivos de entrada/saída do NIMA. A componente Get object data se encarrega de obter três dos arquivos de entrada (observations, orbital_parameters, bsp_jpl), enquanto que, o pipeline de astrometria fornece um arquivo com as posições determinadas (astrometry). É necessário também um arquivo de configurações (nima_config) com os parâmetros de entrada para o NIMA. A seguir mencionamos alguns deles.

- Path do diretório onde estão armazenados os arquivos de entrada.
- Número e nome do objeto do Sistema Solar.
- Passo em dias para calcular os coeficientes do polinômio de Chebyshev.
- Data inicial e final para a determinação da efemérides do objeto.

Todos os parâmetros de entrada já foram pré-definidos, no entanto, têm parâmetros (por exemplo, o número/nome do objeto) que são re-definidos automaticamente, e os dados de entrada/saída são gerenciados pela aplicação web.

Inputs				Results		
Inputs ↑	Source	Date	Filename	Name ↑	Size	Type
astrometry		2019/09/23	1999RB216.txt	1999RB216_nima.bsp	1.2 MB	.bsp
bsp_jpl	JPL	2019/09/17	1999RB216.bsp	Cl_ast.dat	666 Bytes	.dat
nima_config		Invalid date	input.txt	correl.mat	612 Bytes	.mat
observations	AstDys	2019/09/23	1999RB216.rwo	cov.mat	972 Bytes	.mat
orbital_para...	AstDys	2019/09/23	1999RB216.eq0	diff_bsp-ni.png	117.2 kB	.png
				diff_nima_jpl_Dec.png	140.5 kB	.png

TNO: 1.0.0 Powered by LineAR

Figura 5.17: Lista de arquivos de entrada (Inputs) para refinar a órbita do TNO 1999 RB₂₁₆ e lista de arquivos obtidos (Results).

A figura 5.18 mostra alguns dos gráficos resultantes para o TNO 1999 RB₂₁₆.

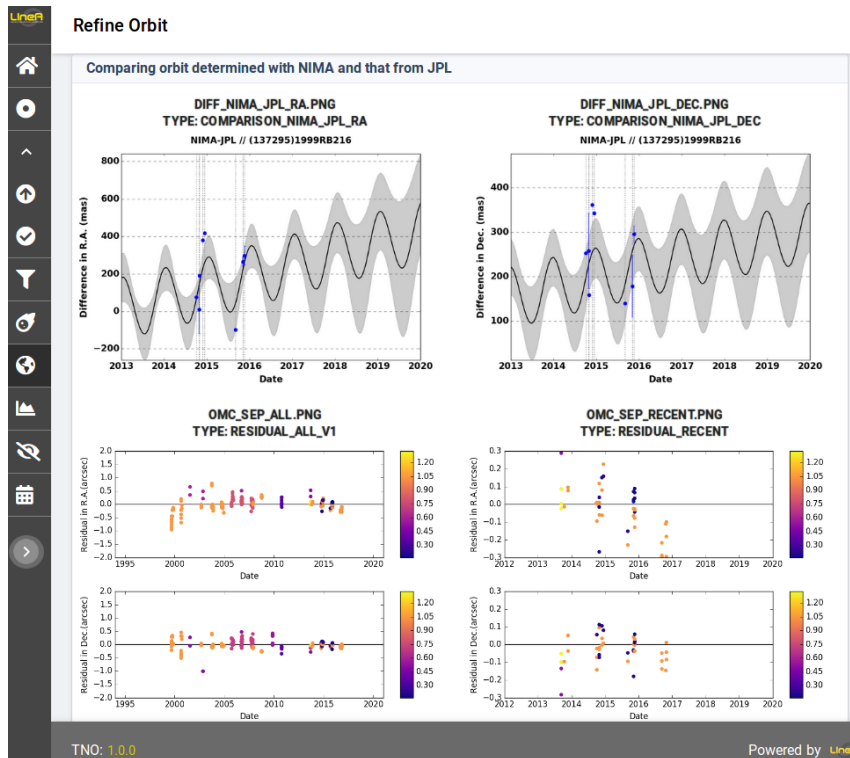


Figura 5.18: Visualização dos gráficos resultantes do processo de refinamento de órbita do objeto 1999 RB₂₁₆.

5.9 Pipeline predição de ocultações

Este pipeline faz predições de eventos de ocultações estelares por pequenos corpos do Sistema Solar usando como entradas principais a órbita refinada dos objetos, resultado do pipeline refinamento de órbita (seção anterior), e posições estelares obtidas a partir do catálogo Gaia DR2.

A figura 5.19 mostra o fluxograma deste pipeline com seus componentes e as respectivas entradas e saídas, e o produto final são os mapas de predições de ocultações estelares.

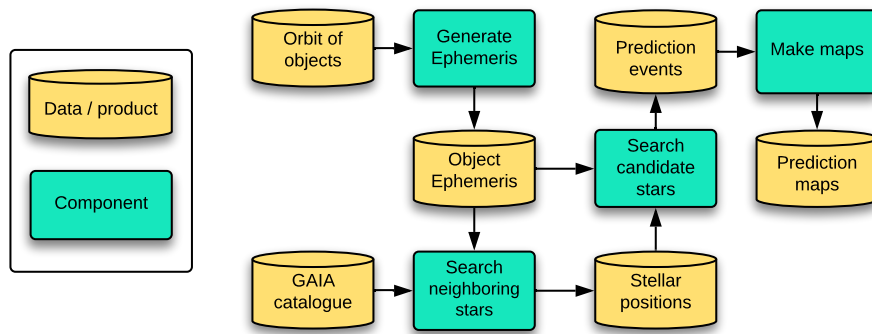


Figura 5.19: Fluxograma da predição de ocultação estelar por objetos do Sistema Solar.

A figura 5.20 é a interface gráfica principal do pipeline predição de ocultações. Na parte superior está a definição ou seleção dos parâmetros de entrada, e na parte inferior está o histórico dos processos. Segue uma breve descrição dos principais parâmetros de entrada.

Input: Define a lista de objetos, cujas órbitas foram refinadas, para fazer predições de ocultações estelares por eles.

Catalog: Define o catálogo estelar de referência (tendo como padrão ao Gaia DR2).

Leap Second: Parâmetro para atualizar a informação do leap second¹⁷ quando for necessário.

BSP Planetary: Define a efeméride planetária a ser usada (tendo como padrão a DE435).

Catalog Radius: Define o raio, em graus, da região circular ao longo da trajetória do objeto para procurar estrelas candidatas a serem ocultadas.

Ephemeris step: Define o passo no tempo, em unidades de segundos, para determinar as posições dos objetos. No caso dos objetos distantes como Centauros e TNOs este parâmetro poderia ser definido como 10 minutos (600 segundos, como mostrado na interface), mas no caso de objetos mais próximos da Terra (exemplo: asteroides do cinturão principal) este parâmetro tem que ser menor, o valor recomendado é de 1 minuto.

¹⁷Ajuste de 1 segundo aplicado ocasionalmente ao Tempo Universal Coordenado (UTC) para que a hora do dia se mantenha próxima do Tempo Universal (UT1).

Ephemeris Initial Date: Data de referência de início das efemérides do objeto.

Ephemeris Final Date: Data de referência para a finalização das efemérides.

Status	Process	Owner	Date ↓	Start	Execution Time	Asteroids
Success	112 - All Centaurs 2016	gverde	2019-04-08 18:04:47	10 days ago	00:40:57	101
Success	2 - Test Object Eris	mfreitas	2019-04-18 14:34:09	a month ago	00:01:25	1
Success	32 - Test Astrometry Co...	mfreitas	2019-13-16 12:13:55	a month ago	00:01:52	1
Failure	33 - Test Astrometry	mfreitas	2019-12-16 12:12:53	a month ago	00:00:11	1

Figura 5.20: Interface gráfica da etapa de predição de ocultação. A seleção/definição dos parâmetros de entrada são mostradas no painel superior, enquanto que a informação do histórico dos processos é mostrado no painel inferior. As unidades dos parâmetros “Catalog Radius” e “Ephemeris Step” são segundos de arco e segundos respectivamente.

A maioria dos parâmetros de entrada tem valores predefinidos para que o usuário possa selecionar uma delas dependendo da análise a fazer. A plataforma tem processos de atualizações dependendo da liberação de novas versões (por exemplo: catálogo Gaia DR3, leap second, etc.).

Este pipeline é composto por alguns componentes para a preparação dos dados de entrada e o procedimento de busca dos eventos e a geração de mapas de ocultações estelares. Cada componente foi paralelizado internamente. Segue a descrição dos componentes deste pipeline.

5.9.1 Componente: Generate ephemeris

Este componente é encarregado de gerar as efemérides de objetos do Sistema Solar, num certo intervalo de tempo, a partir de arquivos binários (bsp) gerados pelo pipeline de refinamento de órbita (seção anterior).

Este componente foi desenvolvido usando a biblioteca do Python, *Spiceypy* (ANNEX, 2017). Segue uma breve descrição dos arquivos de entrada deste pipeline.

Datas: É um arquivo com as datas de referência para a determinação das posições dos objetos. Os parâmetros para a determinação deste arquivo são definidos na interface (ephemeris Initial Date, Ephemeris Final Date, Ephemeris step, leap second).

Efemérides do objeto: É um arquivo binário (bsp) gerado como resultado do processo de refinamento de órbita. Este componente está implementado para usar os arquivos bsp do JPL no caso de não ter um processo prévio de refinamento de órbita¹⁸.

Efemérides planetária: É também um arquivo binário (bsp) com informação para a determinação das posições dos planetas. As diversas versões são disponibilizadas em: https://naif.jpl.nasa.gov/pub/naif/generic_kernels/spk/planets/

Leap Second: Arquivo ascii com a informação de todos os ajustes dos segundos adicionais aplicados. A decisão de inserir um leap second é normalmente anunciada com seis meses de antecedência pelo *International Earth Rotation and Reference Systems Service*¹⁹ (IERS). Este arquivo pode ser obtido a través de: https://naif.jpl.nasa.gov/pub/naif/generic_kernels/lsk/

O resultado deste componente é um arquivo ascii com os seguintes parâmetros:

- Instante de tempo UTC.
- Ascensão reta em horas, minutos e segundos.
- Declinação em graus, minutos e segundos.
- Distância geocêntrica em quilômetros.
- Ângulo de elongação em graus, é a separação angular entre o Sol e o objeto, com a Terra como ponto de referência.

5.9.2 Componente: Search neighboring stars

Este componente é encarregado de procurar estrelas na vizinhança da órbita de um objeto do Sistema Solar a partir do catálogo estelar Gaia.

A seguir os parâmetros de entrada deste componente.

¹⁸Isto só poderia acontecer quando for necessário fazer predição de ocultação por um objeto que não foi detectada nas imagens, e portanto não poderia ser feito o refinamento de órbita.

¹⁹https://www.iers.org/IERS/EN/Home/home_node.html

- Um arquivo com posições de um objeto (RA, Dec.) para cada instante em um certo intervalo de tempo (resultado do componente Generate ephemeris).
- Definição de um raio r , em graus, de regiões circulares centradas em posições específicas da órbita. Este parâmetro define a área de procura de estrelas usando o catálogo Gaia DR2.

As coordenadas dos centros dos círculos são selecionadas comparando a distância angular entre duas posições consecutivas do objeto e o raio do círculo. Se essa distância angular for por exemplo $2r$ teremos dois círculos tangentes, e nesse caso algumas estrelas fora dos círculos e perto do ponto de tangência estariam sendo excluídas. Definimos um valor adequado da distância angular ($< 2r$), de tal maneira que as estrelas perto da fronteira dos círculos sejam consideradas e também não ter muitas estrelas na interseção dos círculos.

A figura 5.21 mostra as estrelas que foram encontradas na vizinhança da órbita do TNO 1999 RB₂₁₆. A região não coberta é devido que as estrelas só poderiam ser observadas durante o dia (ângulo de elongação $< 30^\circ$).

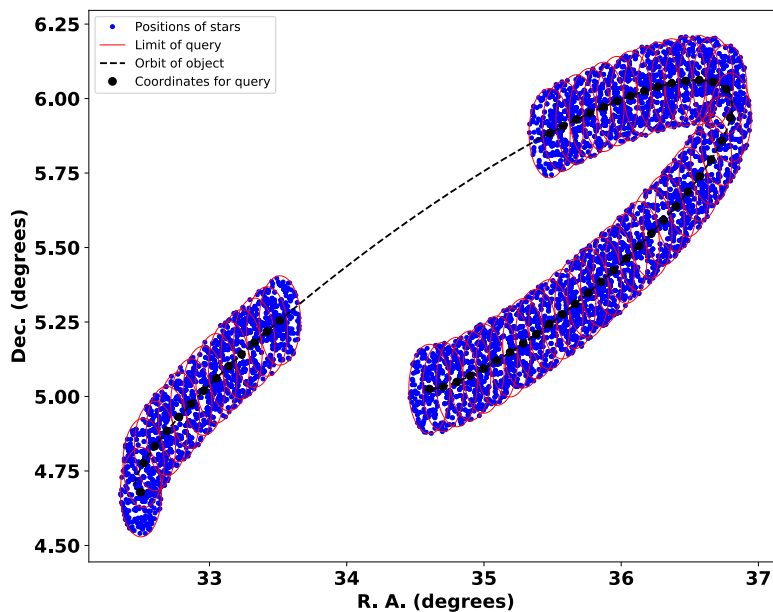


Figura 5.21: Estrelas encontradas (pontos azuis) na vizinhança de uma parte da órbita do objeto 1999 RB₂₁₆ (linha tracejada preta), mostrando também o FoV de referência (círculos vermelho) para a busca de estrelas.

O resultado deste componente é um arquivo ascii com informações de estrelas que se encontram na vizinhança da órbita de um objeto do Sistema Solar. A seguir apresentamos os principais parâmetros deste arquivo resultante.

- Ascensão reta (baricêntrica) e a respectiva incerteza em unidades de horas e graus respectivamente.

- Declinação (baricêntrica) e a respectiva incerteza, ambos em graus.
- Movimento próprio em direção a RA. e Dec. e as respectivas incertezas, todos em graus/ano.

5.9.3 Componente: Search candidate stars

Este componente procura estrelas candidatas a serem ocultadas por pequenos corpos do Sistema Solar. Ele gerencia as execuções dos códigos *PRAIA occultation* e *makeMap.py* (descritos no capítulo 3) para procurar as estrelas candidatas e fazer os mapas de predição de ocultação estelar respectivamente.

Os resultados dos dois componentes prévios (uma efeméride planetária e um catálogo com posições e movimentos próprios estelares) são os principais dados de entrada para o *PRAIA occultation* e o resultado obtido é fornecido para o *makeMap* para fazer os mapas de predições.

A figura 5.22 mostra a estatística do processo de predição de eventos de ocultações estelares. Nesta figura podemos observar as informações básicas da execução (painel superior esquerda), a distribuição do tempo de execução total (painel inferior direito) e por objetos (painel superior direito) de cada componente, e o estado das execuções do pipeline para uma lista de objetos (painel inferior direito).

Só foi feita a predição para 129 objetos de um total de 439 TNOs detectados nas imagens CCDs do DES. A razão principal dos outros 310 TNOs não terem predições é devido ao fato de que o processo de astrometria nem sempre gera resultados (poucas imagens, grande incerteza da posição das efemérides JPL). Para uma correta informação estatística estamos modificando a forma como é selecionada a lista de objetos de entrada para fazer a predição considerando só aqueles que tem órbitas refinadas.

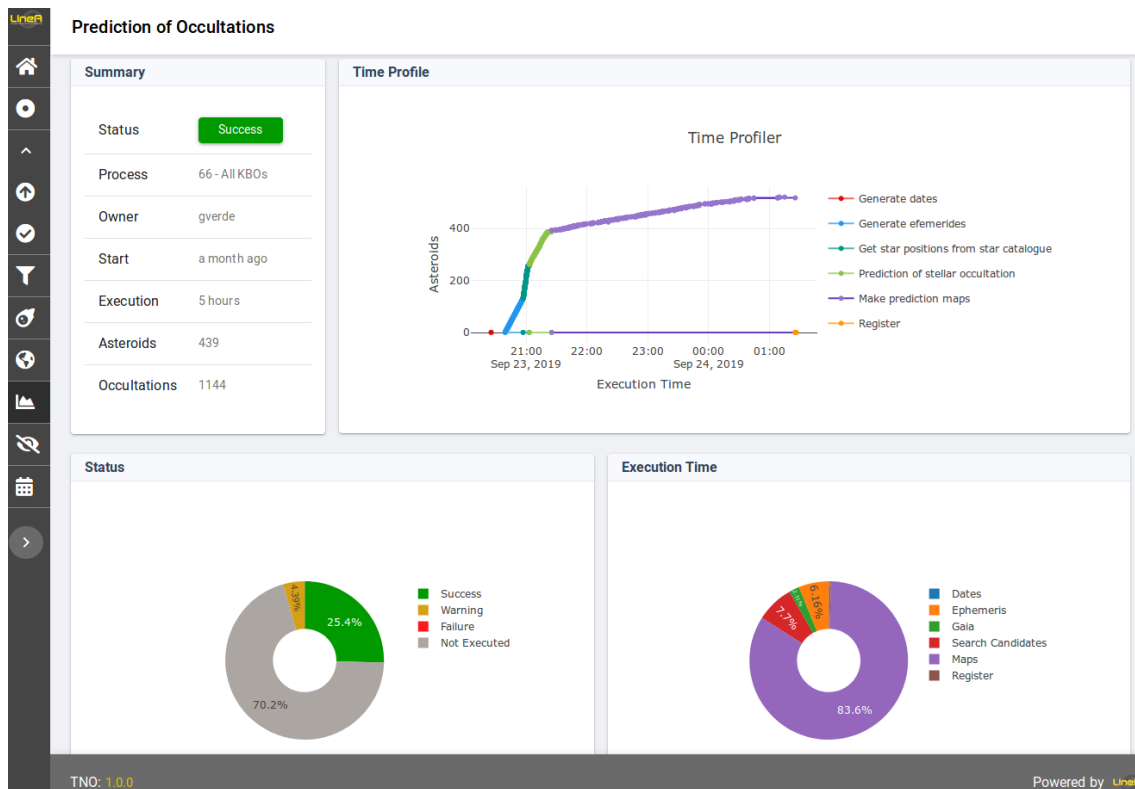


Figura 5.22: Estatística do processo de previsão de ocultação estelar por TNOs com órbitas refinadas.

A figura 5.23 mostra o resultado do componente Search candidate stars. Uma tabela (painel inferior) com as informações do evento, da estrela candidata e do objeto é o resultado principal. A figura 5.24 mostra os mapas de ocultação estelar (um mapa por cada linha da tabela).

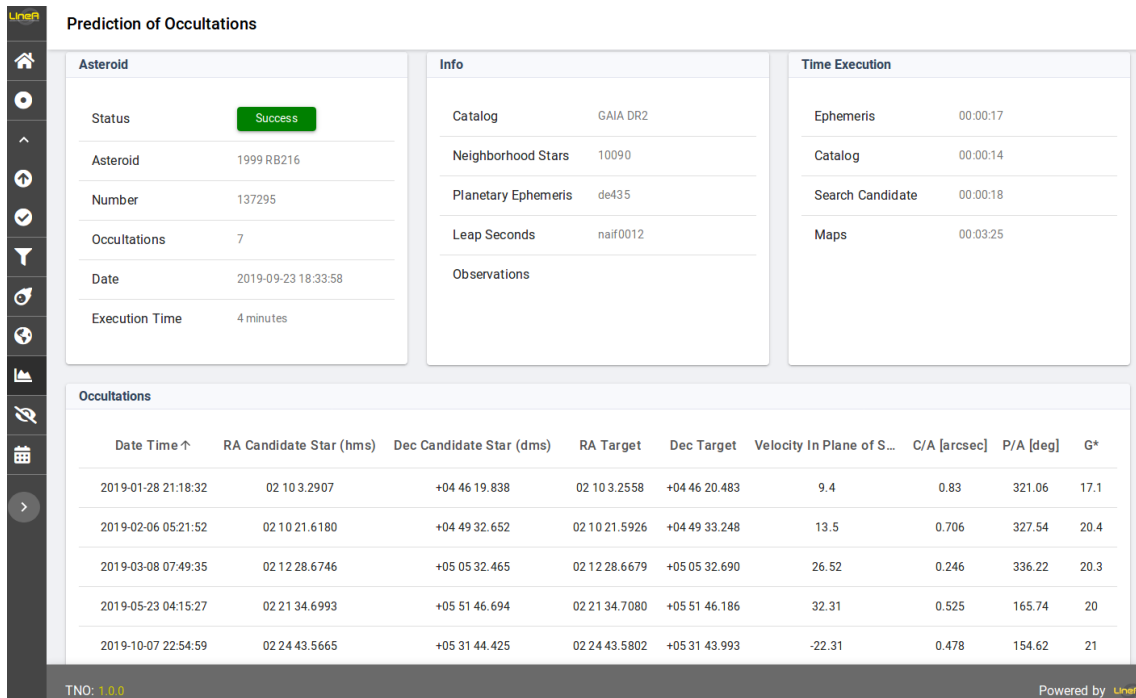


Figura 5.23: Resultado do componente Search candidate stars para o TNO 1999 RB₂₁₆.

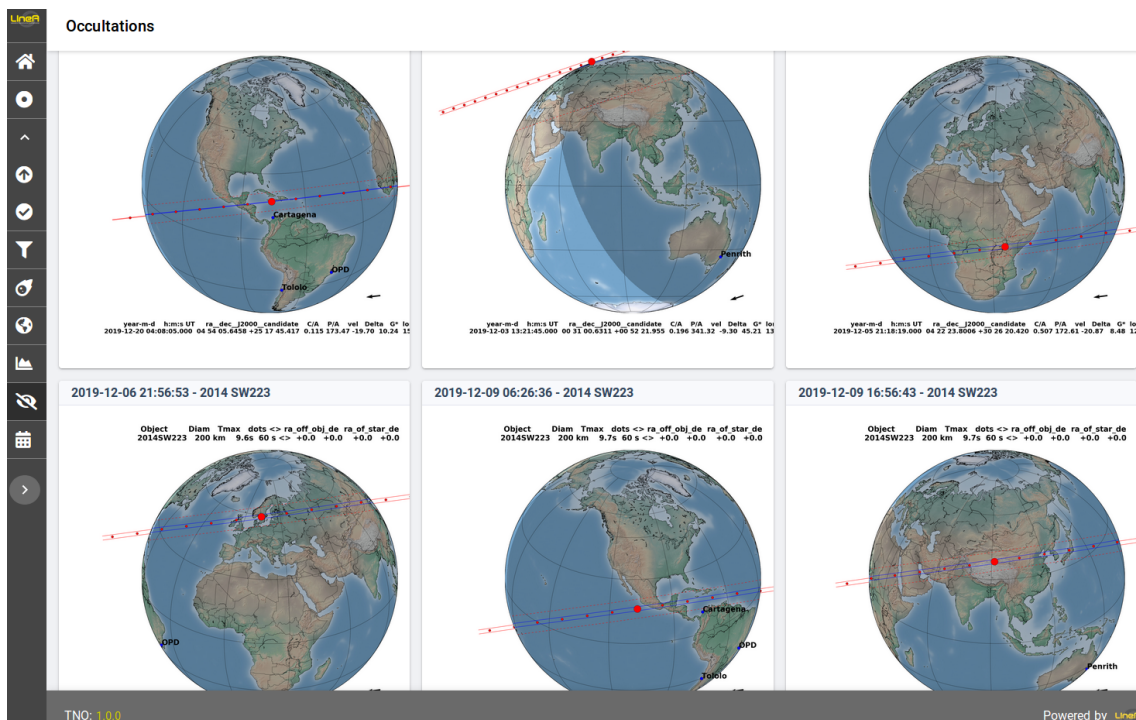


Figura 5.24: Mapas de previsão de ocultação estelar por alguns TNOs.

Capítulo 6

Exploração dos dados fotométricos do DES - possíveis contribuições ao estudo de pequenos corpos

O DES é um levantamento fotométrico e alguma exploração dessas medidas é natural. Eles complementam e são complementados por informações provenientes de ocultações na caracterização física de pequenos corpos. Um exemplo disso é a determinação do albedo (geométrico) a partir da magnitude absoluta e do conhecimento do diâmetro do corpo.

Fotometria multibanda é um dos recursos mais relevantes e comuns para o estudo de pequenos corpos do Sistema Solar, principalmente os mais distantes e tênues, pouco acessíveis por outras técnicas (por exemplo, espectroscopia). É a partir de tais recursos que informações sobre propriedades superficiais e rotacionais desses corpos são mais abundantemente conhecidas. O interesse no potencial fotométrico do DES no estudo de pequenos corpos é, portanto, natural e nos permite aproveitar de forma mais completa a contribuição que o levantamento oferece a esses estudos.

A determinação das propriedades, tais como tamanho e albedo, são fundamentais para vincular composição e estrutura interna, e assim poder estimar a massa total e distribuição de tamanhos no cinturão de Kuiper (e.g. GRUNDY *et al.*, 2005).

A partir do levantamento DES, medidas fotométricas em até 5 bandas – g, r, i, z, Y – foram irregularmente obtidas ao longo de seus seis anos de observação. Em nosso caso, registros nas quatro primeiras bandas foram feitos para TNOs e Centauros. Uma descrição do processamento de imagens e determinação de magnitudes é descrito em Morganson *et al.* 2018 (*The Dark Energy Survey Image Processing Pipeline*). É importante ressaltar também que uma característica importante dessas medidas é que elas provêm de um mesmo instrumento e passaram por um mesmo e bem definido processo de redução como descrito por MORGANSON *et al.* (2018).

Um ponto de partida importante neste trabalho, tendo em conta o espaçamento longo entre as observações, é a obtenção da magnitude absoluta. Ela é importante para, entre outros, a obtenção de índices de cor.

A magnitude absoluta H pode ser dada por (HUGHES, 2003).

$$H = m - 5 \log R\Delta + 2,5 \log \phi(\alpha), \quad (6.1)$$

onde m é a magnitude aparente na data da observação, R é a distância heliocêntrica do objeto, Δ é a distância geocêntrica do objeto e $\phi(\alpha)$ é a função de fase tal que, para $\alpha = 0^\circ$ (oposição), $\phi(0) = 1$. H é a magnitude observada com $\alpha = 0^\circ$ e $R = \Delta = 1 \text{ au}$. O termo $(m - 5 \log R\Delta)$ será denominado *magnitude reduzida* e indicado por $M(1, 1, \alpha)$.

Ocultações estelares podem determinar, com precisão quilométrica, forma e dimensão projetados no plano do céu do corpo ocultador. Junte-se a isto, poder-se demonstrar que¹

$$D = \frac{2 \text{ au} \times 10^{0,2(m_{Sol}-H)}}{\sqrt{\rho}}, \quad (6.2)$$

onde D é o diâmetro efetivo do corpo, m_{Sol} é a magnitude do Sol numa dada banda, H é a magnitude absoluta do corpo na mesma banda, ρ é o albedo geométrico também na mesma banda e au é a unidade astronômica em km (149.597.870,7 km). Ou seja, diâmetros e magnitudes absolutas precisos levam a albedos precisos. Se considerarmos a banda V e a magnitude aparente do Sol nela ($m_{Sol} = -26,74$), chega-se na conhecida relação (D em km).

$$D = \frac{1342,627 \times 10^{-0,2H_V}}{\sqrt{\rho_V}}. \quad (6.3)$$

Uma hipótese simples sobre a equação 6.3 nos dá uma informação bastante relevante. Essa hipótese é que a magnitude absoluta H_V é obtida com precisão suficiente para que a incerteza no diâmetro (albedo) pode ser determinada a partir da incerteza no albedo (diâmetro) apenas. Isso é razoável se pudermos falar de objetos com magnitudes bem determinadas. Nesse caso, a incerteza no valor do albedo é dado por

$$\sigma_{\rho_V} = \frac{2 \times 1342,627^2 \times 10^{-0,4H_V}}{D^3} \sigma_D \quad (6.4)$$

ou, escrito de outra forma,

$$\frac{\sigma_{\rho_V}}{\rho_V} = 2 \frac{\sigma_D}{D}. \quad (6.5)$$

Portanto, o erro relativo do albedo é o dobro do erro relativo do diâmetro. Isto

¹Veja, por exemplo, <https://mathscinotes.com/wp-content/uploads/2016/08/Jackpot.pdf>, seção 4.2.

quantifica a importância na determinação de diâmetros precisos e ressalta a importância dos resultados oriundos das ocultações estelares.

Um ponto relevante a ser levado em conta também é a busca de correlações entre índices de cor e elementos orbitais para TNOs e Centauros. Tais correlações são peças importantes para modelos de evolução dinâmica do Sistema Solar, pois apontam para as regiões nas quais esses objetos foram formados (por exemplo, MARSSET *et al.*, 2019).

6.1 Fotometria oriunda do DES

Uma boa exploração dos dados fotométricos do DES inclui a determinação de período rotacional, magnitude absoluta e inclinação de fase². Para o cálculo destas duas últimas, por exemplo, é necessário que o efeito de rotação seja levado em conta.

Dos três elementos, o período rotacional é, aqui, o mais difícil de se lidar. Adiantamos, desde já que, por essa dificuldade, ele foi o último ao qual demos atenção neste trabalho e carece de um estudo mais aprofundado. A dificuldade em sua determinação vem do número reduzido de medidas. Nossa estratégia para resolver isso foi usar observações em diferentes filtros. De todo modo, não compensamos as outras medidas pelo efeito da rotação.

Índices de cor são importantes para exploração e avaliação da fotometria do DES. Esses índices são comumente obtidos a partir de observações próximas no tempo, de forma que a cor determinada venha da mesma face do corpo. Dada a cadência observacional dos objetos em estudo, isso não é assegurado. Assim, pareceu-nos mais razoável obter cores a partir das magnitudes absolutas.

BANDA-HUARCA *et al.* (2019) computa, para cada objeto considerado neste trabalho, as bandas nas quais o objeto possui magnitude bem como o número de medidas feitas em cada uma delas. Vale lembrar também que os autores distribuíram os objetos em tabelas com a classificação *principal*, *extensão* e *duvidosa* (ver capítulo 4). Essa classificação aponta, em ordem decrescente, a qualidade da astrometria obtida bem como a confiabilidade da correta detecção do objeto.

Neste capítulo, consideraremos apenas a fotometria daqueles objetos para os quais ao menos 3 observações em cada uma das bandas g , r , i , z estejam presentes. Apesar disso limitar o número de objetos com o qual trabalharemos, permitirá que efetueemos para todos eles estudos baseados em três cores.

A exploração fotométrica aqui apresentada não tem a intenção de ser completa e sim avaliar o potencial das medidas através de diferentes abordagens. De toda forma, os resultados aqui apresentados servem como uma aproximação do que poderemos

²Comportamento da magnitude reduzida como função do ângulo de fase - ângulo Sol-alvo-observador.

obter com o conjunto completo - 6 anos - de observações.

6.1.1 Rotação

Uma pergunta que podemos fazer é porquê conseguimos perceber a rotação dos pequenos corpos. Se fossem perfeitamente esféricos e sua superfície fosse homogênea, refletindo a luz igualmente em todas as direções, não poderíamos medir suas rotações (ao menos, por meio de técnicas fotométricas). Também teríamos dificuldades em perceber a rotação se o eixo de rotação coincidissem com a linha de visada.

No entanto, um formato não esférico, superfícies não homogêneas ou presença de companheira próxima (com plano orbital alinhado à linha de visada) provocariam variação do fluxo de luz refletida como função do tempo.

Como resumido por SHEPPARD *et al.* (2008), a distribuição rotacional dos TNOs é provavelmente função de seus tamanhos. A rotação dos grandes TNOs ($r > 100$ km) foi provavelmente herdada durante a formação do Cinturão de Kuiper. Ainda, a distribuição de formas dos TNOs pode também estar ligada à distribuição de seus tamanhos.

Em colaboração com o Dr. R. Bouffeur³, que vem liderando o desenvolvimento de algoritmos para a determinação dos períodos de rotação, adotamos a estratégia enumerada abaixo. As justificativas que levaram a ela são: observações que se estendem por um intervalo de 2–3 anos; o efeito do ângulo de fase sobre a magnitude pode mascarar o sinal da rotação, que não costuma ter uma amplitude maior que 0,5 mag; a metodologia convencional para correção do efeito do ângulo de fase (veja próxima seção) não foi suficiente para detectar rotações.

1. Para cada data de observação de um dado objeto, determinamos o ângulo de fase solar (ângulo Sol-objeto-observador). Se olharmos um gráfico desse ângulo como função do tempo, veremos sua variação periódica como função da órbita da Terra.
2. Da mesma forma, a magnitude reduzida ($M(1, 1, \alpha)$) é determinada para cada data.
3. Os dados observacionais no item 2 são utilizados como modelo para ajustar os dados gerados no item 1 (veja figura 6.1). Determinamos, a partir disso, uma curva dada pela diferença entre os dados observacionais e a curva de fase solar já ajustada. Com isso, levamos em conta o efeito da variação do ângulo de fase solar.

³Pós-doc ON.

4. A partir dessa curva dada pela diferença descrita acima, buscamos a presença de um sinal periódico. Para isso, comparamos os resultados das técnicas *Phase Dispersion Minimization* (PDM) e do periodograma de Lomb-Scargle. Encontrar o mesmo valor de período através de técnicas diferentes dá maior confiança na veracidade do sinal. Mesmo assim, pode ser necessária uma investigação mais detalhada para, por exemplo, desconsiderar um harmônico do sinal principal.

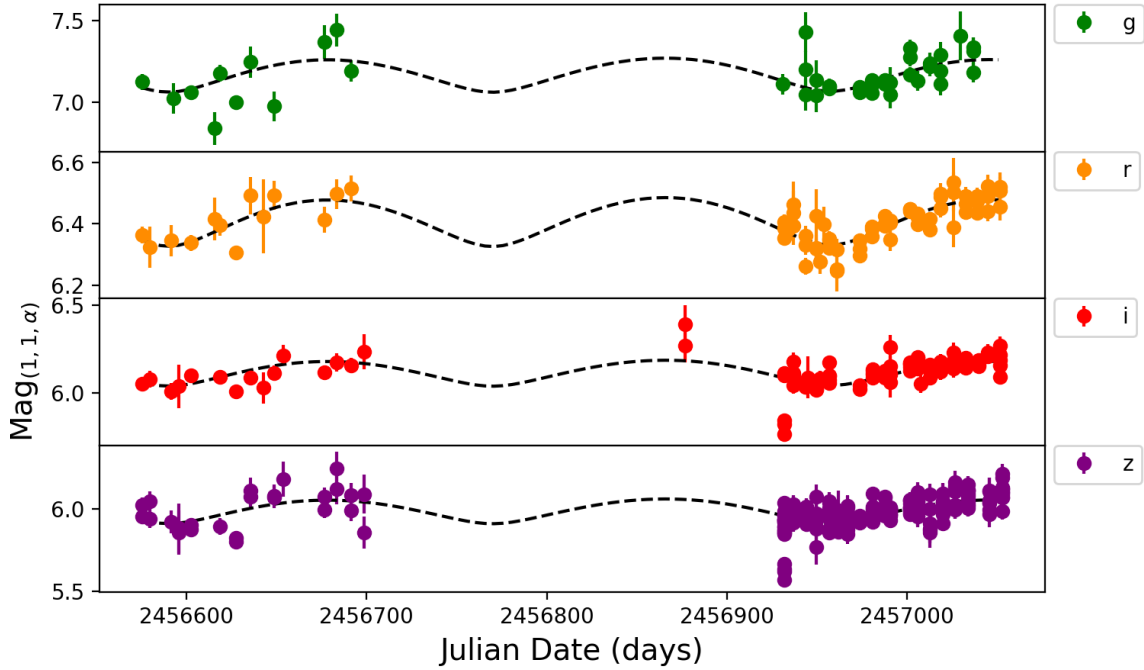


Figura 6.1: Variação da magnitude reduzida (símbolos coloridos) como função do tempo. Parte dessa variação é conseqüência da evolução do ângulo de fase. A linha tracejada é obtida teoricamente, a partir da efeméride do objeto, e representa a evolução do ângulo de fase como função do tempo. Essa evolução é ajustada sobre os valores da magnitude reduzida para destacar sua influência sobre essas magnitudes e corrigí-las antes de procurarmos variações devidas à rotação.

A seguir, descrevemos brevemente ambos Lomb-Scargle (SCARGLE, 1982) e PDM (STELLINGWERF, 1978).

Periodograma de Lomb-Scargle

A transformada discreta de Fourier, seguindo a mesma notação de SCARGLE (1982) é uma ferramenta básica para análise espectral. Essa transformada é dada por

$$FT_X(\omega) = \sum_{j=1}^{N_0} X(t_j) \exp(-i\omega t_j), \quad (6.6)$$

onde $X(t_j) = X_s(t_j) + R(t_j)$, ou seja, a combinação de um sinal periódico (X_s) com um ruído randômico. Assim, o periodograma é convencionalmente dado por

$$P_X(\omega) = \frac{1}{N_0} |FT_X(\omega)|^2. \quad (6.7)$$

Nesse periodograma, quando X contém um sinal sinusoidal de frequência ω_0 , a contribuição dos termos $X(t_j)$ e $\exp(-i\omega t_j)$ ao somatório será grande para frequências ω próximas a ω_0 (os fatores $X(t_j)$ e $\exp(-i\omega t_j)$ estarão em fase para frequências nas vizinhanças de ω_0). Vale também notar que a equação 6.7 pode determinar qualquer valor de frequência e é aplicável para dados não equiespaçados.

SCARGLE (1982) propõe uma nova definição, dada a seguir, de periodograma:

$$P_X(\omega) = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\left[\sum_j X_j \cos \omega(t_j - \tau) \right]^2}{\sum_j \cos^2 \omega(t_j - \tau)} + \frac{\left[\sum_j X_j \sin \omega(t_j - \tau) \right]^2}{\sum_j \sin^2 \omega(t_j - \tau)} \right\}, \quad (6.8)$$

onde τ é definido como

$$\tan(2\omega\tau) = \frac{\sum_j \sin 2\omega t_j}{\sum_j \cos 2\omega t_j}. \quad (6.9)$$

Essa nova definição (equação 6.9) possui, como dado por SCARGLE (1982), duas vantagens sobre o periodograma original (equação 6.6): tem um comportamento estatístico simples e é equivalente ao ajuste, por mínimos quadrados, de uma função do tipo $X_f(t) = A \cos \omega t + B \sin \omega t$ aos dados ($X(t)$). Por comportamento estatístico simples, entende-se que a equação 6.9 possui a mesma distribuição exponencial de probabilidade caso os dados fossem equiespaçados.

Phase Dispersion Minimization

A técnica de PDM não assume um formato prévio para a modulação da variação temporal dos dados a serem analisados e também não exige que os dados sejam equiespaçados.

Ela está baseada na minimização da dispersão da variação dos dados com respeito a uma curva de luz média, segundo o procedimento descrito a seguir:

- Toma-se um vetor $\vec{\Pi}_i$ de períodos a serem testados.
- Particiona-se a distribuição temporal dos dados observados em $t \bmod \pi_i$ partições, onde t é a extensão temporal dos dados e π_i é um elemento de $\vec{\Pi}_i$.

- Superpõe-se as partições, como se o intervalo de aquisição dos dados fosse “dobrado” em fase. Divide-se essa fase em bins e calcula-se, para cada bin, o desvio padrão σ_B dos dados.
- Esse desvio padrão é comparado com aquele (σ_T) oriundo da totalidade dos dados. Busca-se, assim, o período que minimize a razão $\Theta = \sigma_B/\sigma_T$

Apresentamos, a seguir, dois casos de determinação de períodos - (534073) 2014 QL₄₄₁ e (437360) 2013 TV₁₅₈ - segundo os procedimentos descritos acima.

(534073) 2014 QL₄₄₁

O TNO (534073) 2014 QL₄₄₁ representa um caso para o qual o período de rotação nos parece confiável.

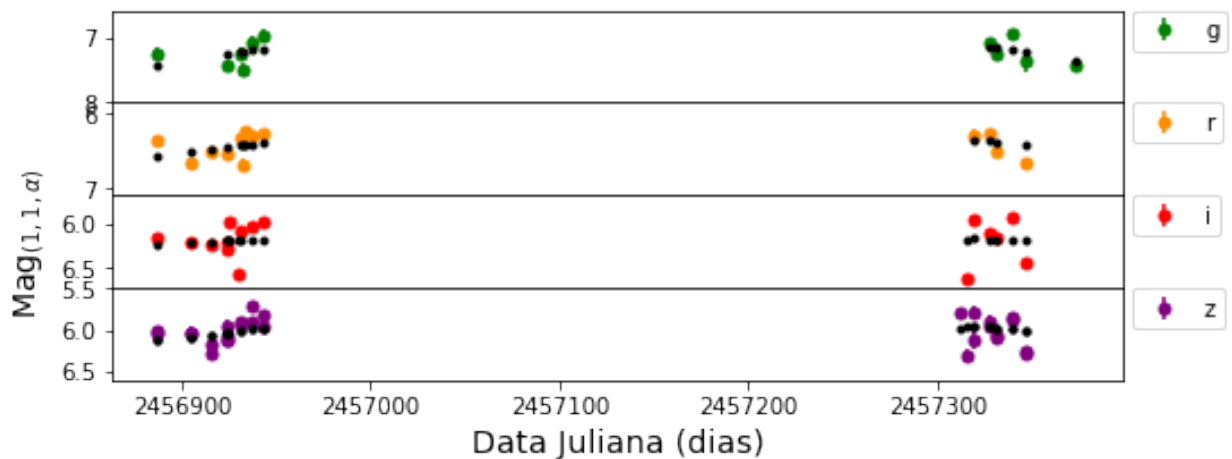


Figura 6.2: Distribuição temporal das magnitudes reduzidas do TNO 2014 QL₄₄₁ nos filtros g , r , i , z . Os pontos pretos representam a variação do ângulo de fase.

A figura 6.2 mostra, para diferentes filtros nos quais o objeto foi observado, a variação da magnitude reduzida como função do tempo. O ajuste da variação do ângulo de fase é representado pelos pontos pretos (sobrepsto). Esse ajuste (mínimos quadrados) possui duas variáveis: uma responsável por alterar a amplitude dessa variação e outra responsável por transladar essa variação ao longo do eixo das ordenadas. Como mencionado anteriormente, as diferenças entre as magnitudes reduzidas e os ângulos de fase geram a curva na qual o sinal de rotação é buscado.

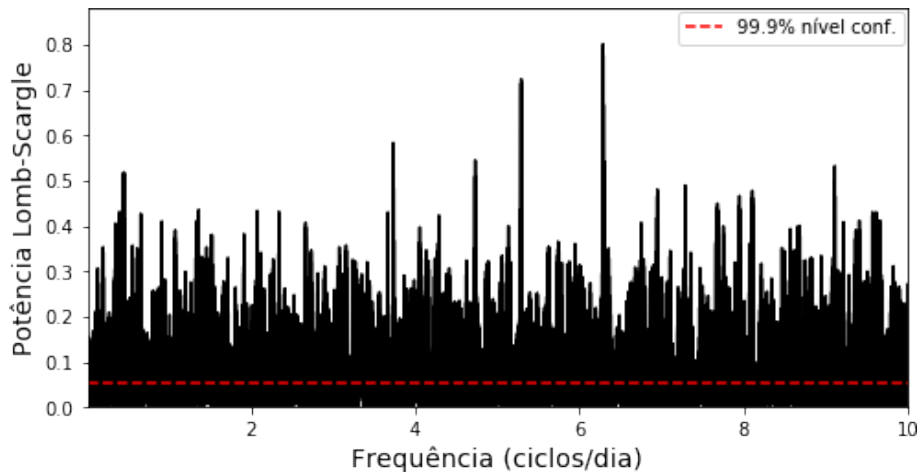


Figura 6.3: Potência Lomb-Scargle (equação 6.8) para o TNO 2014 QL₄₄₁. A linha tracejada vermelha mede o intervalo de confiança. Ela foi estimada usando 100 mil embaralhamentos ao longo do eixo “x”. A linha tracejada indica que a probabilidade de um ruído produzir um pico no periodograma acima desse limite é menor que 0,1%.

Harmônicos e combinações de harmônicos da frequência fundamental irão aparecer no periodograma acima da linha de detecção de falso alarme (figura 6.3). Esse tipo de efeito pode só ser reduzido aumentando-se o número de medidas para que a SNR da rotação seja maior e consequentemente o pico associado à frequência tenha mais potência.

As medidas que temos disponíveis do DES para fazer o estudo da presença de sinais de rotações apresentam algumas características que dificultam a sua análise:

1. O número de medidas é pequeno;
2. O sinal subjacente (rotação do objeto) tem SNR baixo e;
3. As medidas não são equiespaçadas.

O número baixo de medidas (item 1) faz com que, na presença de ruído e demais fontes de incerteza, se torne mais difícil de produzir a detecção de um sinal já por natureza tênue (item 2).

Com respeito ao item 3, que aborda o tema da irregularidade das observações, é ilustrativo utilizar a transformada de Fourier para compreender que medidas não equiespaçadas introduzem ruído no espectro de potência de um sinal. Em princípio todos os picos que poderiam originar-se da presença desse ruído foram estimados fazendo-se permutações das medidas e mantendo as janelas observadas. Um pico oriundo dessas permutações ultrapassa a linha pontilhada em menos de 1% das vezes. Isso indica que a probabilidade de falso alarme é pequena.

Como estamos fazendo uma varredura de frequências (e supondo aqui uma forma não exatamente senoidal para o sinal), em algum momento iremos acabar produzindo

algum ajuste para essas regiões de frequência (os sub-harmônicos) e, mesmo não sendo a frequência fundamental, estarão presentes e produzirão picos acima da linha que chamamos de probabilidade de falso alarme.

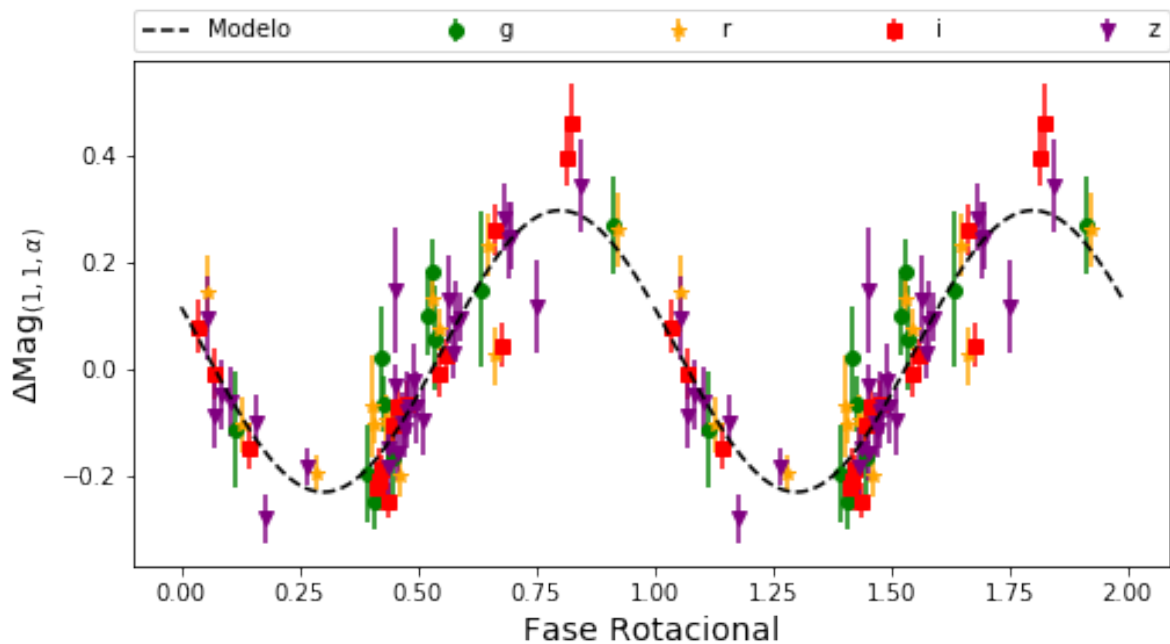


Figura 6.4: Fase rotacional do TNO 2014 QL₄₄₁. Frequência mais provável: 6,2869 ciclos/dia $\pm 0,0005$ (ou 3,8174 h $\pm 0,0003$ h).

A figura 6.4 mostra a determinação da frequência através do periodograma de Lomb-Scargle. Essa determinação é feita através da aplicação de uma grade de frequências na equação 6.8 e verificando-se o valor de $P_X(\omega)$ para cada valor ω de frequências determinada. Retém-se o maior valor de $P_X(\omega)$ (figura 6.3). Dezenas de milhares de frequências compõem essa grade e o valor obtido foi de 3.8174 h.

Uma medida importante a ser estimada é a probabilidade de que a frequência identificada no periodograma ocorra por acaso. Assim, para fornecer uma estimativa de probabilidade de falso alarme associada à frequência determinada, as magnitudes reduzidas são intercambiadas dezenas de milhares de vezes. Isto é, suas posições no eixo y são mantidas enquanto que suas posições no eixo x são alteradas. Para cada embaralhamento um periodograma é calculado. A proporção de recuperações sobre o total de intercâmbios representa essa probabilidade. Vale reforçar que esta é uma estimativa empírica, dentro de milhares de simulações, e mantém as características sistemáticas das medidas, a exemplo os efeitos da irregularidade temporal. No presente caso damos uma estimativa da probabilidade de falso alarme com confiança superior a 99%.

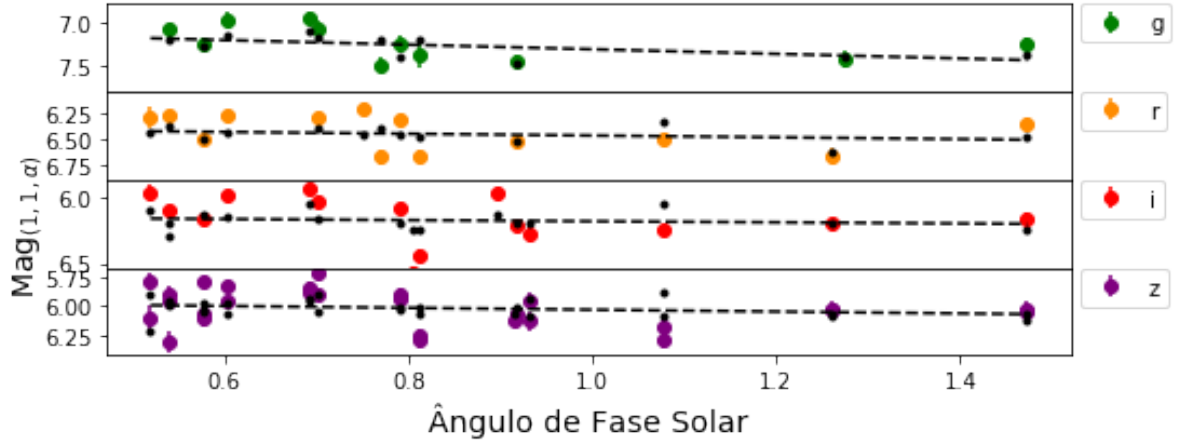


Figura 6.5: Magnitude reduzida como função do ângulo de fase solar TNO 2014 QL₄₄₁. Retirou-se o efeito da rotação. As cores dão as magnitudes reduzidas originais. Em preto, estão representadas estas mesmas magnitudes após a remoção do modelo rotacional construído a partir do período encontrado. A linha tracejada representa o modelo obtido de um ajuste linear para estimar os coeficientes H e β , mostrando a variação em mag/deg como função do ângulo de fase solar.

A figura 6.5 mostra o comportamento da magnitude reduzida como função do tempo. Nessa figura, a rotação do corpo foi descontada. Aqui, vale comparar os valores de magnitude absoluta obtido a partir do ajuste (linha tracejada) com aqueles computados na seção 6.1.2. Essa comparação pode ser vista na tabela 6.1. Nota-se, em particular, a discrepância entre os valores das inclinações de fase (β). É importante notar também que a correção pela rotação gerou magnitudes absolutas mais fracas que aquelas oriundas da não correção pela rotação.

Rotação considerada		Rotação não considerada		Filtro
H	β	H	β	
7,05 ($\pm 0,07$)	0,26 ($\pm 0,08$)	6,93 ($\pm 0,07$)	0,34 ($\pm 0,09$)	g
6,38 ($\pm 0,07$)	0,09 ($\pm 0,08$)	6,25 ($\pm 0,04$)	0,16 ($\pm 0,05$)	r
6,14 ($\pm 0,06$)	0,04 ($\pm 0,07$)	5,98 ($\pm 0,04$)	0,18 ($\pm 0,04$)	i
5,95 ($\pm 0,05$)	0,08 ($\pm 0,05$)	5,75 ($\pm 0,04$)	0,27 ($\pm 0,04$)	z

Tabela 6.1: Comparação entre magnitudes absolutas e inclinações de fase para o TNO 2014 QL₄₄₁, tendo ou não em conta a rotação do corpo.

A determinação do período do TNO em questão também foi determinado pela técnica de PDM (figuras 6.6 e 6.7).

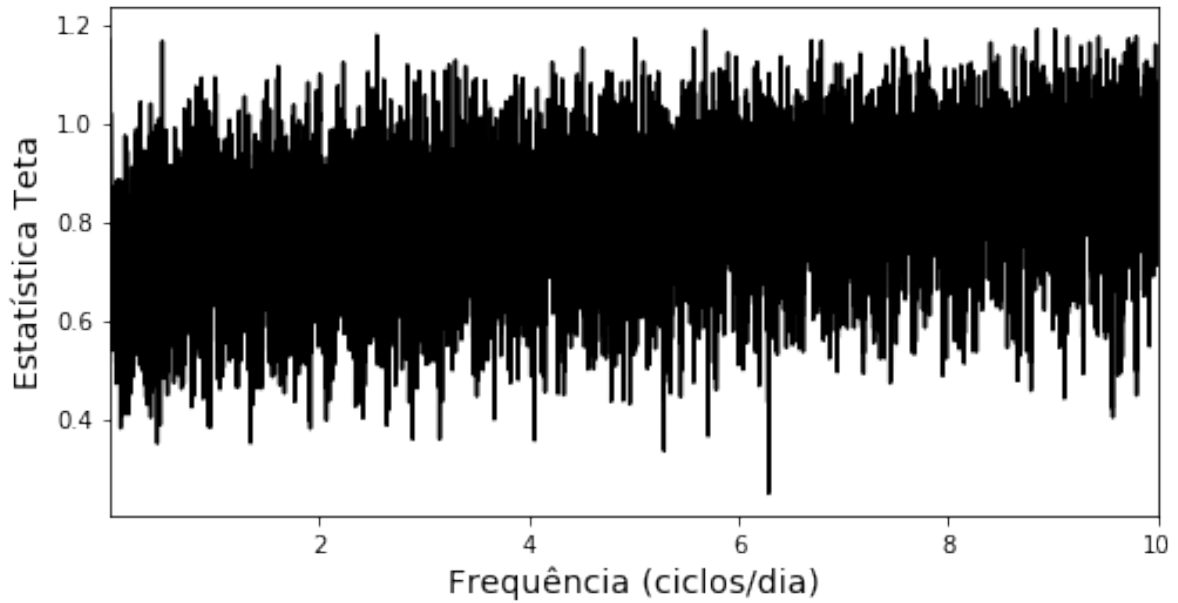


Figura 6.6: Estatística Θ para o TNO 2014 QL₄₄₁.

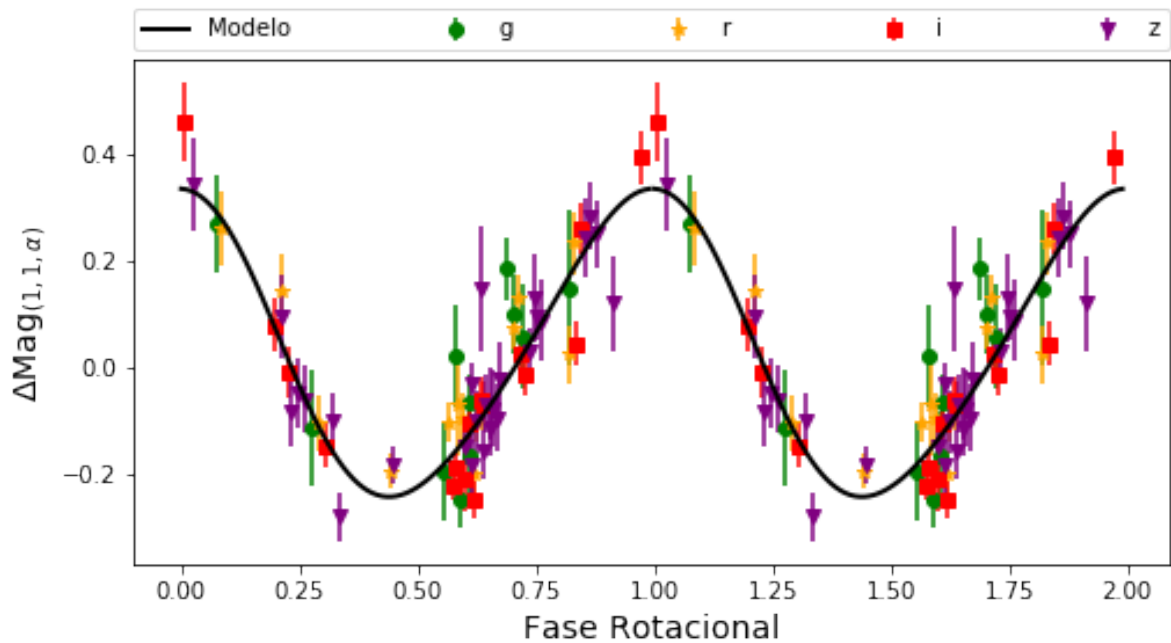


Figura 6.7: Fase rotacional do TNO 2014 QL₄₄₁. Frequência mais provável: 6,28698800 (ou 3,81740827 hs).

A diferença entre os períodos rotacionais determinados por ambos os métodos (Lomb-Scargle e PDM) é de 0,12 s.

Como destacado por SHEPPARD *et al.* (2008), a vasta maioria dos TNOs e Centauros possuem períodos rotacionais ao redor de 8,5 hs. (136108) Haumea possui uma rotação em torno de 4 hs, a mais rápida que se tem conhecimento para corpos com mais de 100 km (RABINOWITZ *et al.*, 2006). A ser confirmado esse período

rotacional através do total de 6 anos de observações do DES, 2014 QL₄₄₁ estará entre os TNOs com mais de 100 km com rotação mais rápida. Assumimos aqui que, tendo em conta distâncias transnetunianas, objetos com diâmetros menores que 100 km não foram observados pelo levantamento. Tal rotação poderia ser atribuída, por exemplo, ao histórico colisional do objeto.

(437360) 2013 TV₁₅₈

Este TNO é aquele que tem a maior quantidade de observações entre nossos dados, mas não conseguimos determinar um valor inequívoco para sua rotação. Abaixo, segue o que obtivemos utilizando Lomb-Scargle e PDM.

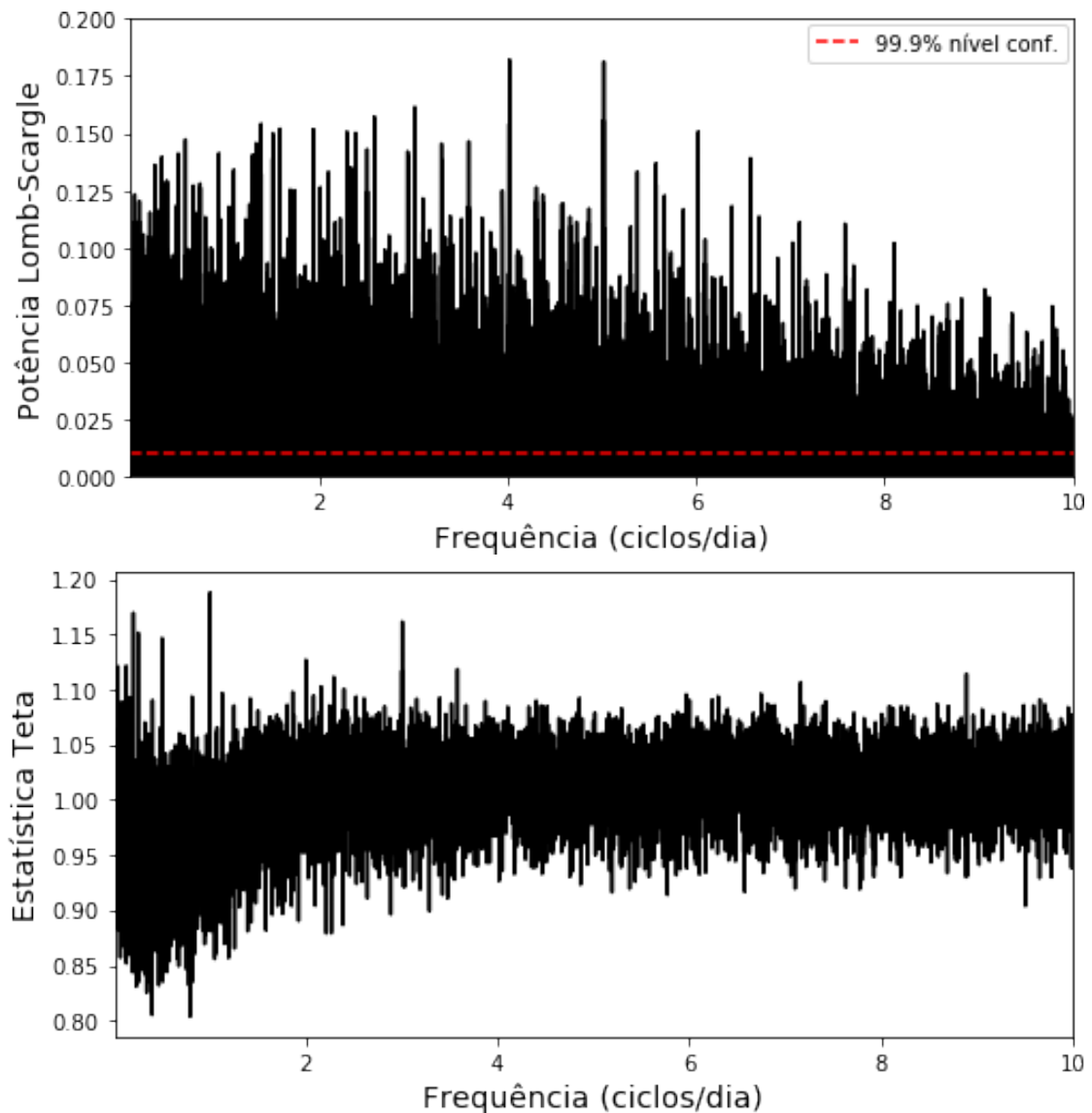


Figura 6.8: Potência Lomb-Scargle (painel superior) e estatística Θ (painel inferior) para o TNO 2013 TV₁₅₈.

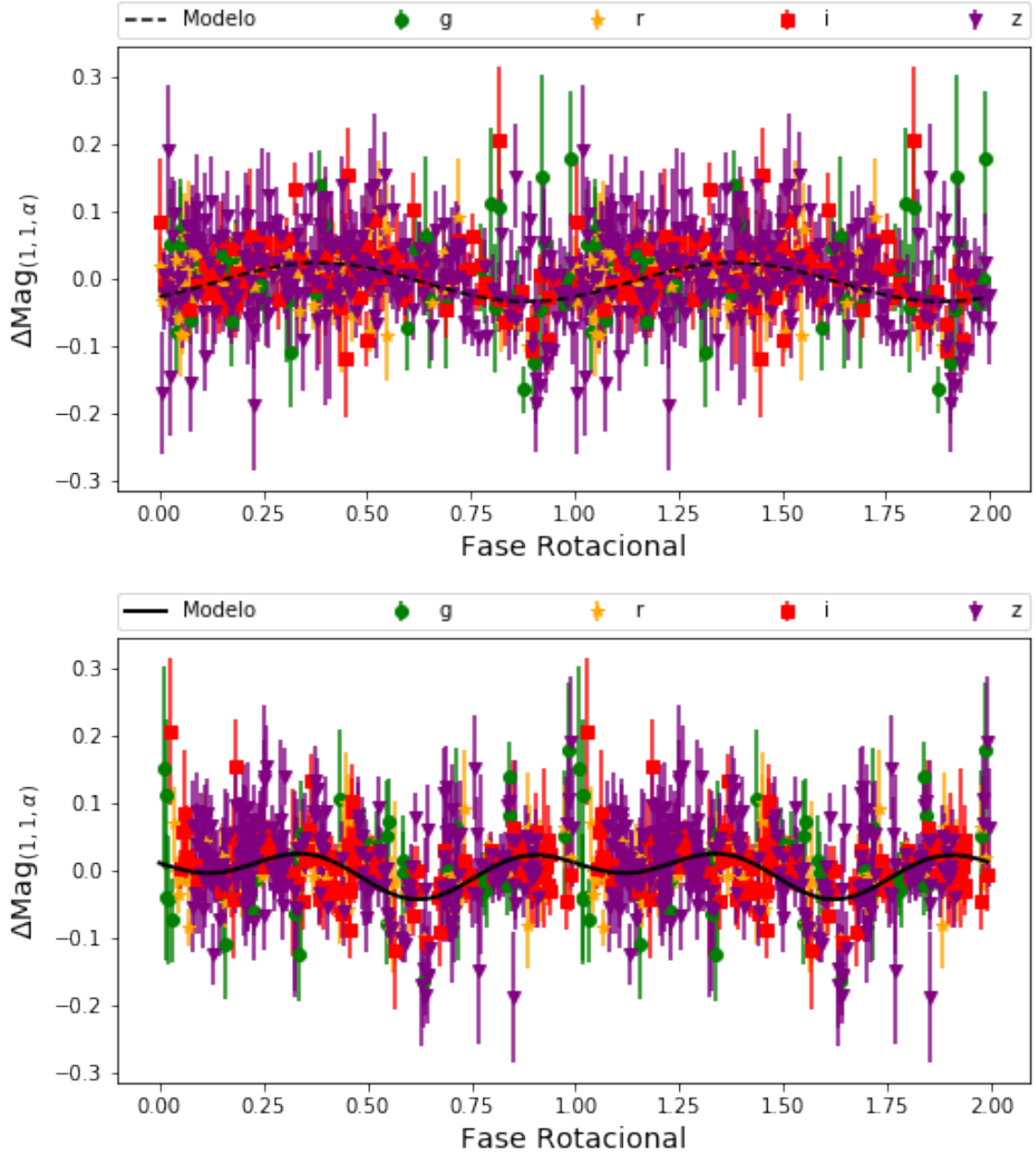


Figura 6.9: Fase rotacional Lomb-Scargle (painel superior) e PDM (painel inferior) do TNO 2013 TV₁₅₈.

Notamos, a partir da figura 6.8, que os valores dos períodos de rotação oriundos de ambos os procedimentos são diferentes. A figura 6.9 mostra que as amplitudes encontradas para a variação fotométrica devida à rotação é pequena (em geral, essa variação é $< 0,05$ mag - vale comparar com a variação obtida para o TNO 2014 QL₄₄₁).

Apesar de haver uma boa cobertura no espaço de fase, nossa dificuldade vem do fato de obtermos respostas parecidas (i.e. ajustes com dispersões parecidas) a partir de sinais diferentes. Vale ressaltar que encontramos a mesma dificuldade com Eris, objeto com alto albedo e superfície com pouca cor para o vermelho (BROWN,

2008).

É interessante notar também que o intervalo total de tempo observado de um dado corpo pode chegar a alguns anos. Quanto maior for esse intervalo, maior o intervalo de frequências cobertas e, assim, mais fina deve ser a busca de frequências a ser realizada.

6.1.2 Magnitudes absolutas e inclinação devida à fase

Como mencionado anteriormente, magnitudes absolutas são grandezas relevantes neste trabalho por conta, em parte, da irregularidade na cadência observacional (pois, como mencionado anteriormente, índices de cor devem ser determinados por medidas tomadas próximas no tempo). De fato, observações em diferentes bandas para um dado objeto foram tomadas com intervalos de tempo que variam desde minutos até anos e, por isso, cores não devem ser obtidas através da comparação direta de medidas de magnitudes.

A determinação da magnitude absoluta requer o conhecimento da variação da magnitude reduzida $M(1, 1, \alpha)$ como função do ângulo de fase solar (α). Como justificaremos mais a seguir, não houve razão para não usarmos uma relação linear como aquela dada pela equação 6.14 (exceção talvez para o TNO 2014 QR₄₄₁ na banda z) para descrever essa variação. Essa abordagem linear também é adotada em outros trabalhos como, por exemplo, OFEK (2012), AYALA-LOERA *et al.* (2018) e ALVAREZ-CANDAL *et al.* (2019).

O aumento mais repentino do brilho de um corpo do Sistema Solar para ângulos de fase pequenos, conhecido por efeito de oposição, é comumente atribuído a dois fenômenos físicos: ocultação por sombra (*shadow hiding*) e retroespalhamento coerente (*coherent backscattering*) (VERBISCER *et al.*, 2013, e referências lá contidas). O primeiro efeito deve-se ao fato de que, próximo à oposição, sombras na superfície praticamente desaparecem. Esse efeito é mais pronunciado para ângulos de fase menores que 20° de corpos sem atmosfera (veja figura 6.10 para um exemplo). O segundo efeito é devido à interferência construtiva, que ocorre também em pequenos ângulos de fase ($< 2^\circ$), entre dois raios luminosos viajando em trajetórias de mesma direção mas em sentidos contrários provocando aumento de brilho por um fator de até 2.

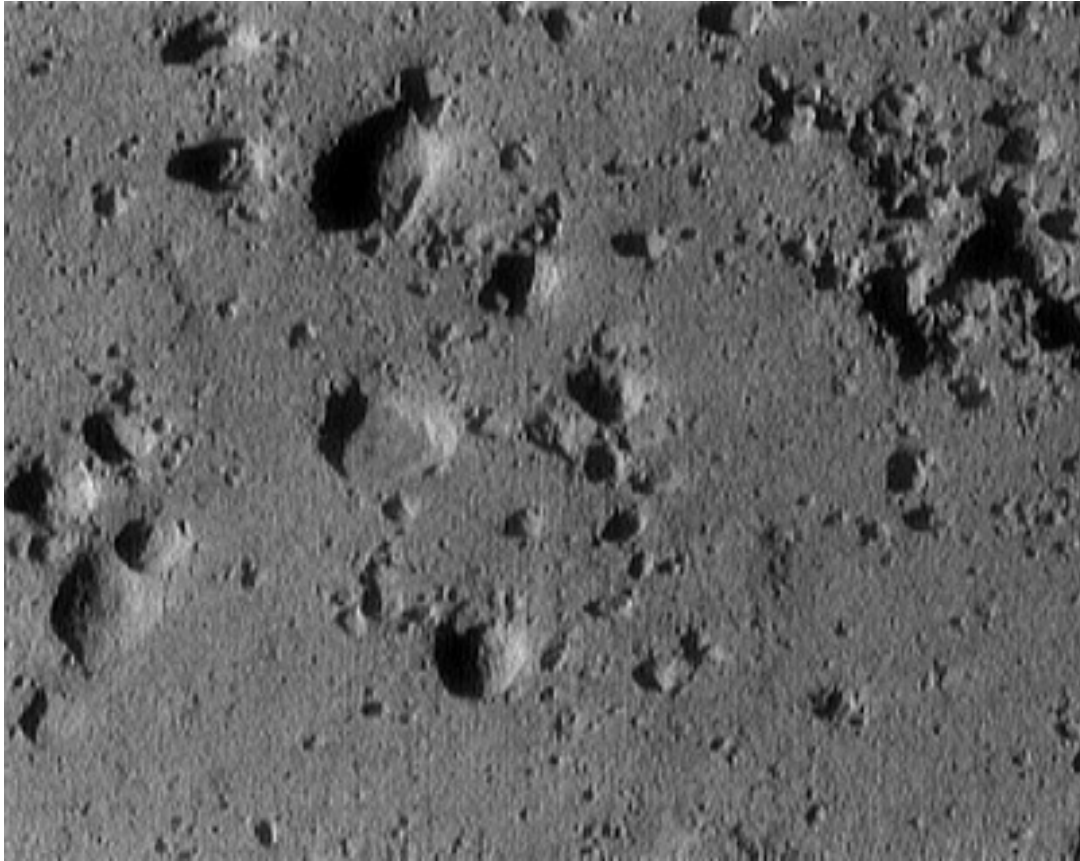


Figura 6.10: Imagem tomada pela NEAR Shoemaker em FEV/2001, próximo ao seu pouso sobre a superfície de Eros. Distância sonda-asteroide no momento da foto: 250 m. Largura da imagem: 12 m. Imagem e créditos: <http://near.jhuapl.edu/iod/20010214/index.html>

Apesar do modelo simples utilizado - modelo linear - para representar a variação da magnitude reduzida como função da fase solar, o parâmetro de inclinação (parâmetro β , veja equação 6.14 mais adiante), ainda é uma contribuição relevante ao estudo das superfícies dos TNOs/Centauros.

A tabela 6.2 apresenta os valores determinados de magnitude absoluta e inclinação de fase. As figuras de 6.11 a 6.39 mostram parte dos dados dessa tabela.

Vale notar a ocorrência de inclinações de fase negativas (com $|s|/\sigma_s > 1$). Não temos explicação física para justificar a diminuição de brilho com o aumento do ângulo de fase.

SCHAEFER *et al.* (2009) estudou corpos distantes e estabeleceu 4 critérios para determinar se o surto de brilho que ocorre em pequenos ângulos de fase é dominado por retroespalhamento coerente: (i) dependência do surto como função da diferença de inclinações de fase ($|s_a - s_b|/\sigma_{a-b} > 2$), onde a e b são filtros diferentes e σ_{a-b} é a incerteza de $s_a - s_b$; (ii) $s_0 - 2\sigma_{s_0} > 0,04 \text{ mag deg}^{-1}$, onde s_0 é a média em todas as bandas da inclinação da curva de fase para ângulo de fase = 0; (iii) qualidade do ajuste da forma de curvas de fase bem medidas, levando em conta parâmetros

que vêm da contribuição de ocultação de sombra e retroespalhamento coerente; (iv) albedo $> 0,4$. Verifica-se então, com esses critérios, qual o mecanismo (ocultação de sombra ou retroespalhamento coerente) dominante.

Basicamente, nossos dados permitem verificar apenas os critérios 1 e 2. De fato,

Critério 3: Como argumentado anteriormente, a utilização de uma reta é justificada para descrevermos o comportamento das magnitudes reduzidas ($M(1, 1, \alpha)$) como função da fase. Neste contexto, este critério não se aplica.

Critério 4: Obtivemos, através da literatura, albedos para alguns de nossos objetos. Exceção feita a Eris, todos os albedos obtidos são inferiores a 40%. Como mencionado em SCHAEFER *et al.* (2009), albedo $< 40\%$ indica que ocultação de sombra ou retroespalhamento coerente podem ser dominantes.

Nota-se que 71% de nossa amostra (fundo verde, tabela 6.2) satisfaz o segundo critério. A exemplo do que concluiu OFEK (2012), com base apenas nesse mesmo critério, dizemos também que a maioria das inclinações das curvas de fase aqui apresentadas são influenciadas de forma mais dominante pelo retroespalhamento coerente. Esse cenário é diferente, no entanto, se considerarmos os dois critérios que pudemos utilizar. Uma melhor resposta pode vir de uma amostra maior e com medidas fotométricas mais precisas.

ID	H	β	χ^2	q	N	filtro	albedo
1999 RB ₂₁₆ (0,05 0,37)	7,7 ($\pm 0,1$)	0,2 ($\pm 0,2$)	2,352	67,1	6	g	—
	6,90 ($\pm 0,05$)	0,18 ($\pm 0,08$)	15,978	0,3	6	r	
	6,66 ($\pm 0,06$)	0,16 ($\pm 0,08$)	31,060	0,0	6	i	
	6,5 ($\pm 0,2$)	0,16 ($\pm 0,1$)	1,137	88,8	6	z	
2001 QF ₂₉₈ (0,22 1,1)	5,4 ($\pm 0,1$)	0,5 ($\pm 0,3$)	19,390	0,0	4	g	0,071
	5,02 ($\pm 0,02$)	0,3 ($\pm 0,05$)	8,652	1,3	4	r	
	4,96 ($\pm 0,04$)	0,33 ($\pm 0,08$)	5,101	7,8	4	i	
	4,75 ($\pm 0,06$)	0,4 ($\pm 0,1$)	0,450	79,8	4	z	
2003 QW ₉₀ (0,05 3,4)	5,9 ($\pm 0,1$)	0,0 ($\pm 0,1$)	0,286	86,7	4	g	0,084
	4,88 ($\pm 0,06$)	0,10 ($\pm 0,08$)	2,710	10,0	3	r	
	4,44 ($\pm 0,04$)	0,19 ($\pm 0,05$)	5,299	15,1	5	i	
	4,1 ($\pm 0,2$)	0,4 ($\pm 0,2$)	6,018	4,9	4	z	
2004 TY ₃₆₄ (0,11 10,26)	4,94 ($\pm 0,03$)	0,20 ($\pm 0,04$)	30,064	0,0	4	g	0,264
	3,99 ($\pm 0,01$)	0,32 ($\pm 0,02$)	73,247	0,0	6	r	
	4,05 ($\pm 0,04$)	-0,17 ($\pm 0,06$)	90,778	0,0	4	i	
	3,64 ($\pm 0,03$)	0,24 ($\pm 0,03$)	36,941	0,0	4	z	
2005 PU ₂₁ (0,04 7,07)	7,19 ($\pm 0,09$)	0,1 ($\pm 0,1$)	0,165	92,1	4	g	
	5,8 ($\pm 0,4$)	0,6 ($\pm 0,4$)	2,186	33,5	4	r	

ID	H	β	χ^2	q	N	filtro	albedo
2005 TB ₁₉₀ (-0,08 0,8)	5,5 ($\pm 0,1$)	0,6 ($\pm 0,1$)	3,869	14,4	4	i	0,195
	5,8 ($\pm 0,2$)	-0,1 ($\pm 0,3$)	0,983	80,5	5	z	
	4,97 ($\pm 0,02$)	0,23 ($\pm 0,04$)	5,343	25,4	6	g	
	4,13 ($\pm 0,03$)	0,23 ($\pm 0,03$)	0,069	96,6	4	r	
	3,86 ($\pm 0,02$)	0,21 ($\pm 0,03$)	4,125	12,7	4	i	
2007 RW ₁₀ (0,12 2,68)	4,0 ($\pm 0,3$)	-0,2 ($\pm 0,4$)	65,509	0,0	4	z	0,083
	7,04 ($\pm 0,04$)	0,21 ($\pm 0,06$)	0,030	98,5	4	g	
	6,36 ($\pm 0,05$)	0,34 ($\pm 0,07$)	3,738	5,3	3	r	
	6,39 ($\pm 0,02$)	0,12 ($\pm 0,03$)	18,937	0,0	5	i	
2008 SO ₂₆₆ (0,09 9,95)	6,37 ($\pm 0,08$)	0,04 ($\pm 0,07$)	4,758	9,3	4	z	—
	7,02 ($\pm 0,04$)	0,23 ($\pm 0,05$)	5,674	22,5	6	g	
	6,26 ($\pm 0,03$)	0,03 ($\pm 0,02$)	30,158	0,0	6	r	
	6,05 ($\pm 0,04$)	-0,06 ($\pm 0,03$)	11,600	0,3	4	i	
2012 TC ₃₂₄ (-0,04 3,25)	5,41 ($\pm 0,09$)	0,34 ($\pm 0,07$)	2,926	8,7	3	z	—
	7,55 ($\pm 0,08$)	-0,01 ($\pm 0,09$)	1,459	69,2	5	g	
	6,35 ($\pm 0,04$)	0,26 ($\pm 0,04$)	0,569	45,1	3	r	
	6,00 ($\pm 0,04$)	0,15 ($\pm 0,04$)	3,541	31,5	5	i	
2012 VR ₁₁₃ (0,08 0,38)	6,0 ($\pm 0,2$)	-0,1 ($\pm 0,2$)	19,707	0,1	6	z	—
	7,0 ($\pm 0,1$)	0,2 ($\pm 0,2$)	2,882	71,8	7	g	
	6,36 ($\pm 0,05$)	0,17 ($\pm 0,06$)	35,362	0,1	16	r	
	6,11 ($\pm 0,06$)	0,16 ($\pm 0,06$)	37,183	0,1	17	i	
2012 VS ₁₁₃ (0,09 1,12)	5,83 ($\pm 0,07$)	0,26 ($\pm 0,08$)	17,807	53,5	21	z	—
	7,5 ($\pm 0,1$)	0,17 ($\pm 0,08$)	29,871	12,2	24	g	
	6,85 ($\pm 0,05$)	0,18 ($\pm 0,04$)	45,697	3,3	32	r	
	6,66 ($\pm 0,05$)	0,12 ($\pm 0,04$)	64,365	8,3	52	i	
2012 VU ₁₁₃ (0,19 0,63)	6,5 ($\pm 0,1$)	0,15 ($\pm 0,07$)	60,422	73,2	70	z	—
	7,8 ($\pm 0,4$)	0,3 ($\pm 0,3$)	0,009	92,3	3	g	
	7,25 ($\pm 0,08$)	0,41 ($\pm 0,09$)	16,622	16,4	14	r	
	7,1 ($\pm 0,1$)	0,4 ($\pm 0,1$)	7,232	20,4	7	i	
2013 QO ₉₅ (0,25 2,95)	6,8 ($\pm 0,2$)	0,4 ($\pm 0,2$)	2,415	29,9	4	z	—
	7,35 ($\pm 0,09$)	0,2 ($\pm 0,1$)	11,186	4,8	7	g	
	6,28 ($\pm 0,05$)	0,51 ($\pm 0,06$)	39,173	0,0	10	r	
	5,98 ($\pm 0,05$)	0,38 ($\pm 0,07$)	34,785	0,0	12	i	
2013 RD ₉₈ (0,1 2,53)	5,88 ($\pm 0,06$)	0,23 ($\pm 0,09$)	7,157	71,1	12	z	—
	7,6 ($\pm 0,2$)	0,0 ($\pm 0,3$)	0,477	78,8	4	g	
	7,03 ($\pm 0,08$)	0,2 ($\pm 0,1$)	49,265	0,1	25	r	
	6,61 ($\pm 0,08$)	0,4 ($\pm 0,1$)	56,593	0,2	32	i	
2013 RG ₉₈ (0,01 3,61)	6,2 ($\pm 0,2$)	0,7 ($\pm 0,3$)	6,987	98,4	19	z	—
	9,4 ($\pm 0,1$)	0,13 ($\pm 0,06$)	35,395	2,6	23	g	
	9,0 ($\pm 0,1$)	0,08 ($\pm 0,04$)	225,045	0,0	31	r	

ID	H	β	χ^2	q	N	filtro	albedo
	8,9 ($\pm 0,1$)	0,00 ($\pm 0,04$)	102,734	0,0	41	i	
	8,8 ($\pm 0,1$)	0,04 ($\pm 0,05$)	147,630	0,0	97	z	
2013 RM ₉₈	5,84 ($\pm 0,04$)	0,30 ($\pm 0,06$)	38,836	0,0	7	g	—
(0,13 1,19)	5,4 ($\pm 0,1$)	0,2 ($\pm 0,1$)	0,011	91,6	3	r	
	5,28 ($\pm 0,07$)	0,38 ($\pm 0,12$)	3,948	26,7	5	i	
	5,1 ($\pm 0,3$)	0,5 ($\pm 0,4$)	1,999	15,7	3	z	
2013 RO ₉₈	6,8 ($\pm 0,1$)	-0,2 ($\pm 0,2$)	2,022	36,4	4	g	—
(-0,16 2,68)	6,10 ($\pm 0,09$)	0,0 ($\pm 0,1$)	0,123	94,0	4	r	
	5,7 ($\pm 0,1$)	0,1 ($\pm 0,1$)	1,855	39,5	4	i	
	5,6 ($\pm 0,1$)	0,1 ($\pm 0,2$)	5,064	7,9	4	z	
2013 TV158	6,98 ($\pm 0,03$)	0,17 ($\pm 0,03$)	81,412	0,0	44	g	—
(0,13 2,49)	6,250 ($\pm 0,009$)	0,150 ($\pm 0,009$)	115,767	0,0	72	r	
	5,974 ($\pm 0,009$)	0,131 ($\pm 0,009$)	470,942	0,0	101	i	
	5,83 ($\pm 0,01$)	0,14 ($\pm 0,01$)	667,853	0,0	214	z	
2014 QB ₄₄₂	7,2 ($\pm 0,1$)	0,7 ($\pm 0,3$)	0,044	83,5	3	g	—
(-0,01 5,67)	6,13 ($\pm 0,05$)	0,17 ($\pm 0,08$)	37,071	0,0	6	r	
	6,00 ($\pm 0,06$)	-0,18 ($\pm 0,08$)	3,097	37,7	5	i	
	5,4 ($\pm 0,4$)	0,3 ($\pm 0,4$)	3,456	32,6	5	z	
2014 QL ₄₄₁	6,93 ($\pm 0,07$)	0,34 ($\pm 0,09$)	52,184	0,0	11	g	—
(0,18 3,25)	6,25 ($\pm 0,04$)	0,16 ($\pm 0,05$)	177,344	0,0	14	r	
	5,98 ($\pm 0,04$)	0,18 ($\pm 0,04$)	288,860	0,0	16	i	
	5,75 ($\pm 0,04$)	0,27 ($\pm 0,04$)	233,518	0,0	29	z	
2014 QM ₄₄₁	9,1 ($\pm 0,1$)	-0,1 ($\pm 0,1$)	14,265	0,6	6	g	—
(-0,04 3,04)	8,16 ($\pm 0,06$)	0,16 ($\pm 0,06$)	149,254	0,0	15	r	
	8,02 ($\pm 0,05$)	0,07 ($\pm 0,05$)	216,188	0,0	21	i	
	7,87 ($\pm 0,07$)	-0,01 ($\pm 0,07$)	157,322	0,0	21	z	
2014 QN ₄₄₁	7,53 ($\pm 0,06$)	0,05 ($\pm 0,05$)	37,262	0,0	14	g	—
(-0,01 1,71)	6,59 ($\pm 0,03$)	0,04 ($\pm 0,02$)	143,934	0,0	19	r	
	6,25 ($\pm 0,02$)	0,00 ($\pm 0,03$)	261,468	0,0	20	i	
	6,03 ($\pm 0,02$)	0,02 ($\pm 0,03$)	177,143	0,0	36	z	
2014 QO ₄₄₁	8,4 ($\pm 0,2$)	0,1 ($\pm 0,1$)	62,212	0,0	13	g	—
(0 0,72)	8,06 ($\pm 0,05$)	-0,06 ($\pm 0,05$)	47,169	0,0	19	r	
	7,68 ($\pm 0,06$)	0,14 ($\pm 0,05$)	40,503	7,6	31	i	
	7,49 ($\pm 0,08$)	0,11 ($\pm 0,07$)	75,432	0,0	34	z	
2014 QR ₄₄₁	7,3 ($\pm 0,3$)	0,0 ($\pm 0,2$)	12,216	20,1	11	g	—
(0,09 1,41)	6,1 ($\pm 0,1$)	0,5 ($\pm 0,1$)	61,680	0,0	22	r	
	6,3 ($\pm 0,2$)	0,2 ($\pm 0,2$)	27,649	4,9	19	i	
	5,8 ($\pm 0,2$)	0,4 ($\pm 0,2$)	31,691	0,7	17	z	
2014 QS ₄₄₁	5,48 ($\pm 0,05$)	0,32 ($\pm 0,06$)	132,230	0,0	6	g	—
(0,66 14,61)	5,02 ($\pm 0,05$)	0,35 ($\pm 0,05$)	123,072	0,0	6	r	

ID	H	β	χ^2	q	N	filtro	albedo
	4,37 ($\pm 0,06$)	1,11 ($\pm 0,09$)	68,315	0,0	5	i	
	4,18 ($\pm 0,05$)	1,16 ($\pm 0,08$)	42,577	0,0	9	z	
2014 SR ₃₀₃	11,76 ($\pm 0,06$)	0,11 ($\pm 0,03$)	52,249	0,0	6	g	—
(0,06 3,79)	11,33 ($\pm 0,03$)	0,05 ($\pm 0,01$)	123,017	0,0	6	r	
	11,06 ($\pm 0,04$)	0,05 ($\pm 0,01$)	49,845	0,0	3	i	
	10,8 ($\pm 0,1$)	0,14 ($\pm 0,05$)	23,243	0,0	3	z	
2015 PF ₃₁₂	6,55 ($\pm 0,08$)	0,2 ($\pm 0,1$)	5,535	47,7	8	g	—
(0,19 0,49)	5,93 ($\pm 0,06$)	0,32 ($\pm 0,09$)	7,878	44,5	10	r	
	5,79 ($\pm 0,06$)	0,23 ($\pm 0,07$)	20,047	0,3	8	i	
	5,3 ($\pm 0,2$)	0,5 ($\pm 0,2$)	7,503	18,6	7	z	
Eris	-0,814 ($\pm 0,008$)	0,17 ($\pm 0,03$)	6,611	15,8	6	g	0,960
(0,04 5,55)	-1,33 ($\pm 0,01$)	0,02 ($\pm 0,07$)	0,482	48,7	3	r	
	-1,445 ($\pm 0,009$)	0,07 ($\pm 0,02$)	11,928	0,8	5	i	
	-1,37 ($\pm 0,01$)	0,08 ($\pm 0,03$)	1,588	90,3	7	z	

Tabela 6.2: Magnitudes absolutas, inclinações de fase, χ^2 , probabilidade do *goodness-of-fit*, número de medidas, filtro, albedo. Em fundo verde identificamos os objetos cujo surto de brilho é atribuído principalmente a retroespalhamento coerente (SCHAEFER *et al.*, 2009) segundo o critério 2. Logo abaixo da identificação de cada objeto, entre parêntesis, estão os valores obtidos para os critérios 2 e 1, respectivamente. Valores das colunas de 3 a 5 foram obtidos através da rotina `fit` (ajuste por mínimos quadrados e qualidade do ajuste) como dado pela coletânea *Numerical Recipes in Fortran* (PRESS *et al.*, 1992). Valores de albedo: <http://www.johnstonsarchive.net/astro/tnoslist.html>.

As comparações que foram feitas mostram, como seria de se esperar, que os valores de H obtidos no trabalho são consistentes com aqueles do MPC. Com relação a serem melhores que os valores de H dados pelo MPC, esta é uma questão mais delicada, visto que não avaliamos as medidas lá contidas. O que podemos dizer sobre isso é: os valores que obtivemos vieram de um único instrumento e de um procedimento de redução robusto que serviu para todo o levantamento. Ainda, apesar de não termos tido sucesso em retirar o efeito da rotação no cálculo de H , os valores que obtivemos permitiram uma classificação taxonômica de vários objetos estudados (por exemplo, figura 6.42 e tabela 6.6). Isto mostra que as medidas de H apresentadas no trabalho, nos diferentes filtros, são de qualidade competitiva.

1999 RB216

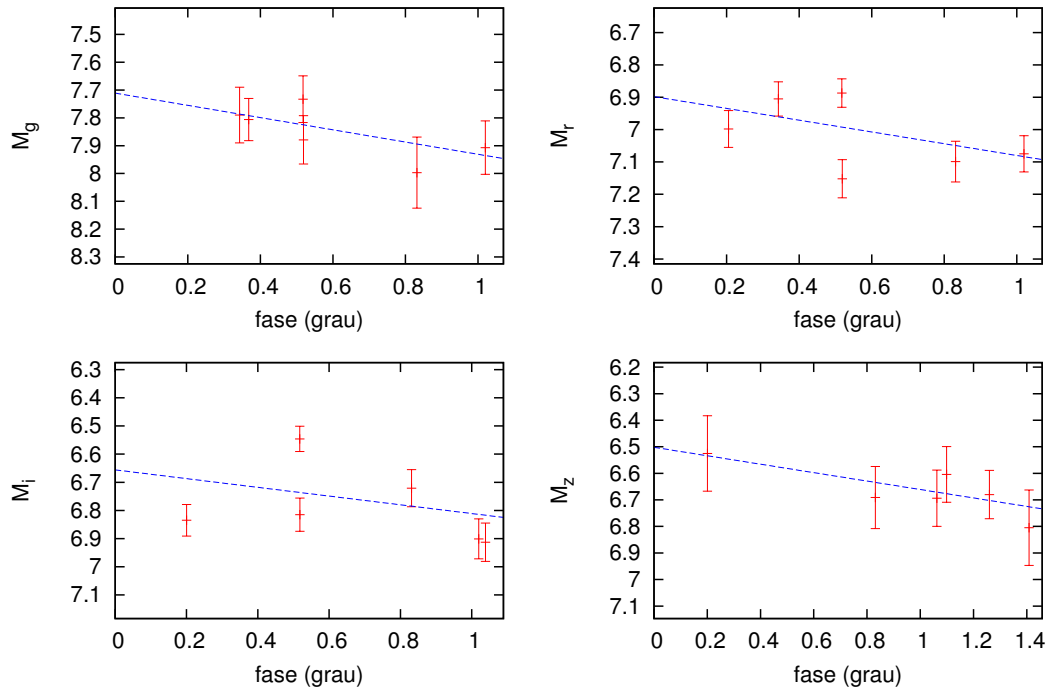


Figura 6.11: Fase versus magnitude reduzida para o TNO 1999 RB₂₁₆.

2001 QF298

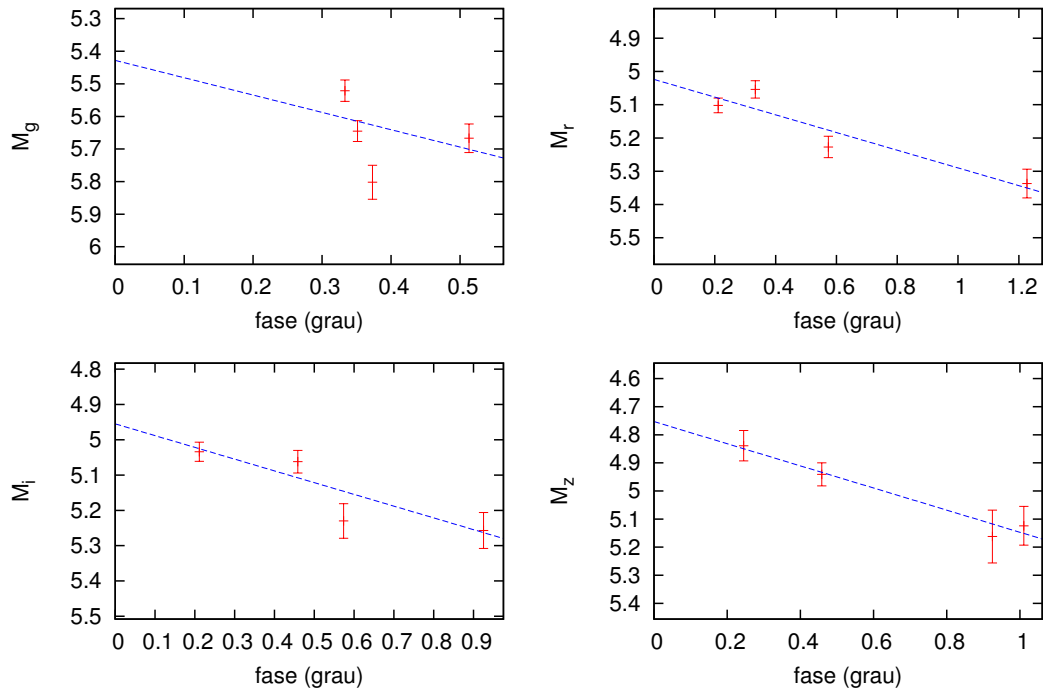


Figura 6.12: Fase versus magnitude reduzida para o TNO 2001 QF₂₉₈.

2003 QW90

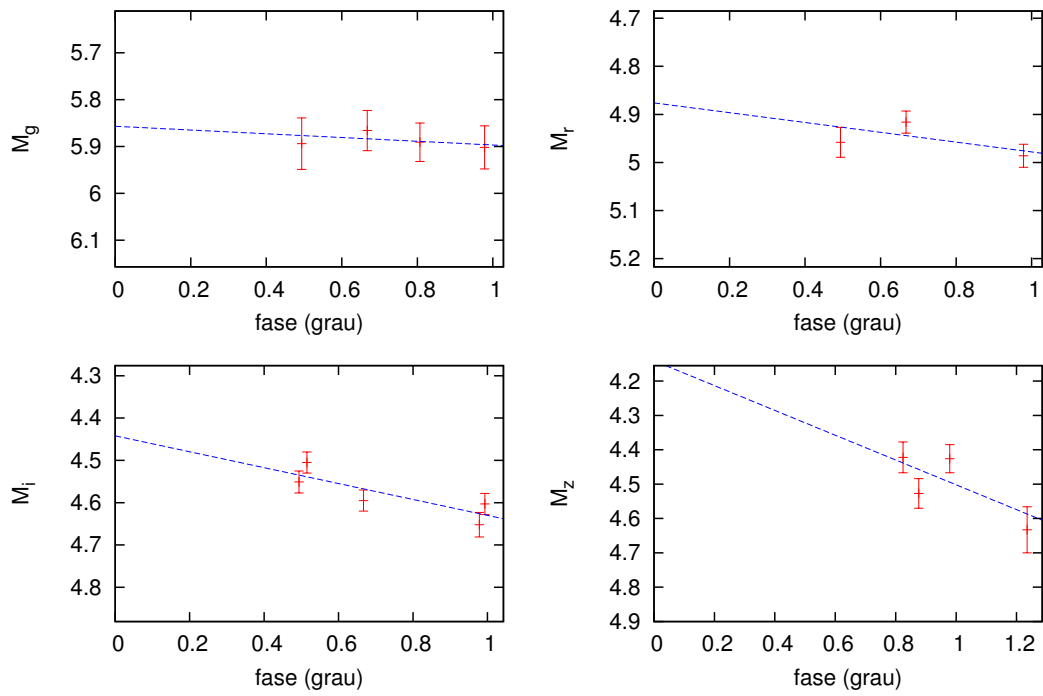


Figura 6.13: Fase versus magnitude reduzida para o TNO 2003 QW₉₀.

2004 TY364

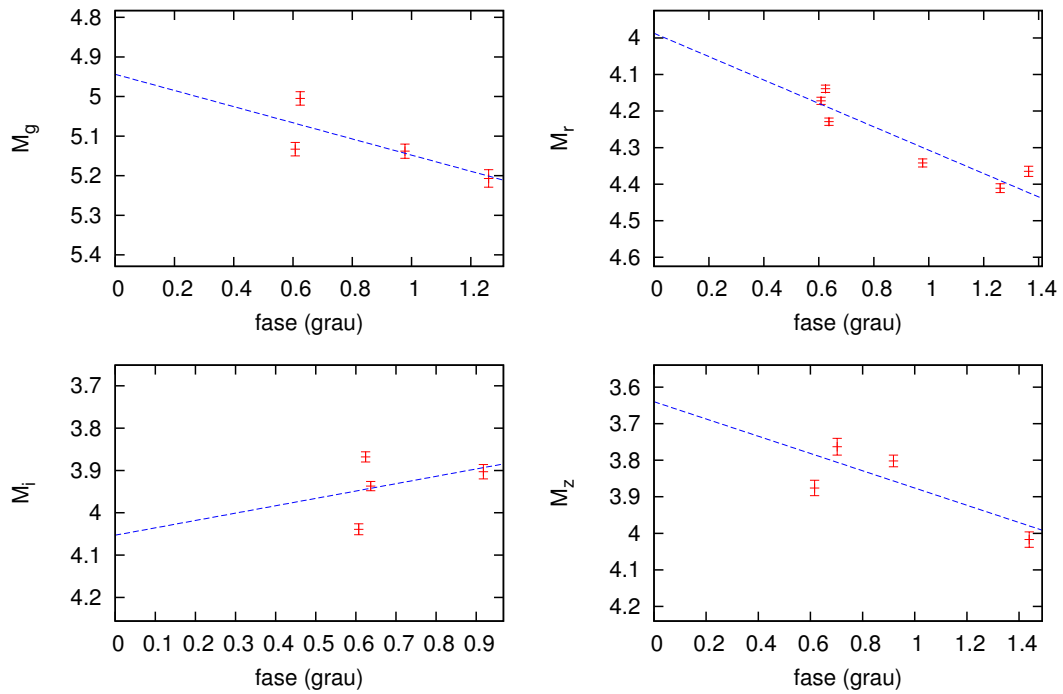


Figura 6.14: Fase versus magnitude reduzida para o TNO 2004 TY₃₆₄.

2005 PU21

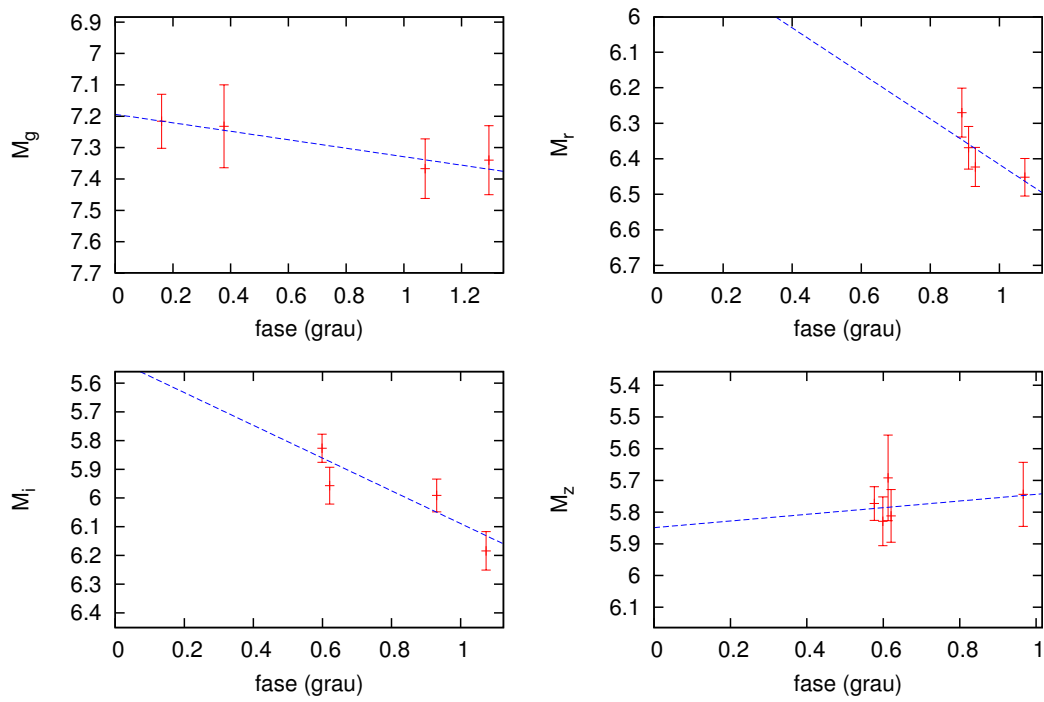


Figura 6.15: Fase versus magnitude reduzida para o TNO 2005 PU₂₁.

2005 TB190

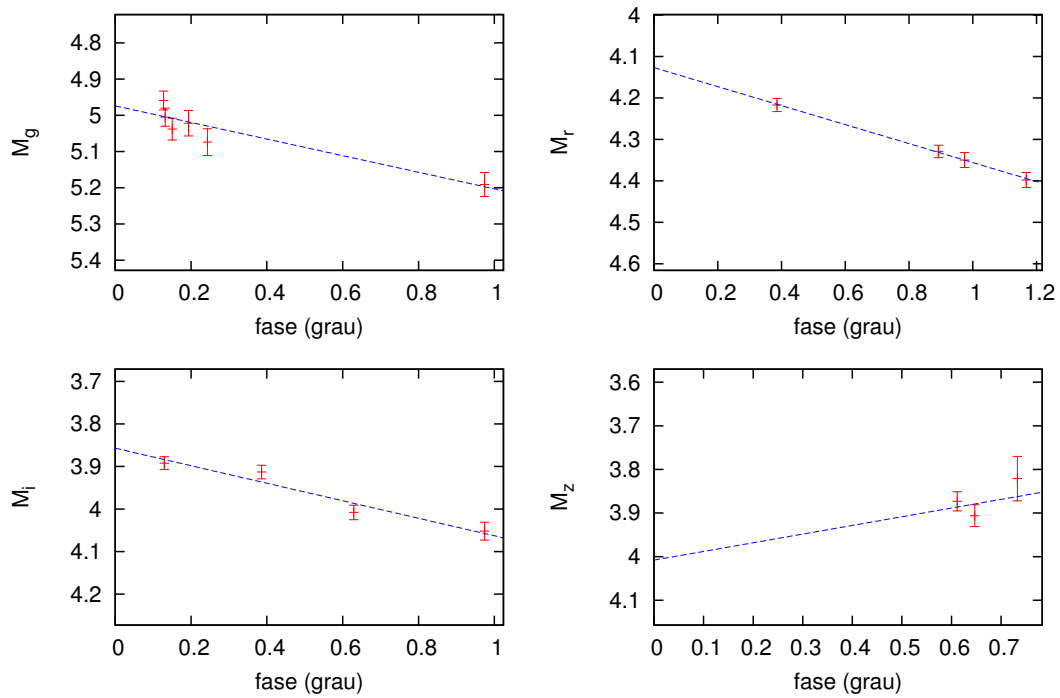


Figura 6.16: Fase versus magnitude reduzida para o TNO 2005 TB₁₉₀.

2007 RW10

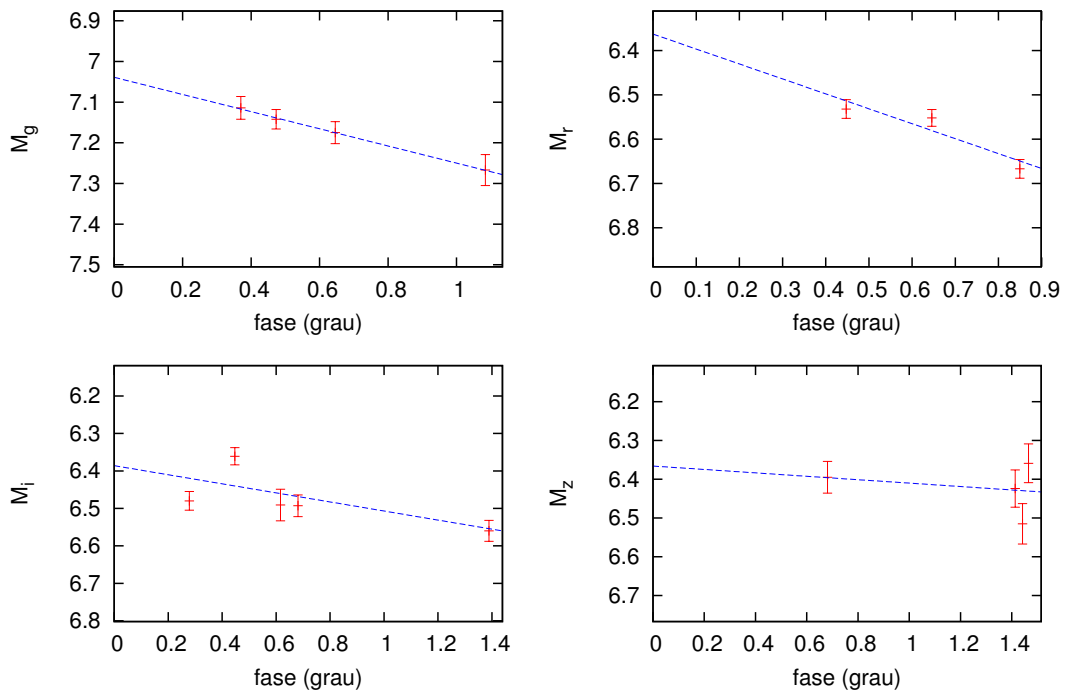


Figura 6.17: Fase versus magnitude reduzida para o TNO 2007 RW₁₀.

2008 SO266

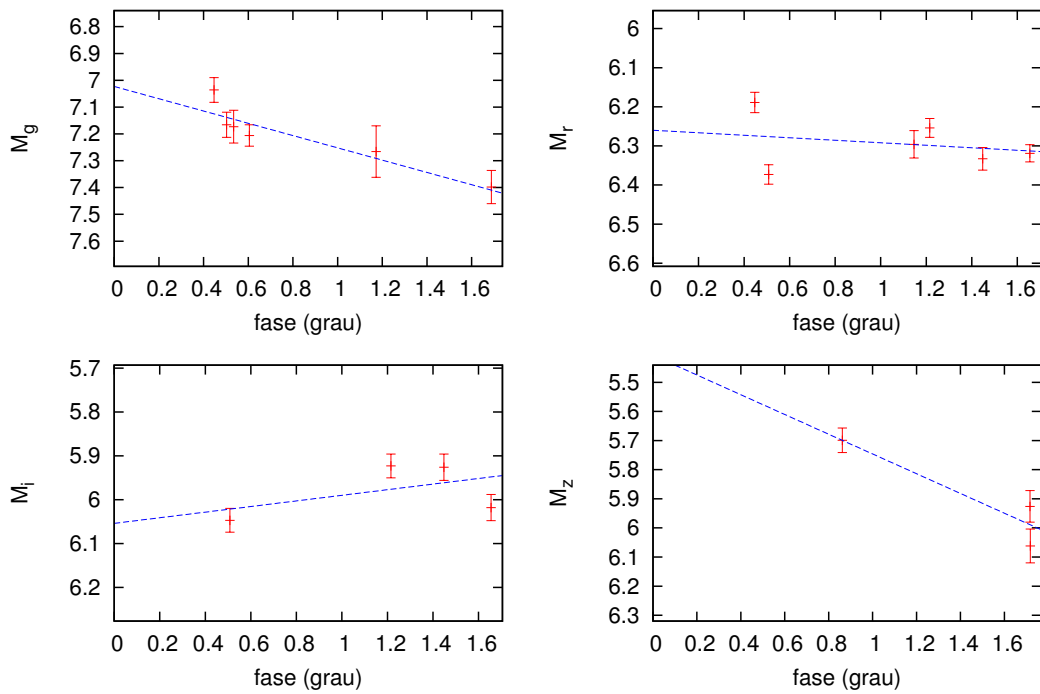


Figura 6.18: Fase versus magnitude reduzida para o TNO 2008 SO₂₆₆.

2012 TC324

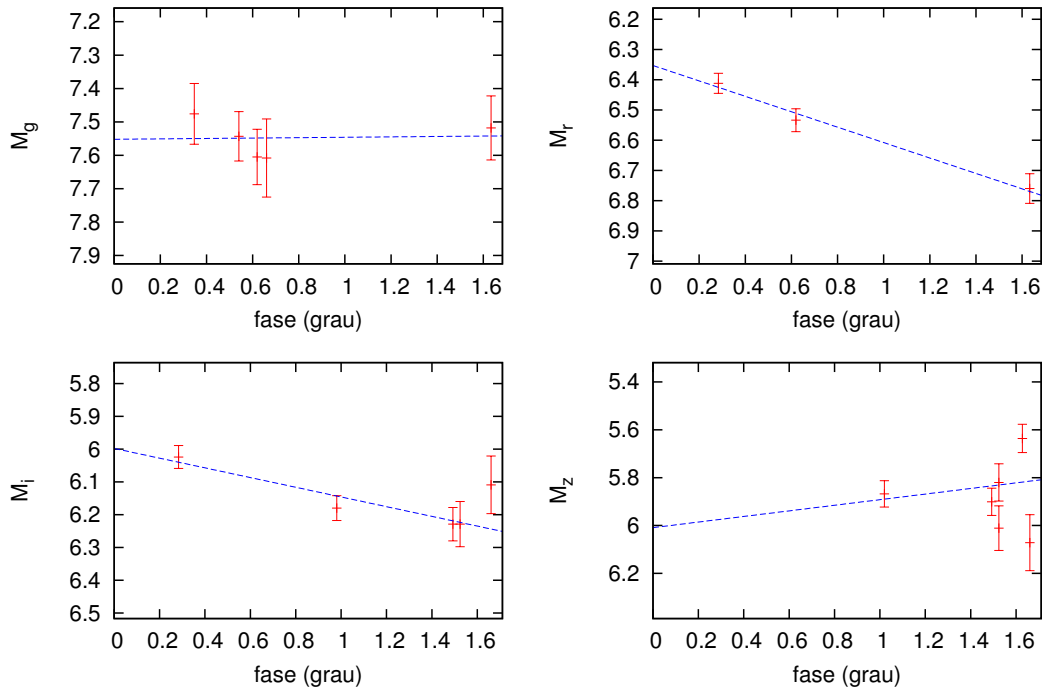


Figura 6.19: Fase versus magnitude reduzida para o TNO 2012 TC₃₂₄.

2012 VR113

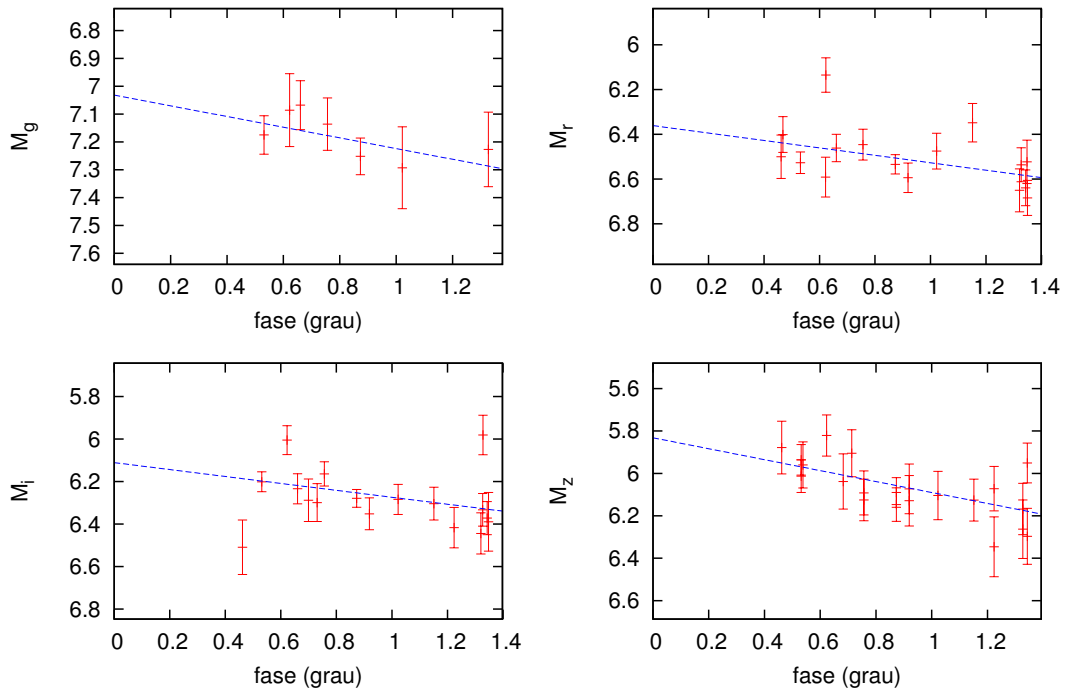


Figura 6.20: Fase versus magnitude reduzida para o TNO 2012 VR₁₁₃.

2012 VS113

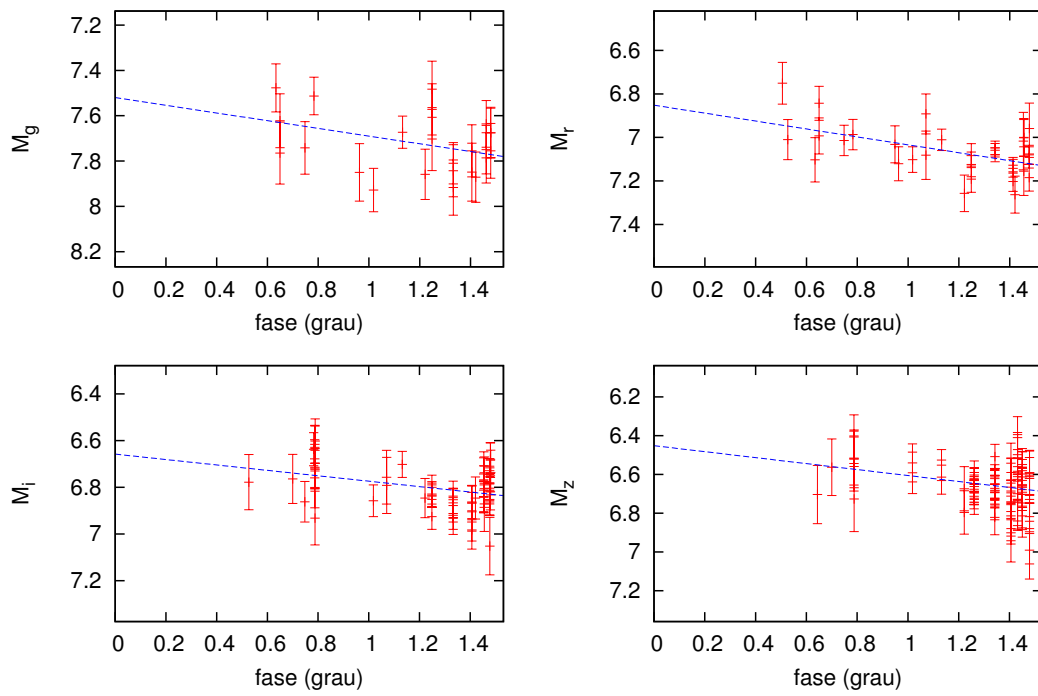


Figura 6.21: Fase versus magnitude reduzida para o TNO 2012 VS₁₁₃.

2012 VU113

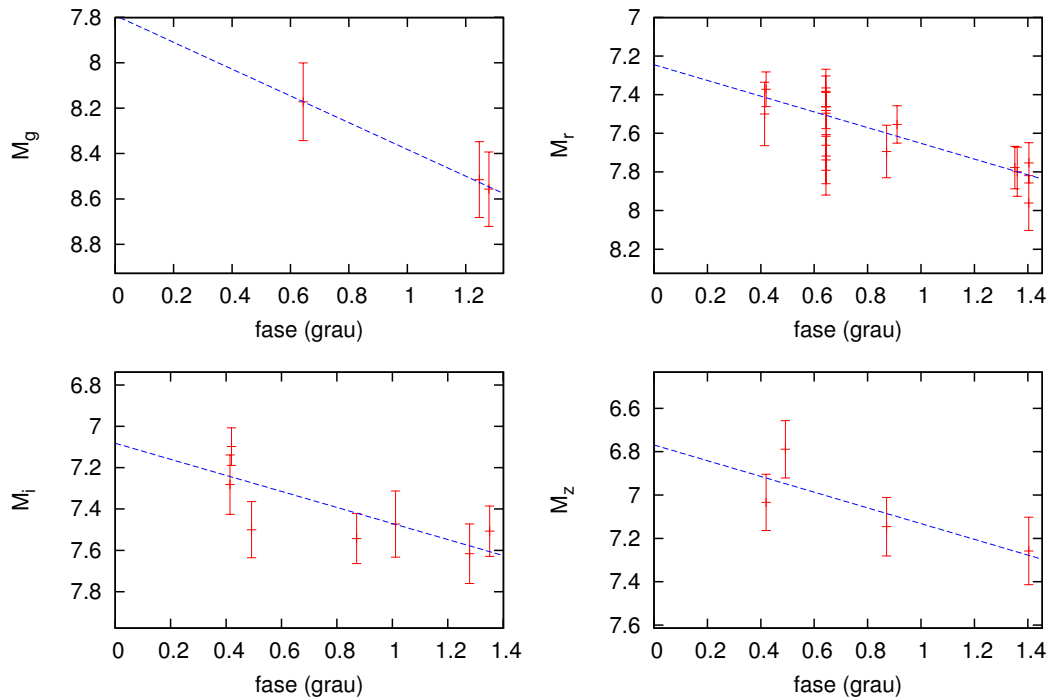


Figura 6.22: Fase versus magnitude reduzida para o TNO 2012 VU₁₁₃.

2013 QO95

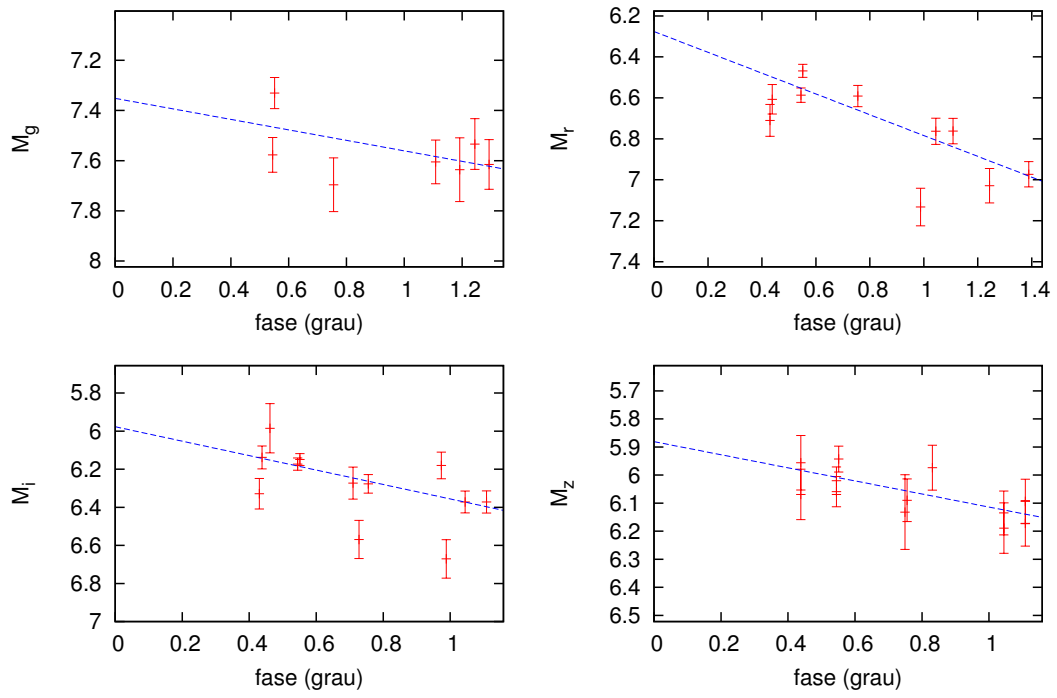


Figura 6.23: Fase versus magnitude reduzida para o TNO 2013 QO₉₅.

2013 QP95

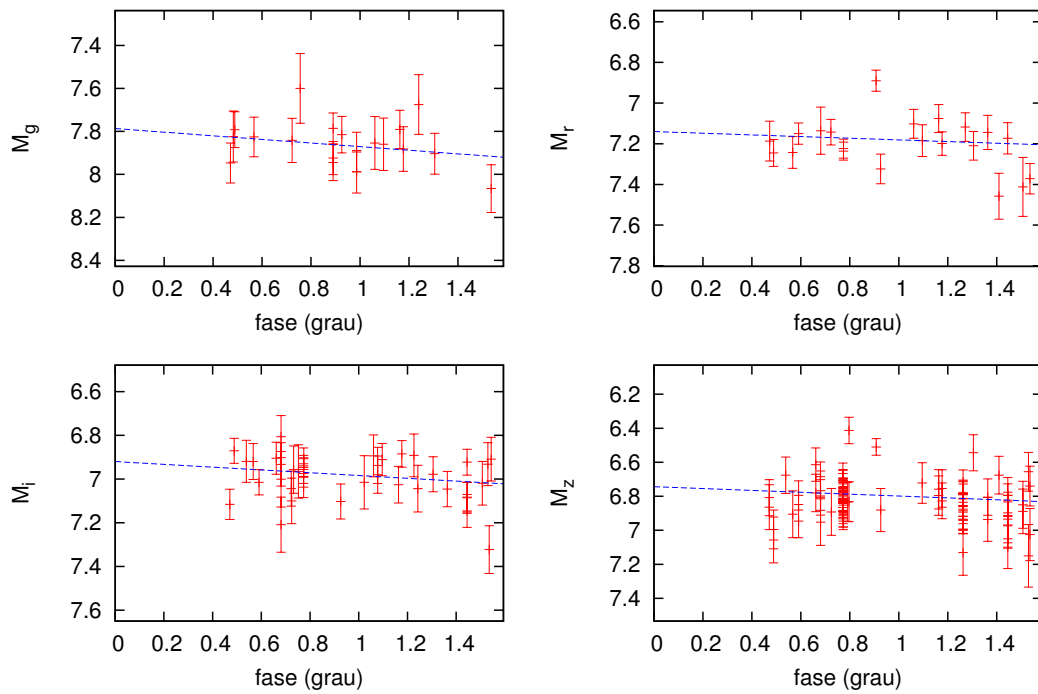


Figura 6.24: Fase versus magnitude reduzida para o TNO 2013 QP₉₅.

2013 RD98

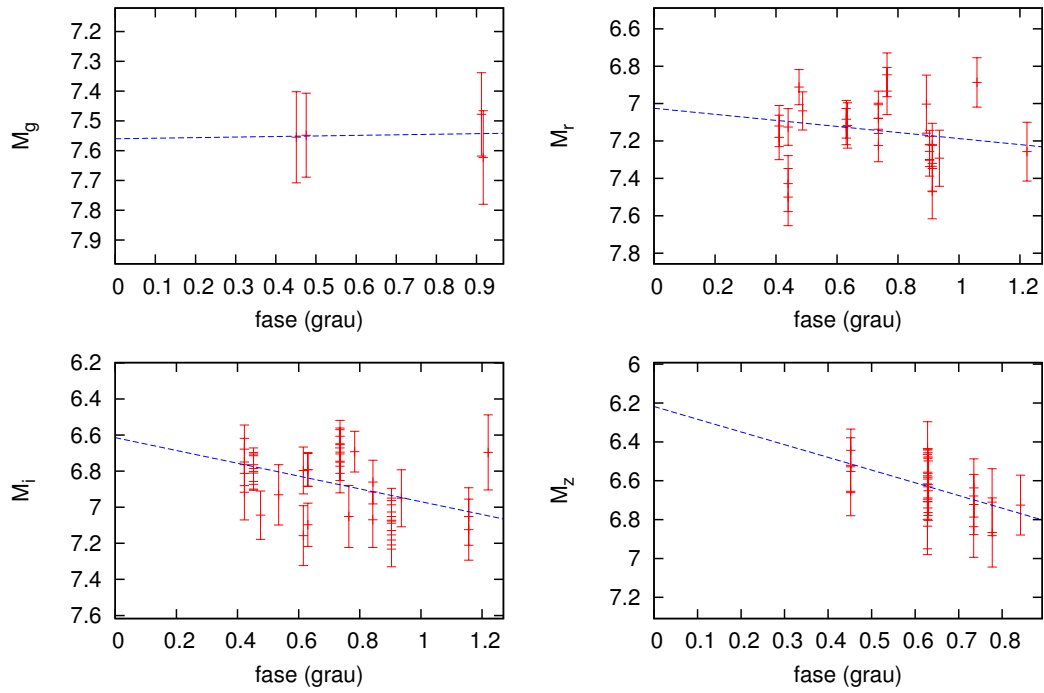


Figura 6.25: Fase versus magnitude reduzida para o TNO 2013 RD₉₈.

2013 RG98

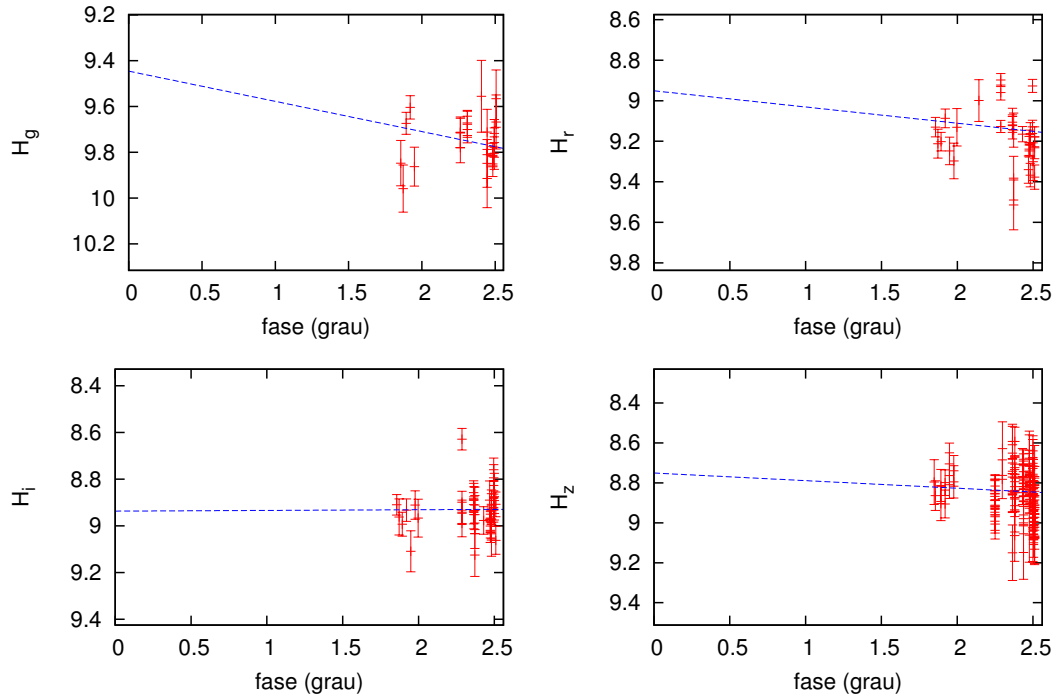


Figura 6.26: Fase versus magnitude reduzida para o Centauro 2013 RG₉₈.

2013 RM98

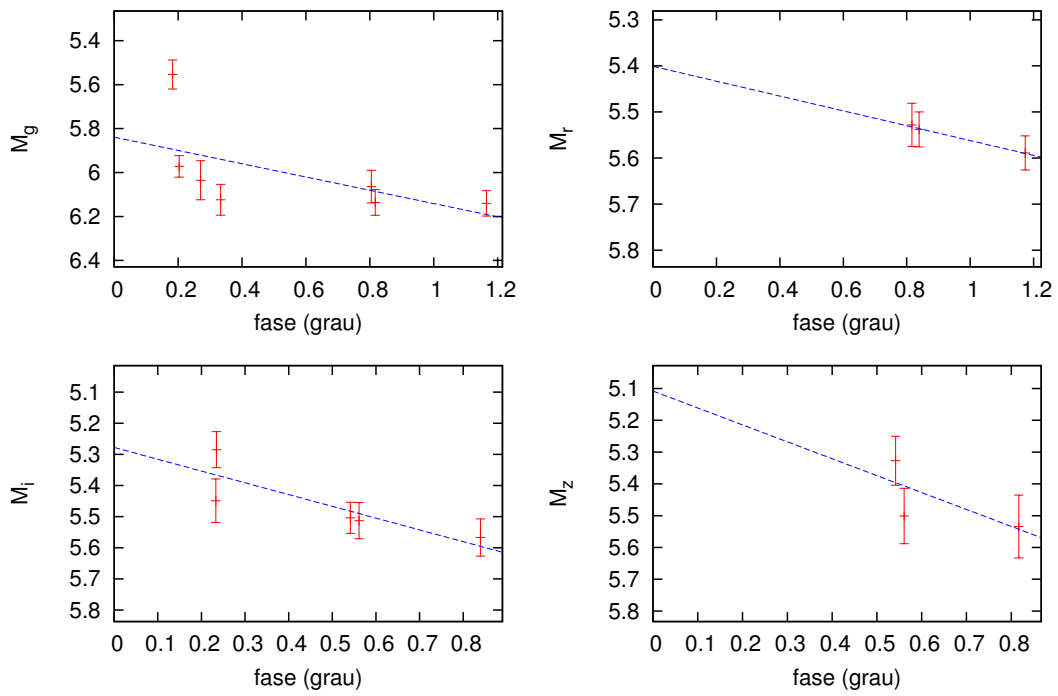


Figura 6.27: Fase versus magnitude reduzida para o TNO 2013 RM₉₈.

2013 RO98

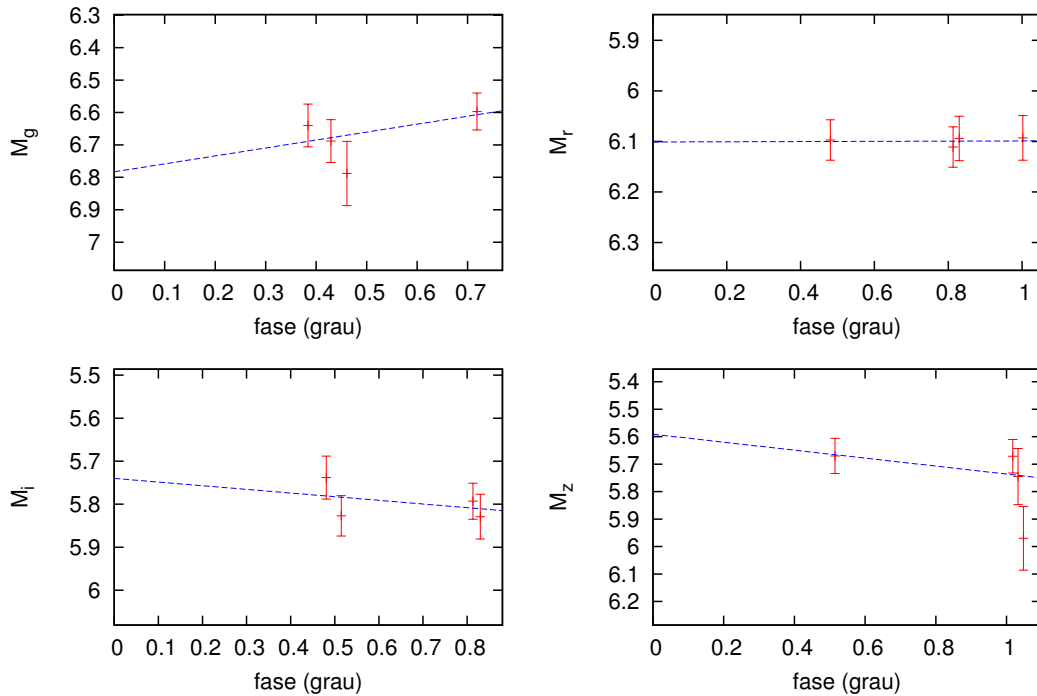


Figura 6.28: Fase versus magnitude reduzida para o TNO 2013 RO₉₈.

2013 TV158

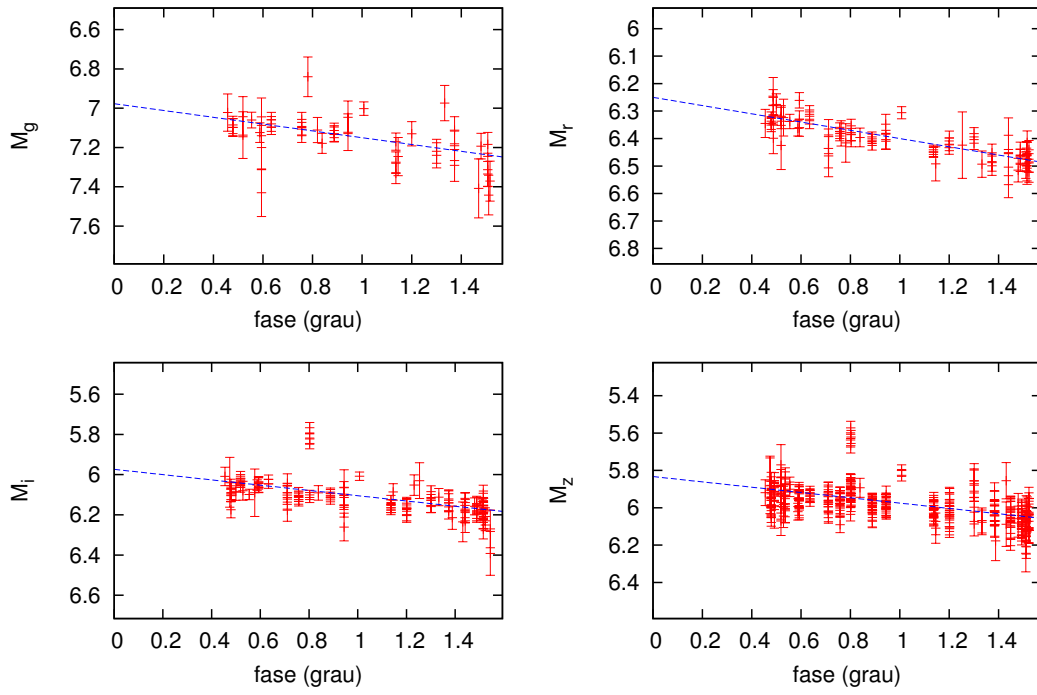


Figura 6.29: Fase versus magnitude reduzida para o TNO 2013 TV₁₅₈.

2014 QB442

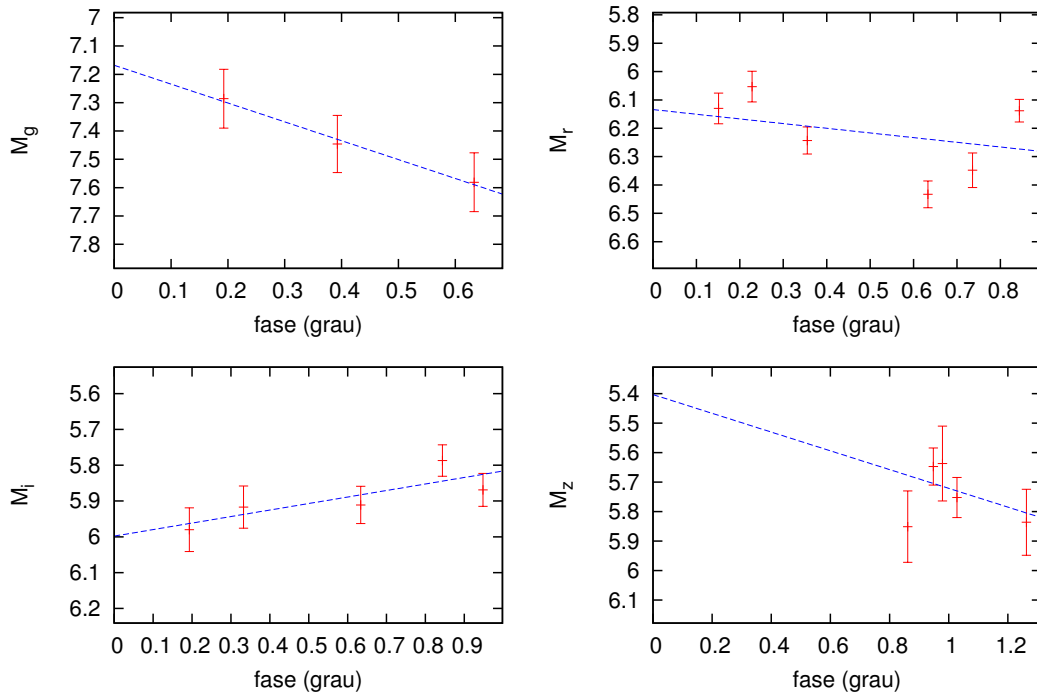


Figura 6.30: Fase versus magnitude reduzida para o TNO 2014 QB₄₄₂.

2014 QL441

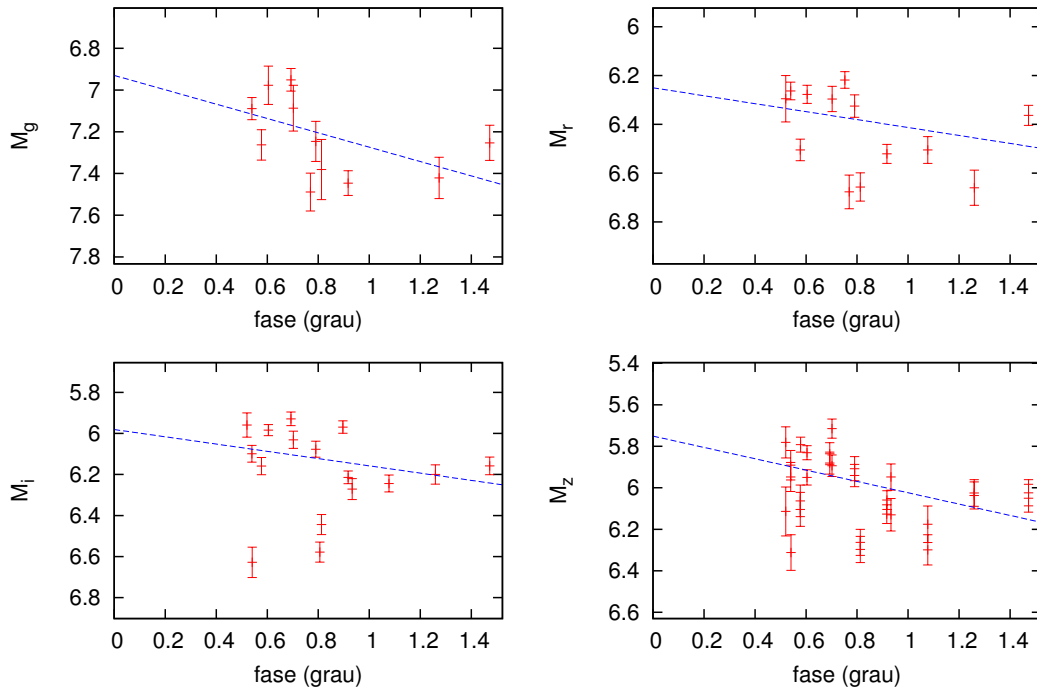


Figura 6.31: Fase versus magnitude reduzida para o TNO 2014 QL₄₄₁.

2014 QM441

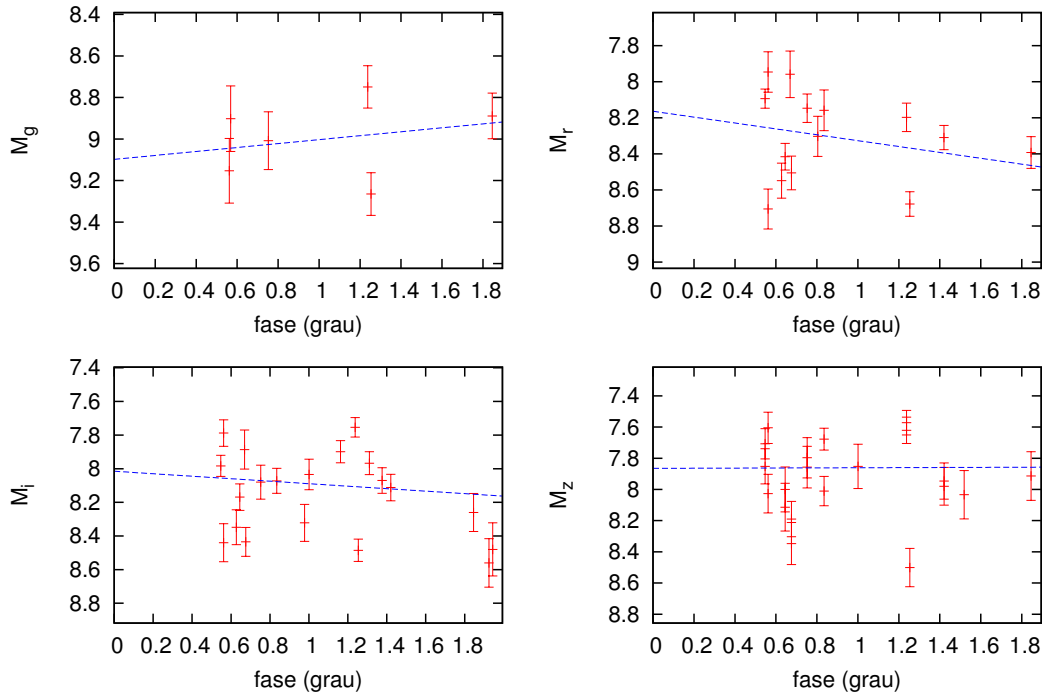


Figura 6.32: Fase versus magnitude reduzida para o TNO 2014 QM₄₄₁.

2014 QN441

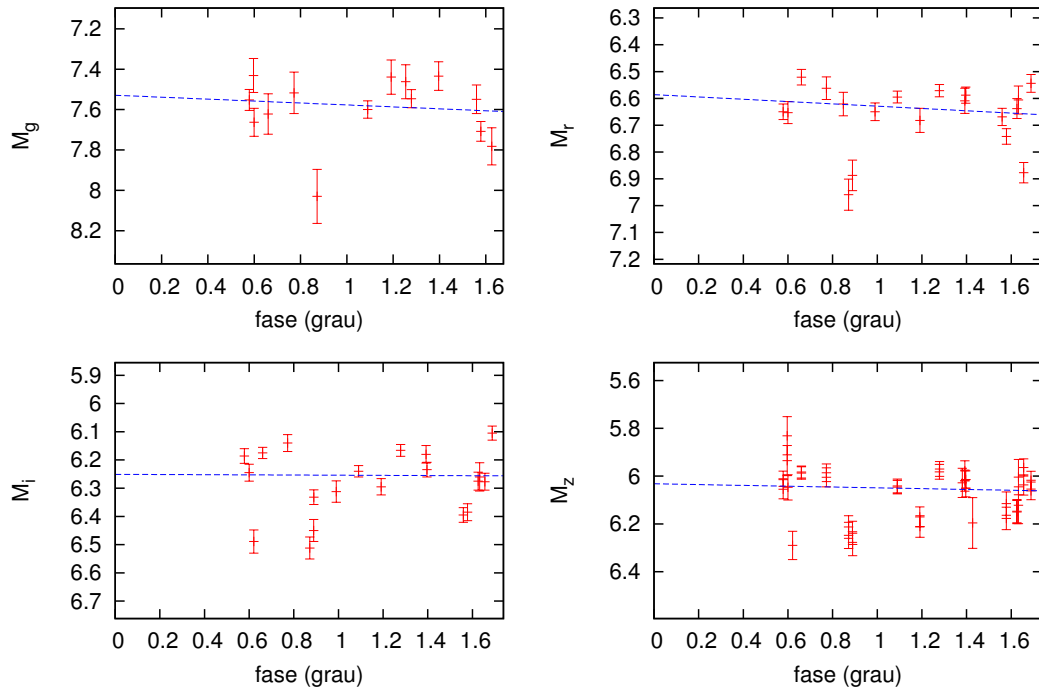


Figura 6.33: Fase versus magnitude reduzida para o TNO 2014 QN₄₄₁.

2014 QO441

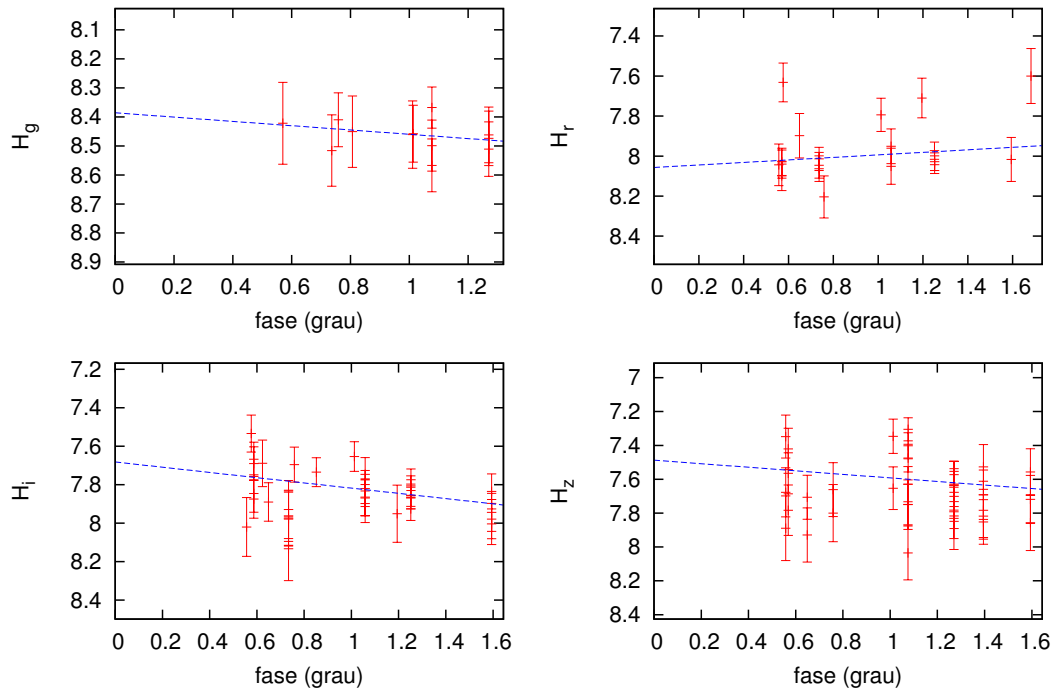


Figura 6.34: Fase versus magnitude reduzida para o Centauro 2014 QO₄₄₁.

2014 QR441

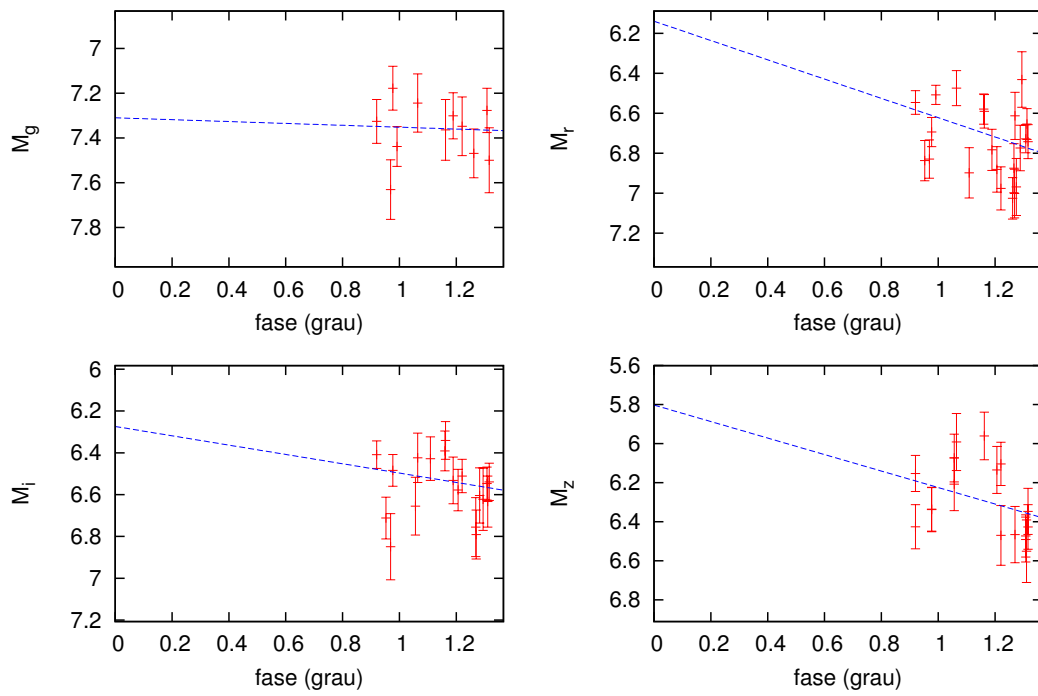


Figura 6.35: Fase versus magnitude reduzida para o TNO 2014 QR₄₄₁.

2014 QS441

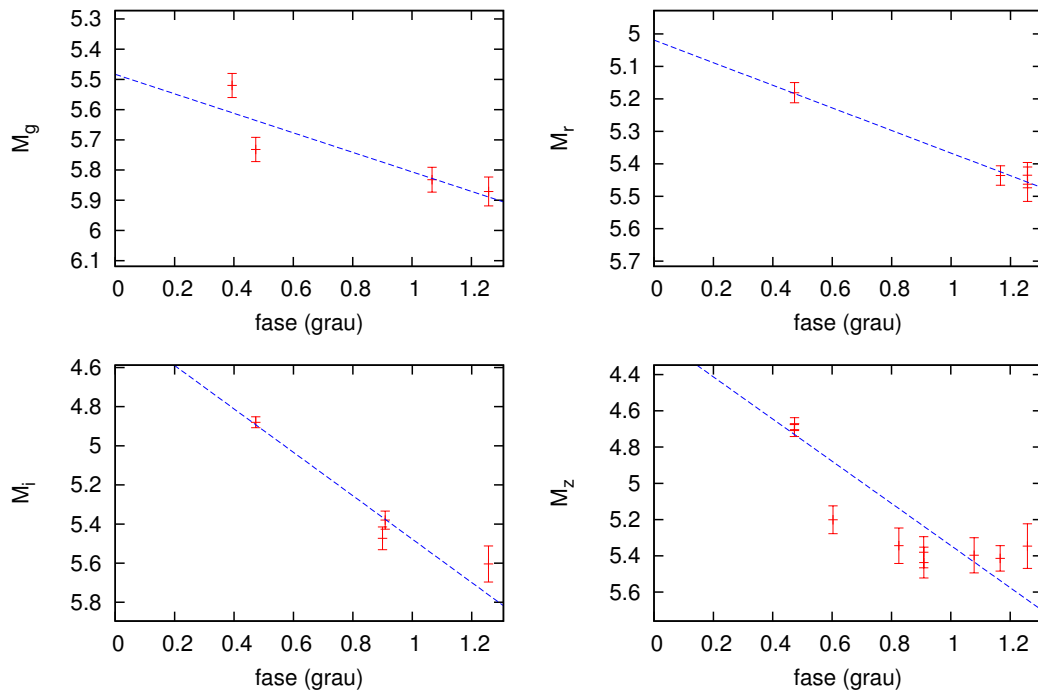


Figura 6.36: Fase versus magnitude reduzida para o TNO 2014 QS₄₄₁.

2014 SR303

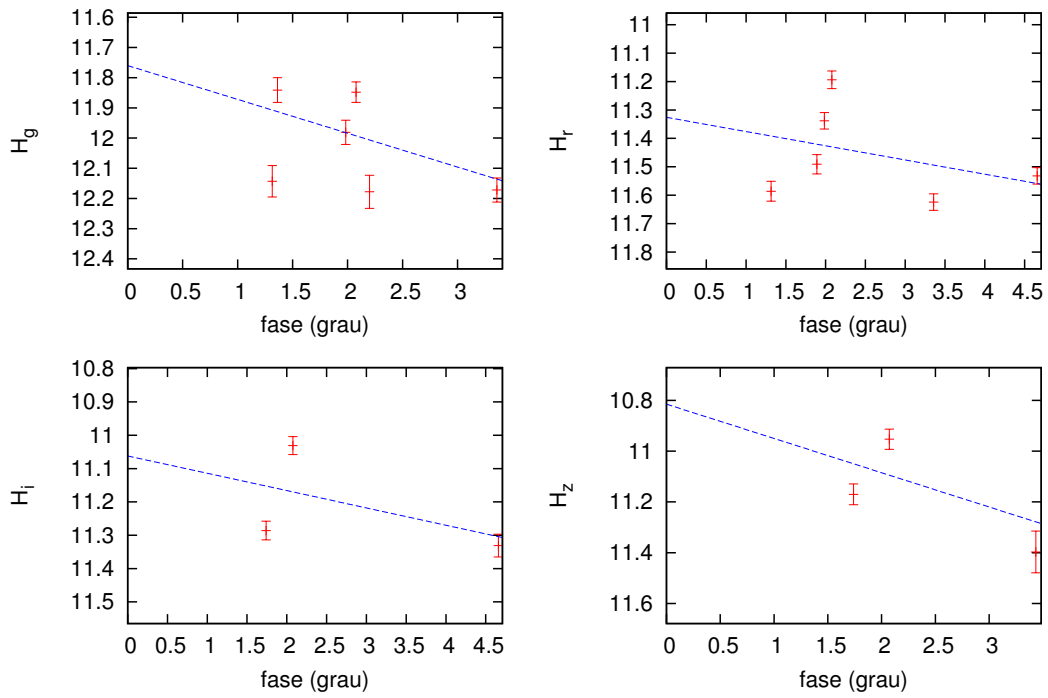


Figura 6.37: Fase versus magnitude reduzida para o Centauro 2014 SR₃₀₃.

2015 PF312

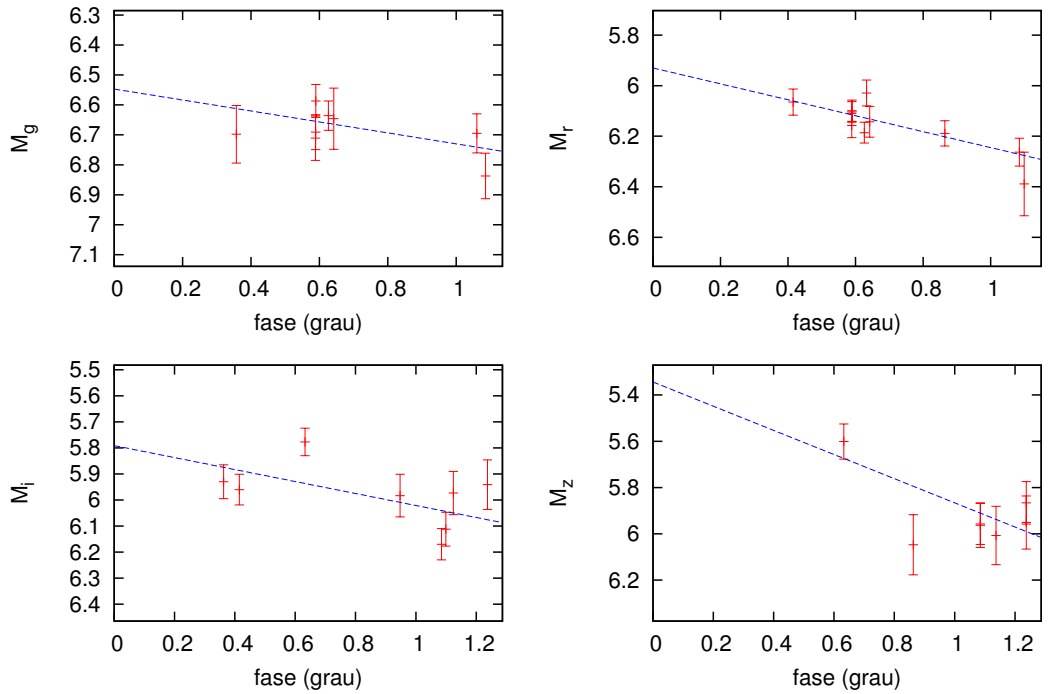


Figura 6.38: Fase versus magnitude reduzida para o TNO 2015 PF₃₁₂.

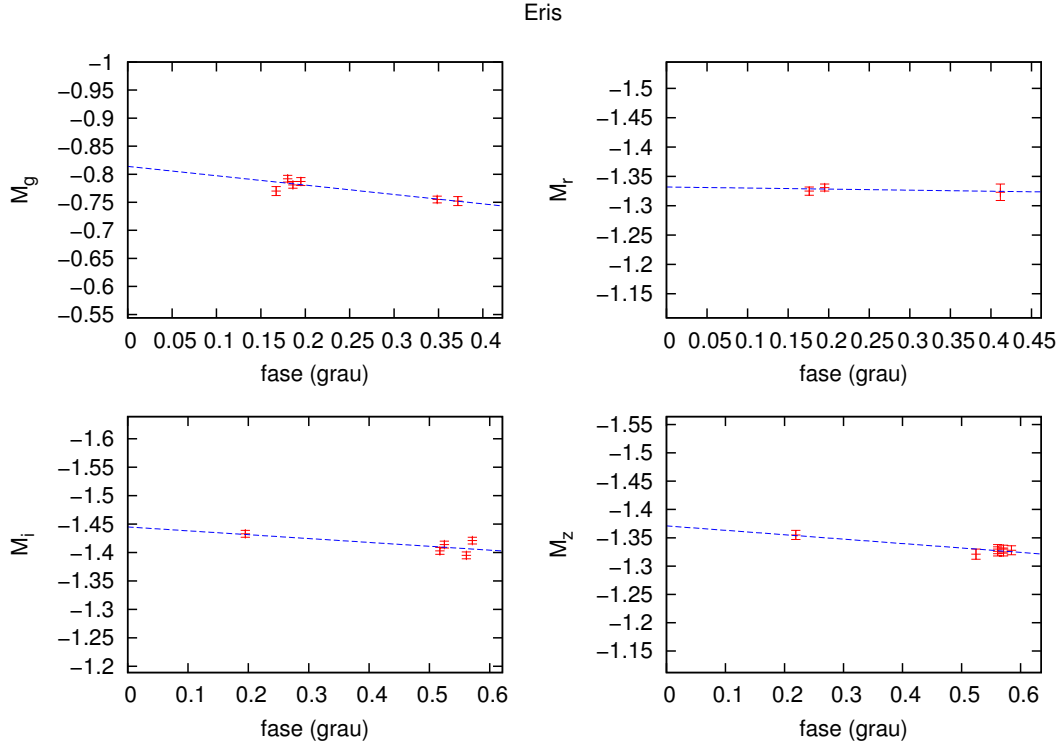


Figura 6.39: Fase versus magnitude reduzida para o TNO Eris.

6.1.3 Classificação taxonômica

FULCHIGNONI *et al.* (2008) apresentaram um esquema taxonômico para discriminar grupos de TNOs com base em suas fotometrias nos filtros BVRIJ. Para fazer isso foi desenvolvida uma técnica de agrupamento (estatística *G-mode*, veja FULCHIGNONI *et al.*, 2000). Uma descrição breve dessa técnica, também resumida por F. Demeo (tese de doutoramento)⁴, é dada a seguir.

Consideremos, utilizando a mesma notação e equações do artigo em questão, uma amostra de N_{tot} objetos. A técnica do *G-mode* agrupa essa amostra em J classes homogêneas. Cada objeto é descrito por M variáveis (índices de cor, por exemplo) i ($i = 1, \dots, M$).

Organiza-se os dados numa matriz $N_{\text{tot}} \times M$ e determina-se, entre outros, a média (\bar{x}_i) e o desvio padrão (σ_i^2) para cada variável. Com isso, uma dada classe J é representada pela variável z_j^2 , definida por

$$z_j^2 = \sum_{i=1}^M z_{ij}^2 = \sum_{i=1}^M \frac{(x_{ij} - \bar{x}_i)^2}{\sigma_i^2}. \quad (6.10)$$

As classes homogêneas são então identificadas através de um processo iterativo,

⁴<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00514550/document>

baseado num teste de pertinência da j -ésima classe a uma “classe zero” definida por

$$z_{p,q,t} = \sum_{i=1}^3 [(z_{pi} - z_{qi})^2 + (z_{pi} - z_{ti})^2 + (z_{qi} - z_{ti})^2], \quad (6.11)$$

onde z_{pi} , z_{ti} e z_{qi} são as variáveis que representam as três classes mais próximas que minimizam $z_{p,q,t}$.

Uma vez identificadas essas três classes, a média (x_*) e desvio padrão (σ_*) de cada variável nessas classes são calculados:

$$x_* = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 x_{ij} \quad (6.12)$$

$$\sigma_* = \left[\frac{1}{2} \sum_{j=1}^3 (x_{ij} - x_*)^2 \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (6.13)$$

Assim, testa-se a pertinência de uma dada amostra a uma classe definida pelas variáveis x_* e σ_* . Identificados completamente todos os elementos de uma classe a , ela é retirada da amostra total N_{tot} e o processo é retomado.

É importante notarmos que é através da equação 6.11 que se obtém a “semente” de um agrupamento. Em outras palavras, precisamos encontrar as três amostras próximas que minimizam o valor de $z_{p,q,t}$ e isto é feito por força bruta, como apontado por HASSELMANN *et al.* (2013), o que é custoso do ponto de vista computacional. Em consequência, esses autores propõem uma adaptação em *Python* da técnica de *G-mode* realizando, entre outros, uma busca mais rápida dessa semente. Essa adaptação é disponível publicamente e não tivemos sucesso em aplicá-la em nossa amostra de dados.

Desta forma, buscamos outros algoritmos para agrupamento para serem aplicados sobre o conjunto de índices de cor de nossos dados. Encontramos um tal procedimento no pacote R (R CORE TEAM, 2017).

Partition Around Medoids - PAM

A determinação de agrupamentos através do algoritmo PAM (KAUFMAN e ROUSSEEUW, 1990) passa pela noção de **dissimilaridade**, uma maneira de exprimir a distância entre elementos a partir de algum critério preestabelecido e que os caracterize. A dissimilaridade é um conceito chave quando se quer formar grupos desses elementos de forma que cada grupo possa representar um aspecto comum de seus elementos.

Uma visualização da dissimilaridade é dada com auxílio da figura 6.40 e da tabela 6.3. Essa tabela lista a distância entre os pontos azuis e vermelhos da figura 6.40 e

dois pontos tomados como referência.

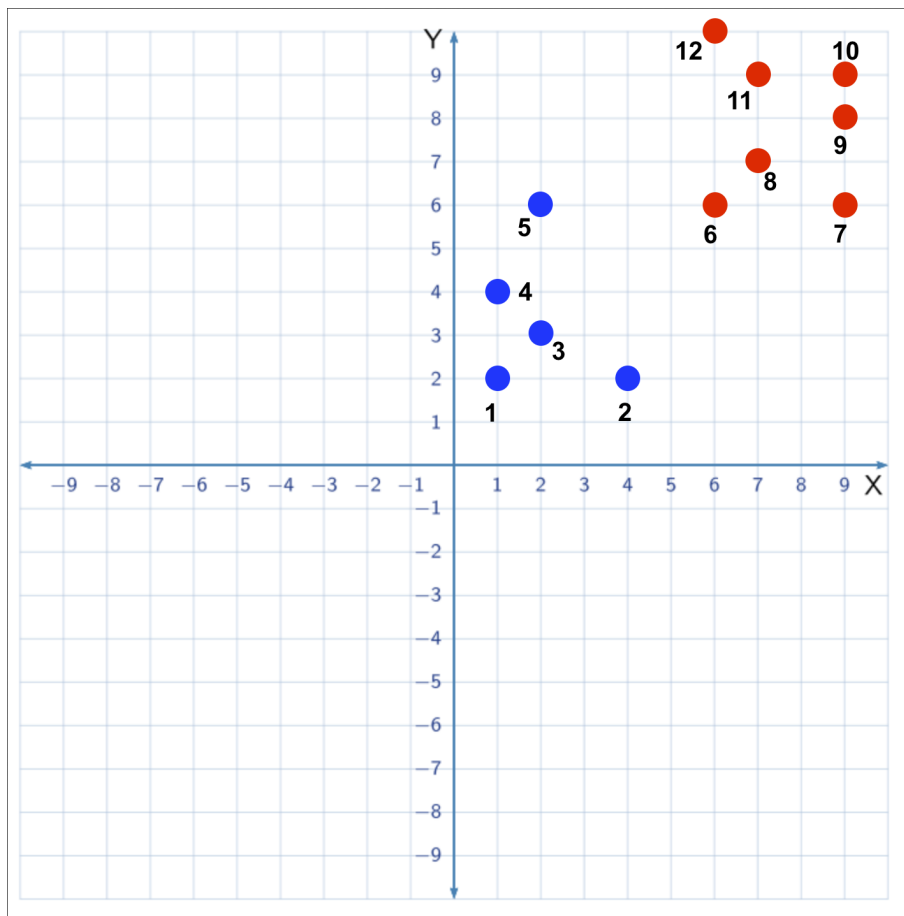


Figura 6.40: Grupos de objetos - azuis e vermelhos - para aplicação do conceito de dissimilaridade.

Id. do objeto	Distância ao objeto 5	Distância ao objeto 12	Distância mínima	Representante mais próximo
1	4,1	9,4	4,1	5
2	4,5	8,2	4,5	5
3	3,0	8,1	3,0	5
4	2,2	7,8	2,2	5
5	0,0	5,7	0,0	5
6	4,0	4,0	4,0	5 ou 12
7	7,0	5,0	5,0	12
8	5,1	3,2	3,2	12
9	7,3	3,6	3,6	12
10	7,6	3,2	3,2	12
11	5,8	1,4	1,4	12
12	5,7	0,0	0,0	12
		Média	2,9	

Tabela 6.3: Dissimilaridade entre os objetos da figura 6.40 com respeito aos objetos 5 e 12.

Id. do objeto	Distância ao objeto 3	Distância ao objeto 8	Distância mínima	Representante mais próximo
1	1,4	7,8	1,4	3
2	2,2	5,8	2,2	3
3	0,0	6,4	0,0	3
4	1,4	6,7	1,4	3
5	3,0	5,1	3,0	3
6	5,0	1,4	1,4	8
7	7,6	2,2	2,2	8
8	6,4	0,0	0,0	8
9	8,6	2,2	2,2	8
10	9,2	2,8	2,8	8
11	7,8	2,0	2,0	8
12	8,1	3,2	3,2	8
		Média	1,8	

Tabela 6.4: Dissimilaridade entre os objetos da figura 6.40 com respeito aos objetos 3 e 8.

No método utilizado pelo código *PAM* para determinação de agrupamentos,

deve-se fornecer um conjunto de dados e um número k . O conjunto de dados é apresentado, mais comumente, por uma matriz na qual as linhas correspondem aos objetos e as colunas correspondem às variáveis. O número k informa o número de agrupamentos a serem formados. Na figura 6.40, por exemplo, entende-se que k seja 2.

Com isto, *PAM* destina-se a procurar k objetos denominados *medóides*. O medóide é aquele objeto de um dado agrupamento que minimiza a média das diferenças (dissimilaridades) para todos os outros objetos do agrupamento. Considerando-se que há 2 grupos ($k = 2$) de pontos na figura 6.40, os medóides são dados pela tabela 6.4: 3 e 8. Aqui, vale pena ressaltar que medóides são elementos pertencentes ao conjunto de dados, em oposição a *centróides* que não necessariamente pertencem ao conjunto estudado.

As distâncias entre os pontos mostrados na figura 6.40 são frequentemente apresentados na forma matricial (matriz de dissimilaridade). Nela, cada elemento $a_{i,j}$ ($1 \leq i, j \leq 12$) é a distância entre pontos. Essa matriz é simétrica com diagonal principal nula.

***PAM* como auxiliar para encontrar classificação taxonômica**

Um passo a ser dado antes de tentarmos alguma classificação taxonômica com *PAM* é verificar como ele reproduz resultados já conhecidos na literatura. Vale reforçar que não é intenção deste trabalho redefinir ou estabelecer qualquer tipo de classificação taxonômica para pequenos corpos. Especificamente, aqui pretende-se apenas avaliar se, dado um conjunto de 3 cores para TNOs/Centauros, podemos obter uma segregação desses objetos em grupos a partir dessas cores com o método em questão e se essa segregação é útil para servir como indicador taxonômico.

Tal verificação foi efetuada a partir cores $V - R$, $V - I$ e $V - J$ disponíveis para 67 objetos constantes em FULCHIGNONI *et al.* (2008). Essas cores foram passadas ao código *PAM*. Os resultados são apresentados pela figura 6.41 e pela tabela 6.5. O uso de apenas essas 3 cores é justificando mais adiante no texto.

A figura 6.41 apresenta a segregação em 4 agrupamentos, dados pelas elipses coloridas e hachuradas. Essa segregação é convenientemente mostrada como função de suas componentes principais. Esses 4 agrupamentos podem ser associados às classes taxonômicas, como apresentadas em FULCHIGNONI *et al.* (2008), BB (grupo 1), BR (grupo 2), IR (grupo 3) e RR (grupo 4). Tais classes representam objetos com cores desde neutras (BB) até mais avermelhadas (RR) em comparação ao Sol.

Os números de 1 a 67 colocados nessa figura representam TNOs e Centauros dados na tabela 6.5. Essa tabela mostra ainda as classificações desses objetos segundo FULCHIGNONI *et al.* (2008), DEMEO *et al.* (2009), PERNA *et al.* (2010) e segundo o algoritmo *PAM*. Neste último, como mencionado anteriormente, foram

utilizadas 3 cores.

Representação em 2D da solução de cluster – pam+Euclidean – 3 cores

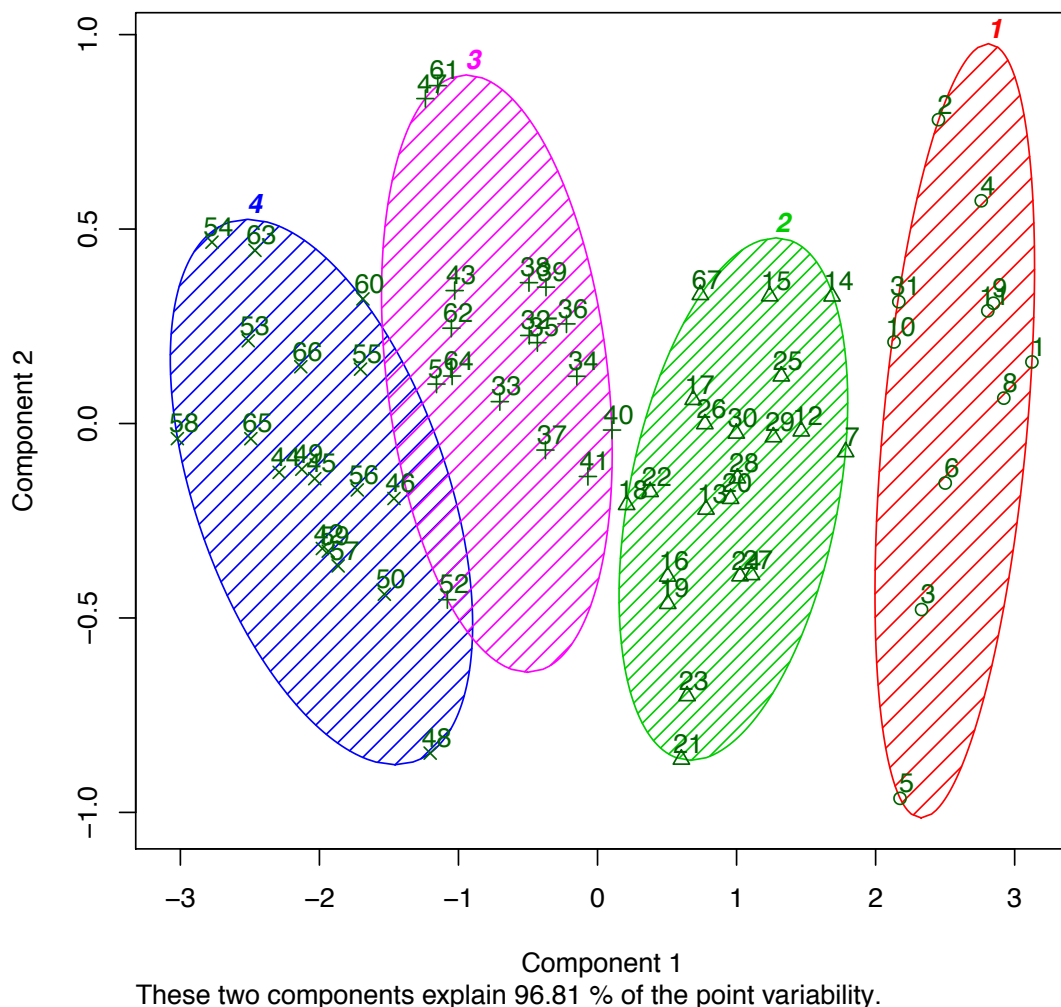


Figura 6.41: Agrupamento, com utilização das cores $V - R$, $V - I$ e $V - J$, obtido com o algoritmo PAM para os dados de FULCHIGNONI *et al.* (2008).

N	Objeto	PAM	Fulchignoni <i>et al.</i> 2008	DeMeo <i>et al.</i> 2009	Perna <i>et al.</i> 2010
1	(136108) 2003 EL ₆₁	BB	BB		
2	(136199) Eris	BB	BB	BB	BB
3	(15874) 1996 TL ₆₆	BB	BB		
4	(19308) 1996 TO ₆₆	BB	BB		
5	2000 PE ₃₀	BB	BB		
6	2001 QF ₂₉₈	BB	BB		
7	2003 AZ ₈₄	BR	BB	BB	BB
8	(2060) Chiron	BB	BB		

9	(24835) 1995 SM ₅₅	BB	BB		
10	(35671) 1998 SN ₁₆₅	BB	BB		
11	(90482) Orcus	BB	BB		BB
12	2001 CZ ₃₁	BR	BB-		
13	(10199) Chariklo	BR	BR	BR, BB	BB
14	(10370) Hylonome	BR	BR		
15	(15788) 1993 SB	BR	BR		
16	(19299) 1996 SZ ₄	BR	BR		
17	1998 WU ₂₄	BR	BR		
18	1999 CD ₁₅₈	BR	BR		
19	(29981) 1999 TD ₁₀	BR	BR		
20	(32532) Thereus	BR	BR	BB	
21	(32929) 1995 QY ₉	BR	BR		
22	(42355) 2002 CR ₄₆	BR	BR		
23	(52872) Okyrhoe	BR	BR		BR, IR
24	(54598) Bienor	BR	BR	BR	
25	(60558) Echeclus	BR	BR	BR, BB	
26	(63252) 2001 BL ₄₁	BR	BR		
27	(82075) 2000 YW ₁₃₄	BR	BR		
28	(8405) Asbolus	BR	BR		
29	(91133) 1998 HK ₁₅₁	BR	BR		
30	(95626) 2002 GZ ₃₂	BR	BR		
31	(24952) 1997 QJ ₄	BB	BR, BB		
32	(19521) Chaos	IR	IR		
33	(20000) Varuna	IR	IR		
34	(26375) 1999 DE ₉	IR	IR		
35	(28978) Ixion	IR	IR	BB	
36	(33340) 1998 VG ₄₄	IR	IR		
37	(38628) Huya	IR	IR		
38	(47932) 2000 GN ₁₇₁	IR	IR	BR, IR	
39	(55565) 2002 AW ₁₉₇	IR	IR	IR, RR	
40	(55637) 2002 UX ₂₅	IR	IR	RR, IR	RR
41	(82155) 2001 FZ ₁₇₃	IR	IR		
42	(118228) 1996 TQ ₆₆	RR	RR		
43	(134860) 2000 OJ ₆₇	IR	RR		
44	(15789) 1993 SC	RR	RR		
45	(15820) 1994 TB	RR	RR		
46	(15875) 1996 TP ₆₆	RR	RR		
47	1996 TS ₆₆	IR	RR		

48	2000 OK ₆₇	RR	RR		
49	(26181) 1996 GQ ₂₁	RR	RR		
50	(26308) 1998 SM ₁₆₅	RR	RR		
51	(31824) Elatus	IR	RR		
52	(33128) 1998 BU ₄₈	IR	RR		
53	(40314) 1999 KR ₁₆	RR	RR		
54	(42301) 2001 UR ₁₆₃	RR	RR		
55	(44594) 1999 OX ₃	RR	RR		RR
56	(47171) 1999 TC ₃₆	RR	RR	RR	
57	(48639) 1995 TL ₈	RR	RR		
58	(5145) Pholus	RR	RR		RR
50	(52975) Cyllarus	RR	RR		
60	(55576) Amycus	RR	RR		RR,IR
61	(58534) Logos	IR	RR		
62	(66652) 1999 RZ ₂₅₃	IR	RR		
63	(7066) Nessus	RR	RR		
64	(79360) 1997 CS ₂₉	IR	RR		
65	(83982) Crantor	RR	RR		
66	(90377) Sedna	RR	RR		RR
67	(87555) 2000 QB ₂₄₃	BR	U		

Tabela 6.5: Coluna (1): Número do objeto associado à figura 6.41. Coluna (2): Identificação do objeto. Coluna (3): Classificação obtida com o algoritmo *PAM*. Coluna (4): Classificação oriunda de FULCHIGNONI *et al.* (2008). O objeto 2000 QB₂₄₃ não foi atribuído a classe alguma naquele trabalho. Coluna (5): Classificação oriunda de PERNA *et al.* (2010). Coluna (6): Classificação oriunda de DEMEO *et al.* (2009).

Nota-se, através da tabela 6.5, que é possível agrupar objetos utilizando-se 3 cores e associar esses grupos a uma classificação taxonômica estabelecida na literatura.

Neste contexto, tomamos todos aqueles objetos deste trabalho, e para os quais ao menos 3 cores $-g - r$, $g - i$, $g - z$ – foram obtidas, para buscarmos associar uma classificação taxonômica a eles. Estes objetos são listados na tabela 6.6 seguindo o agrupamento oriundo da figura 6.42 via algoritmo *PAM*.

Vale notar que a cadência irregular das observações desses objetos, por conta de sua rotação, inspira maior atenção na determinação de índices de cor. De fato, a variação da magnitude do objeto, como função de sua rotação, torna imprudente a determinação índices de cor a partir de magnitudes que foram obtidas em fases rotacionais diferentes. Uma alternativa passa pela determinação de índices de cor

a partir das magnitudes absolutas em diferentes filtros. Estas magnitudes podem ser obtidas através das respectivas magnitudes aparentes, do ângulo de fase e do conhecimento das distâncias heliocêntricas e ao observador dos objetos.

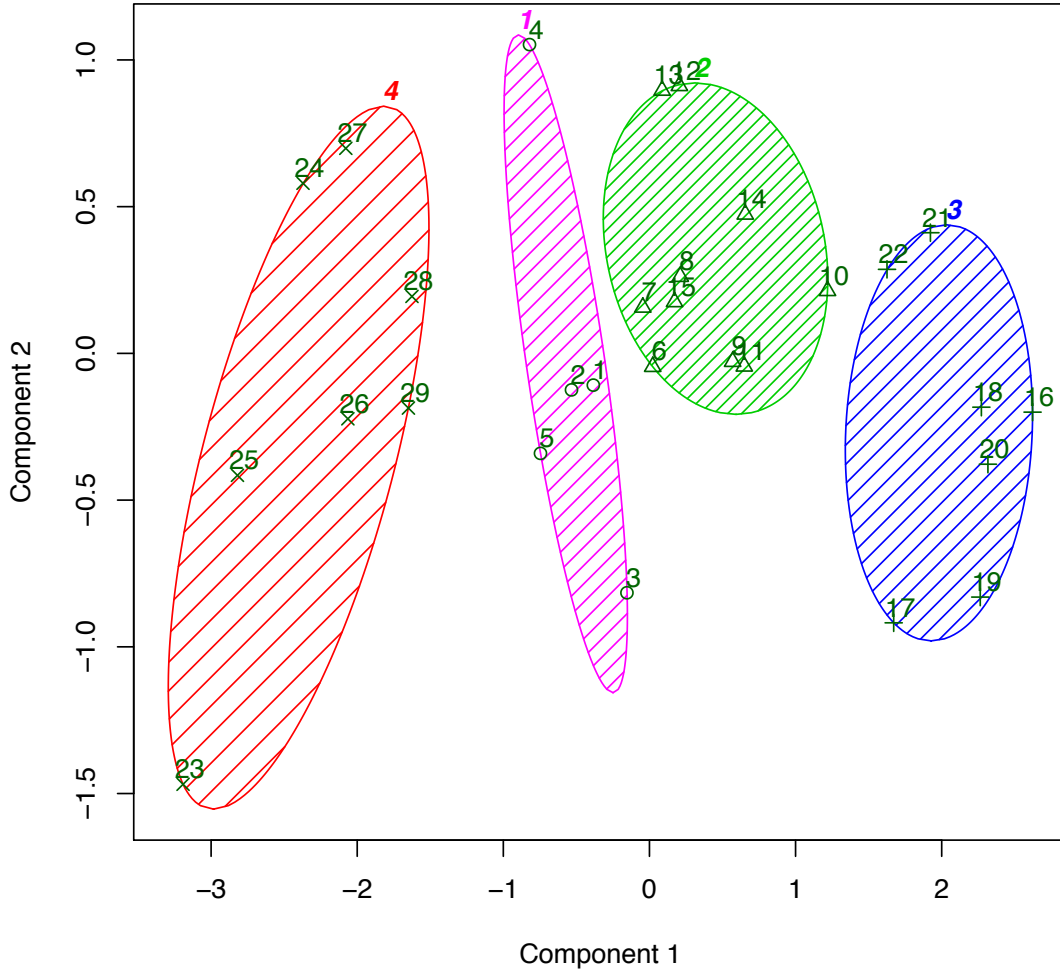
Para o cálculo da magnitude absoluta, utilizamos a seguinte simplificação da equação 6.1

$$H = m - 5 \log R\Delta - \alpha\beta, \quad (6.14)$$

onde α é o ângulo de fase e β é o coeficiente angular (inclinação de fase) da relação $(\alpha, m - 5 \log R\Delta)$. Vale enfatizar que, R , Δ , m e α são aqueles associados à posição astrométrica ocupada pelo corpo no instante da observação. A escolha por um ajuste linear, através do termo $\alpha\beta$, é justificado pelo comportamento da relação $(\alpha, m - 5 \log R\Delta)$ de nossos dados.

Aqui, é necessário mencionar discussões feitas em, por exemplo, BELSKAYA *et al.* (2008), PERNA *et al.* (2013) e referências lá contidas. Mais especificamente, é colocado em evidência um desvio de 0,1 magnitudes com respeito ao ajuste linear. Esse desvio, devido ao efeito de oposição, ocorre para $\alpha \lesssim 0,1^\circ - 0,2^\circ$. Não temos observações em ângulos de fase tão pequenos e, de todo modo, decidimos não aplicar essa correção de 0,1 mag sobre o valor de H (equação 6.14). Visto que nossas aplicações mais sensíveis envolverão índices de cor, decidimos não considerar correções às magnitudes absolutas.

Cluster 2D solution



These two components explain 95.47 % of the point variability.

Figura 6.42: Agrupamento, com utilização das cores $g-r$, $g-i$ e $g-z$, obtida com o algoritmo *PAM* para observações realizadas com o DES.

N	Objeto	PAM	Tax	Grad (%)	$g-r$	$g-i$	$g-z$	Classe
1	1999 RB ₂₁₆	lilás	IR-BR	18 (± 2)	0,8 ($\pm 0, 1$)	1,1 ($\pm 0, 1$)	1,2 ($\pm 0, 2$)	Resonant1:2
2	2004 TY ₃₆₄	lilás	BR-IR	19 (± 8)	0,96 ($\pm 0, 03$)	0,89 ($\pm 0, 05$)	1,30 ($\pm 0, 05$)	Classical
3	2005 TB ₁₉₀	lilás	IR	11 (± 7)	0,85 ($\pm 0, 03$)	1,12 ($\pm 0, 02$)	1,0 ($\pm 0, 3$)	Detached
4	2008 SO ₂₆₆	lilás		35 (± 11)	0,76 ($\pm 0, 05$)	0,97 ($\pm 0, 06$)	1,6 ($\pm 0, 1$)	Resonant2:3
5	2014 QM ₄₄₁	lilás		18 (± 4)	0,9 ($\pm 0, 2$)	1,1 ($\pm 0, 2$)	1,2 ($\pm 0, 2$)	Resonant2:3*
6	2013 TV ₁₅₈	verde		16,4 ($\pm 0, 8$)	0,73 ($\pm 0, 03$)	1,00 ($\pm 0, 03$)	1,14 ($\pm 0, 03$)	Outer Centaur
7	2013 RO ₉₈	verde		19 (± 1)	0,7 ($\pm 0, 2$)	1,0 ($\pm 0, 2$)	1,2 ($\pm 0, 2$)	Detached
8	2012 VR ₁₁₃	verde		18 (± 2)	0,7 ($\pm 0, 1$)	0,9 ($\pm 0, 1$)	1,2 ($\pm 0, 1$)	Resonant1:2
9	2012 VS ₁₁₃	verde		13 (± 1)	0,7 ($\pm 0, 1$)	0,9 ($\pm 0, 1$)	1,1 ($\pm 0, 1$)	Detached
10	2012 VU ₁₁₃	verde		12 (± 3)	0,5 ($\pm 0, 4$)	0,7 ($\pm 0, 4$)	1,0 ($\pm 0, 4$)	Resonant2:3*
11	2013 QP ₉₅	verde		12,7 ($\pm 0, 6$)	0,65 ($\pm 0, 09$)	0,87 ($\pm 0, 08$)	1,04 ($\pm 0, 08$)	Classical
12	2013 RD ₉₈	verde		24 (± 6)	0,5 ($\pm 0, 3$)	0,9 ($\pm 0, 2$)	1,3 ($\pm 0, 3$)	Resonant2:3*
13	2014 QS ₄₄₁	verde		25 (± 6)	0,46 ($\pm 0, 07$)	1,12 ($\pm 0, 08$)	1,30 ($\pm 0, 07$)	Classical
14	2015 PF ₃₁₂	verde		17 (± 6)	0,6 ($\pm 0, 1$)	0,8 ($\pm 0, 1$)	1,2 ($\pm 0, 2$)	Classical
15	2014 QL ₄₄₁	verde		17 (± 1)	0,68 ($\pm 0, 08$)	0,95 ($\pm 0, 08$)	1,18 ($\pm 0, 08$)	Detached
16	2001 QF ₂₉₈	azul	BB	2 (± 3)	0,4 ($\pm 0, 1$)	0,5 ($\pm 0, 1$)	0,7 ($\pm 0, 1$)	Resonant2:3
17	2007 RW ₁₀	azul		2 (± 3)	0,68 ($\pm 0, 06$)	0,65 ($\pm 0, 05$)	0,67 ($\pm 0, 09$)	Outer Centaur
18	2013 RM ₉₈	azul		4 (± 2)	0,4 ($\pm 0, 1$)	0,56 ($\pm 0, 08$)	0,7 ($\pm 0, 3$)	Classical
19	Eris	azul	BB	0 (± 2)	0,52 ($\pm 0, 02$)	0,63 ($\pm 0, 01$)	0,56 ($\pm 0, 02$)	Detached
20	2013 RG ₉₈	azul		2 (± 2)	0,5 ($\pm 0, 2$)	0,5 ($\pm 0, 2$)	0,7 ($\pm 0, 2$)	Centaur*
21	2014 QO ₄₄₁	azul		9 (± 4)	0,3 ($\pm 0, 2$)	0,7 ($\pm 0, 2$)	0,9 ($\pm 0, 2$)	NepTrojL4*
22	2014 SR ₃₀₃	azul		10 (± 3)	0,43 ($\pm 0, 06$)	0,70 ($\pm 0, 07$)	0,9 ($\pm 0, 1$)	Centaur*

23	2005 PU ₂₁	vermelho	RR	25 (± 23)	1,4 ($\pm 0, 4$)	1,7 ($\pm 0, 1$)	1,3 ($\pm 0, 2$)	Outer Centaur
24	2003 QW ₉₀	vermelho	RR	43 (± 1)	1,0 ($\pm 0, 1$)	1,4 ($\pm 0, 1$)	1,7 ($\pm 0, 2$)	Classical
25	2012 TC ₃₂₄	vermelho		34 (± 11)	1,20 ($\pm 0, 09$)	1,55 ($\pm 0, 09$)	1,5 ($\pm 0, 2$)	Resonant3:5
26	2013 QO ₉₅	vermelho		30 (± 6)	1,1 ($\pm 0, 1$)	1,4 ($\pm 0, 1$)	1,5 ($\pm 0, 1$)	Classical
27	2014 QB ₄₄₂	vermelho		42 (± 10)	1,03 ($\pm 0, 2$)	1,2 ($\pm 0, 2$)	1,8 ($\pm 0, 4$)	Detached
28	2014 QN ₄₄₁	vermelho		31 (± 1)	0,94 ($\pm 0, 06$)	1,28 ($\pm 0, 06$)	1,50 ($\pm 0, 06$)	Other TNO*
29	2014 QR ₄₄₁	vermelho		27 (± 12)	1,2 ($\pm 0, 3$)	1,0 ($\pm 0, 3$)	1,5 ($\pm 0, 3$)	SDO*

Tabela 6.6: Coluna (1): Número do objeto associado à figura 6.42. Coluna (2): Identificação do objeto. Coluna (3): Cor do agrupamento oriundo do código *PAM*: azul (BB), verde (BR), lilás (IR), vermelho (RR). Coluna (4): Classificação oriunda de <http://www.johnstonsarchive.net/astro/tnoslist.html>. Coluna (5): gradiente espectral (porcentagem). Colunas (6)-(8): índices de cor e respectivas incertezas. Coluna (9): Classe dinâmica como obtida de KHAIN *et al.* (2020) (sem *) ou de <http://www.johnstonsarchive.net/astro/tnoslist.html> (com *).

Vale notar, na tabela 6.6 que encontramos poucos objetos com taxonomia já determinada na literatura. No entanto, os poucos objetos encontrados, combinados aos agrupamentos aos quais pertencem, apontam para a seguinte relação (colunas 1 e 2 da tabela):

Agrupamento	Classe	$\langle g - r \rangle$	$\langle g - i \rangle$	$\langle g - z \rangle$
azul	BB	$0,5 \pm 0,1$	$0,60 \pm 0,09$	$0,7 \pm 0,1$
verde	BR	$0,62 \pm 0,08$	$0,9 \pm 0,12$	$1,2 \pm 0,1$
lilás	IR	$0,86 \pm 0,08$	$1,02 \pm 0,09$	$1,3 \pm 0,2$
vermelho	RR	$1,1 \pm 0,2$	$1,4 \pm 0,2$	$1,5 \pm 0,1$

Tabela 6.7: Coluna (1): Agrupamento determinado pelo algoritmo *PAM*. Coluna (2): Classe taxonômica ao qual foram associadas. Colunas (3) a (5): cores médias e respectivos desvios padrão para cada classe.

Um espectro de reflectância (equação 6.15) de muito baixa resolução pode ser obtido através dos índices de cor (DORESSOUNDIRAM *et al.*, 2008):

$$E_F = 10^{-0.4(M_F - M_{F\odot})}, \quad (6.15)$$

onde M_F é a magnitude do alvo e $M_{F\odot}$ é a magnitude do Sol no mesmo filtro. Frequentemente, a reflectância é normalizada em 1 para um dado comprimento de onda. Se tomarmos esse comprimento de onda como sendo aquele central no filtro g , teremos (equação 6.16) (DORESSOUNDIRAM *et al.*, 2008)

$$\overline{E}_F = 10^{-0.4(M_F - M_g) - (M_{F\odot} - M_{g\odot})}. \quad (6.16)$$

Os comprimentos de onda centrais para os filtros utilizados no DES, bem como a magnitude do Sol nesses filtros são dados na tabela 6.8.

	<i>u</i>	<i>g</i>	<i>r</i>	<i>i</i>	<i>z</i>	<i>Y</i>
λ_c	350	475	635	775	925	
Sol	-25,4296	-26,5071	-26,9587	-27,0478	-27,0542	-27,0588

Tabela 6.8: Comprimentos de ondas centrais (em nanômetros) e magnitudes solares para os filtros utilizados pelo DES.

Com a equação 6.16, a tabela 6.8 e as magnitudes de TNOs e Centauros em diferentes filtros (*g,r,i,z*, no presente caso), podemos determinar um comportamento geral de $\overline{E_F}$ para as diferentes classes taxonômicas. Esse comportamento é dado pela tabela 6.9 e pela figura 6.43.

Tipo	635	775	925
BB	$1,0 \pm 0,1$	$1,06 \pm 0,09$	$1,2 \pm 0,2$
BR	$1,17 \pm 0,09$	$1,4 \pm 0,2$	$1,8 \pm 0,2$
IR	$1,5 \pm 0,1$	$1,6 \pm 0,1$	$1,9 \pm 0,4$
RR	$1,8 \pm 0,3$	$2,2 \pm 0,4$	$2,5 \pm 0,3$

Tabela 6.9: Comportamento de $\overline{E_F}$ em cada classe taxonômica.

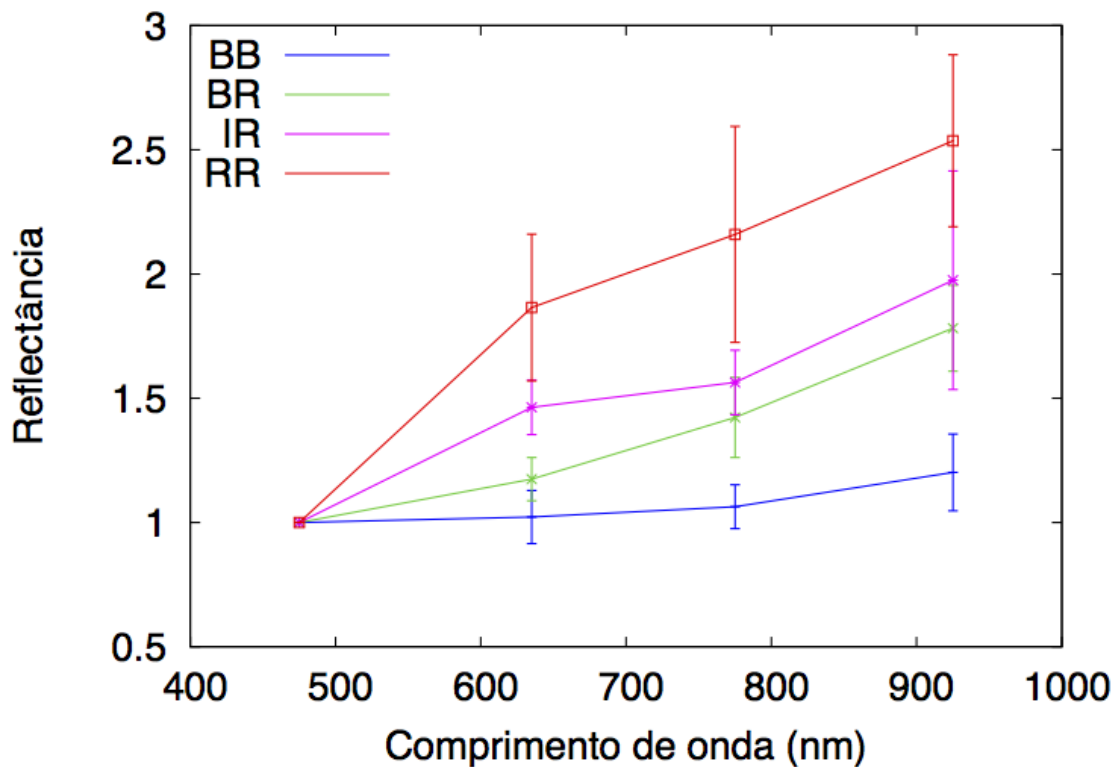


Figura 6.43: Espectro de reflectância para os objetos listados na tabela 6.6, segundo o agrupamento dado pela figura 6.42.

É interessante notar que quase todos os Centauros contidos em nossa amostra estão na classe BB (espectros mais neutros em relação ao espectro solar).

Nota-se também, na figura 6.43, que sempre há superposição de barras de erro, quaisquer que sejam os comprimentos de onda centrais (635, 775 ou 925 nm). Uma situação desejável seria, por exemplo, que as barras em 1σ não se tocassem (ao menos, para um desses comprimentos de onda, como ocorre em figura similar de FULCHIGNONI *et al.* (2008) no filtro I). Neste contexto, valem alguns comentários.

As cores utilizadas são oriundas, como justificado anteriormente, das magnitudes absolutas. Estas últimas foram obtidas sem levar em conta - apesar de nossos esforços - a rotação dos corpos. Isto degrada a qualidade da magnitude observada e contribui para aumentar as barras de erro apresentadas na figura 6.43. Por outro lado, vale observar a quinta coluna da tabela 6.6. Essa coluna apresenta, para cada objeto, o gradiente espectral.

Como apresentado por DELSANTI *et al.* (2001); HAINAUT e DELSANTI (2002), esse gradiente (porcentagem de avermelhamento por 100 nm) é definido por

$$S_{\lambda_1, \lambda_2} = \frac{\overline{E_{\lambda_2}} - \overline{E_{\lambda_1}}}{\lambda_2 - \lambda_1} \times 10^4, \quad (6.17)$$

com $\lambda_{1,2}$ em nanômetros.

Na tabela 6.6, o gradiente espectral de cada objeto foi calculado ajustando-se por mínimos quadrados uma reta em seus respectivos espectros de reflectância (equação 6.16). Os valores obtidos são coerentes com aqueles em PEIXINHO *et al.* (2015).

Segundo BOEHNHARDT *et al.* (2001), esses gradientes situam-se entre 0%/100 nm e 40%/100 nm para a maioria dos TNOs, com valores $< 20\%/100$ nm para os Centauros e Plutinos (ressonantes 3:2 na tabela 6.6) de espectro mais neutro e valores entre 30%/100 nm e 40%/100 nm para os mais avermelhados. A maioria dos Cubewanos (clássicos na tabela 6.6) ficam entre 20% – 40%/100 nm. Nesse contexto, vemos, por exemplo, que o TNO (504555) 2008 SO₂₆₆ possui um gradiente espectral que difere (1σ) da maioria daqueles em sua classe (lilás - IR). Como teste, recalculamos as barras de erro na figura 6.43 para a classe IR sem o objeto (504555) 2008 SO₂₆₆ e não houve grandes alterações. Certamente, com a inclusão dos dados fotométricos dos anos de 4 a 6 do DES bem como a inclusão de novos objetos, deveremos ter um cenário mais preciso. Não obstante, os resultados apresentados já mostram uma contribuição relevante para objetos ainda não considerados na literatura.

Levantamentos fotométricos (2MS - DORESSOUNDIRAM *et al.*, 2005), (OSSOS - BANNISTER *et al.*, 2016, 2018, por exemplo) de TNOs têm permitido, entre outros, a busca de correlações entre parâmetros orbitais e índices de cor. Esses levantamentos cobrem o visível e o início do infravermelho próximo ($\lambda = 1,25 \mu\text{m}$).

A classificação dinâmica dos TNOs é complexa (por exemplo, GLADMAN *et al.*, 2008). Essa complexidade pode ser explicada pela migração dos planetas exteriores (Modelo de Nice - TSIGANIS *et al.*, 2005; MORBIDELLI *et al.*, 2005; GOMES *et al.*, 2005) formando, entre outros, os TNOs frios (baixas excentricidade e inclinação), “quentes” (altas inclinações e excentricidades) e espalhados (altas excentricidades, semi-eixos maiores além de Netuno).

A figura 6.44 apresenta o comportamento da inclinação como função do índice $g - r$ (cor com menor incerteza entre aquelas apresentadas na tabela 6.6). Para avaliarmos a aparente correlação⁵ dada por essa figura, o coeficiente de correlação de Pearson (por exemplo, FEIGELSON e BABU, 2012) foi determinado e seu valor foi $-0,592$ para uma amostra de 27 elementos. A amostra total possui 29 elementos mas eliminamos aqueles em vermelho na figura 6.44 por considerá-los pontos fora da reta numa correlação que salta aos olhos. Neste caso, o *valor-p* - ou valor de probabilidade - é $0,0005$. Essa correlação também é apontada pelo teste de Spearman. Assim, há forte indicação para se descartar a hipótese de não correlação entre as variáveis. Desde já, informamos que a estratégia observacional do DES não foi concebida pensando em TNOs. Em particular, a maior parte do *footprint* (figura 4.1) do levantamento encontra-se fora da eclíptica. Ou seja, os dados são dominados por latitudes eclípticas altas.

Essa anticorrelação já foi notada em trabalhos anteriores (DELSANTI *et al.*, 2004; DORESSOUNDIRAM *et al.*, 2008; SANTOS-SANZ *et al.*, 2009; MARSSET *et al.*, 2019; ALVAREZ-CANDAL *et al.*, 2019, para citar alguns). Vale observar que ela vale, com exceção de dois objetos (2014 SR₃₀₃ e 2014 QR₄₄₁), para toda a nossa amostra (desde os mais azuis até os mais vermelhos). Ressalta-se que a eliminação desses objetos deu-se para melhor avaliação da correlação (que salta aos olhos), não indicando qualquer problema com suas medidas fotométricas. Ainda, a pequena quantidade de objetos considerada não estimula conclusões envolvendo diferentes classificações dinâmicas.

⁵Testes efetuados em <https://www.socscistatistics.com/tests/>.

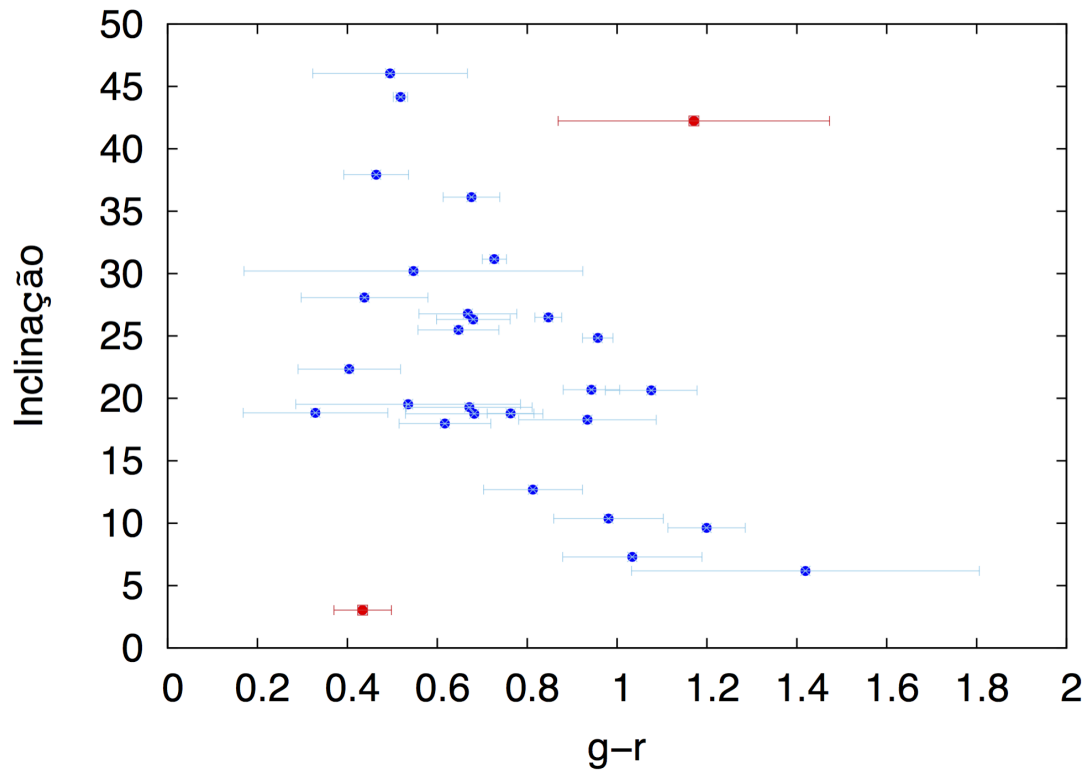


Figura 6.44: Índice $g - r$ versus inclinação. Os pontos em vermelho não foram utilizados para correlação. Inclinações foram obtidas do Minor Planet Center. As barras de erro possuem um comprimento total de 2σ .

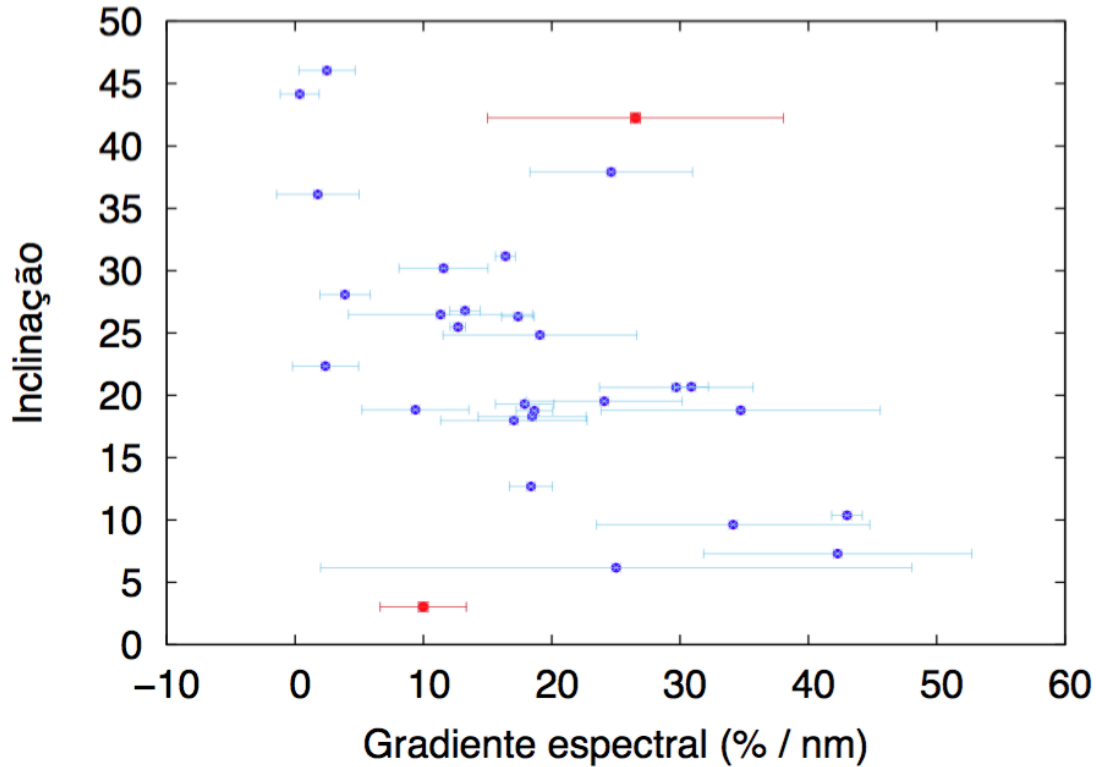


Figura 6.45: Gradiente espectral versus inclinação. Inclinações foram obtidas do Minor Planet Center. As barras de erro possuem um comprimento total de 2σ .

O quadro geral apresentado pela figura 6.44 mostra que objetos mais vermelhos tendem a possuir inclinações menores. Esse comportamento é corroborado pela figura 6.45. É pequeno o número de Centauros de nossa amostra e, por isso, apenas podemos dizer que essa tendência está mais certamente associada aos TNOs. Neste ponto ressalta-se, como seria de se esperar, que a classe RR (vermelho, ver tabela 6.6) é aquela na qual concentram-se os objetos de menor inclinação (exceção feita a 2014 QR₄₄₁ - objeto vermelho com $i = 42, 2^\circ$). Justamente, o outro objeto eliminado na determinação da correlação inclinação $\times (g - r)$, 2014 SR₃₀₃, possui $i = 3, 0^\circ$ e foi classificado como BB.

A figura 6.46 mostra o comportamento da cor $g - r$ como função da magnitude absoluta em r . A estrutura bimodal relatada por PEIXINHO *et al.* (2012) em figura semelhante não é notada em nossos dados embora não possa ser descartada. Essa bimodalidade é apresentada como sendo propriedade de pequenos TNOs ($H_R \gtrsim 7$), independentemente de sua classe dinâmica. Se também adotarmos esse valor como referência, vemos que nossa amostra têm poucos objetos classificados como pequenos ($D \lesssim 165 \text{ km}$), o que dificultaria visualizar a bimodalidade.

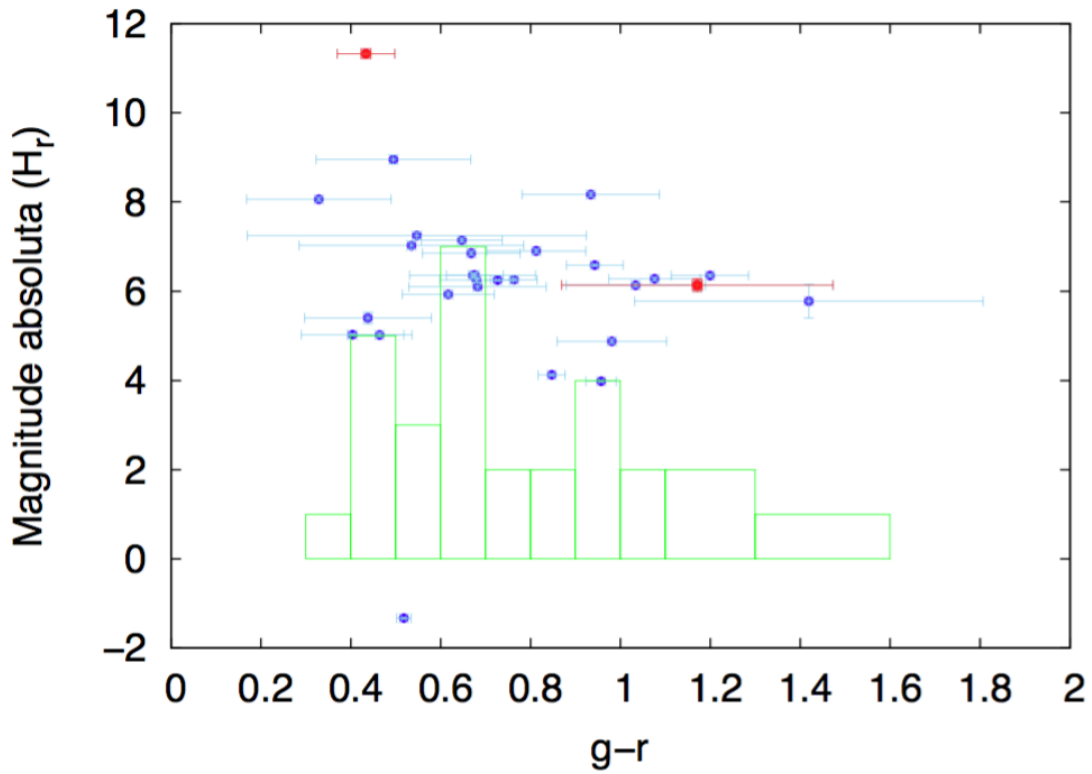


Figura 6.46: Cor $g - r$ versus magnitude absoluta em r . Os pontos em vermelho são aqueles eliminados na figura 6.44. As barras de erro ao longo do eixo das ordenadas é, em geral, pequeno em comparação com o H_r e não fica visível na figura. Em verde, um histograma (bin = 0,1) para guiar os olhos sobre a distribuição da contagem dos índices de cor.

Capítulo 7

Conclusões e perspectivas futuras

Utilizamos 4.292.847 frames CCD individuais da colaboração DES para pesquisar todos os pequenos corpos conhecidos no Sistema Solar. Eles representam uma enorme quantidade de dados de alta qualidade, obtidos por um único instrumento e tratados de maneira homogênea e reproduzível.

Nosso procedimento forneceu posições precisas a partir de imagens geradas pela DECam e pode ser estendido para outros detectores. A correção para a refração cromática é um passo para aproveitar a excelência total em metrologia espacial do instrumento. Essa correção está em andamento.

Todo o procedimento, desde a obtenção de imagens do banco de dados do DES até a predição de ocultações estelares, é integrado por várias pipelines implementados em um ambiente computacional de alto desempenho. Atuamos de forma intensa para assegurarmos desempenho e qualidade.

A precisão das posições tem uma dependência mais forte da magnitude dos objetos do que do número de observações. Isso significa que o baixo limiar de detecção adotado pelo software PRAIA para extrair as fontes mais fracas não comprometeu a qualidade dos resultados. Nossa eficiência de detecção é de cerca de 90% para $r < 22$ e detectamos objetos tão fracos quanto $r \sim 24$, mais do que uma magnitude mais fraca que a magnitude limite média na mesma banda. Novamente, isso indica que as fontes mais fracas foram encontradas.

Os resultados básicos fornecidos aqui (astrometria, órbitas e predição para TNOs e Centauros) são constantemente atualizados à medida que mais observações do DES ou de outros telescópios se tornam disponíveis, sendo o LSST uma continuação natural e parte relevante da motivação deste trabalho. Esses resultados estão disponíveis em sites dedicados.

A fotometria oriunda do DES não poderia ser esquecida. Utilizamos medidas de magnitudes nos filtros g , r , i , z para derivarmos propriedades desses corpos. Procuramos, com isso, não apenas complementar a astrometria obtida neste trabalho mas também verificar as possibilidades do DES no estudo fotométrico de pequenos

corpos. Procuramos abordar uma diversidade de abordagens (rotação, magnitudes absolutas, taxonomia) e verificamos a grande contribuição que grandes levantamentos oferecem. Vale notar que, embora tenhamos trabalhado apenas com TNOs e Centauros o DES, apenas em seus 3 primeiros anos, possui mais de 1,5 milhão de observações relativas a mais de 140.000 objetos do Cinturão Principal. Uma abordagem mais completa da fotometria do DES para pequenos corpos é tarefa que será realizada - tendo em conta os 6 anos de observação do levantamento - em colaboração com colegas estadunidenses.

Um importante produto deste trabalho é a própria plataforma desenvolvida para estudo de pequenos corpos. Essa plataforma foi apresentada em Cartagena de Índias, Colômbia (2018), durante o Segundo Encontro Latinoamericano de e-Ciência e ainda precisa ser publicada.

Referências Bibliográficas

- ABBOTT, T., KRON, R., WANG, M. Y., et al., 2019, “Seven New Distant Objects”, *Minor Planet Electronic Circulars*, v. 2019-J52 (May).
- ABBOTT, T. M. C., ABDALLA, F. B., ALLAM, S., et al., 2018, “The Dark Energy Survey: Data Release 1”, *ApJS*, 239(2):18. doi: 10.3847/1538-4365/aae9f0.
- ABOLFATHI, B., AGUADO, D. S., AGUILAR, G., et al., 2018, “The Fourteenth Data Release of the Sloan Digital Sky Survey: First Spectroscopic Data from the Extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey and from the Second Phase of the Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment”, *ApJS*, 235(2):42. doi: 10.3847/1538-4365/aa9e8a.
- ACTON, C., BACHMAN, N., SEMENOV, B., et al., 2018, “A look towards the future in the handling of space science mission geometry”, *Planet. Space Sci.*, v. 150 (Jan), pp. 9–12. doi: 10.1016/j.pss.2017.02.013.
- ACTON, C. H., 1996, “Ancillary data services of NASA’s Navigation and Ancillary Information Facility”, *Planet. Space Sci.*, v. 44, n. 1 (Jan), pp. 65–70. doi: 10.1016/0032-0633(95)00107-7.
- ALVAREZ-CANDAL, A., AYALA-LOERA, C., GIL-HUTTON, R., et al., 2019, “Absolute colours and phase coefficients of trans-Neptunian objects: correlations and populations”, *MNRAS*, v. 488, n. 3 (Sep), pp. 3035–3044. doi: 10.1093/mnras/stz1880.
- ANNEX, A., 2017, “SpiceyPy, a Python Wrapper for SPICE”. In: *Third Planetary Data Workshop and The Planetary Geologic Mappers Annual Meeting*, v. 1986, p. 7081, Jun.
- ASSAFIN, M., CAMARGO, J. I. B., VIEIRA MARTINS, R., et al., 2010, “Precise predictions of stellar occultations by Pluto, Charon, Nix, and Hydra for 2008-2015”, *A&A*, 515:A32. doi: 10.1051/0004-6361/200913690.

- ASSAFIN, M., VIEIRA MARTINS, R., CAMARGO, J. I. B., et al., 2011, “PRAIA - Platform for Reduction of Astronomical Images Automatically”. In: *Gaia follow-up network for the solar system objects : Gaia FUN-SSO workshop proceedings*, pp. 85–88, Jun.
- ASSAFIN, M., CAMARGO, J. I. B., VIEIRA MARTINS, R., et al., 2012, “Candidate stellar occultations by large trans-Neptunian objects up to 2015”, *A&A*, 541:A142. doi: 10.1051/0004-6361/201118349.
- ASSAFIN, M., VIEIRA-MARTINS, R., ANDREI, A. H., et al., 2013, “Rio survey of optical astrometric positions for 300 ICRF2 sources and the current optical/radio frame link status before Gaia”, *MNRAS*, v. 430, n. 4 (Apr), pp. 2797–2814. doi: 10.1093/mnras/stt081.
- AYALA-LOERA, C., ALVAREZ-CANDAL, A., ORTIZ, J. L., et al., 2018, “Absolute colours and phase coefficients of trans-Neptunian objects: $H_V - H_R$ and relative phase coefficients”, *MNRAS*, v. 481, n. 2 (Dec), pp. 1848–1857. doi: 10.1093/mnras/sty2363.
- BANDA-HUARCA, M. V., CAMARGO, J. I. B., DESMARS, J., et al., 2019, “Astrometry and Occultation Predictions to Trans-Neptunian and Centaur Objects Observed within the Dark Energy Survey”, *AJ*, 157(3):120. doi: 10.3847/1538-3881/aafb37.
- BANNISTER, M. T., KAVELAARS, J. J., PETIT, J.-M., et al., 2016, “The Outer Solar System Origins Survey. I. Design and First-quarter Discoveries”, *AJ*, 152(3):70. doi: 10.3847/0004-6256/152/3/70.
- BANNISTER, M. T., GLADMAN, B. J., KAVELAARS, J. J., et al., 2018, “OS-SOS. VII. 800+ Trans-Neptunian Objects—The Complete Data Release”, *ApJS*, 236(1):18. doi: 10.3847/1538-4365/aab77a.
- BECKER, J. C., KHAIN, T., HAMILTON, S. J., et al., 2018, “Discovery and Dynamical Analysis of an Extreme Trans-Neptunian Object with a High Orbital Inclination”, *AJ*, 156(2):81. doi: 10.3847/1538-3881/aad042.
- BELSKAYA, I. N., LEVASSEUR-REGOURD, A. C., SHKURATOV, Y. G., et al., 2008, “Surface Properties of Kuiper Belt Objects and Centaurs from Photometry and Polarimetry”. In: Barucci, M. A., Boehnhardt, H., Cruikshank, D. P., et al. (Eds.), *The Solar System Beyond Neptune*, M. A. Barucci, H. Boehnhardt, D. P. Cruikshank, and A. Morbidelli (eds.), *University of Arizona Press, Tucson, 592 pp., p.115-127*, p. 115.

- BENEDETTI-ROSSI, G., VIEIRA MARTINS, R., CAMARGO, J. I. B., et al., 2014, “Pluto: improved astrometry from 19 years of observations”, *A&A*, 570:A86. doi: 10.1051/0004-6361/201424275.
- BERNSTEIN, G. M., ABBOTT, T. M. C., DESAI, S., et al., 2017a, “Instrumental response model and detrending for the Dark Energy Camera”, *PASP*, v. 129, n. 11 (nov.), pp. 114502. doi: 10.1088/1538-3873/aa858e.
- BERNSTEIN, G. M., ARMSTRONG, R., PLAZAS, A. A., et al., 2017b, “Astrometric Calibration and Performance of the Dark Energy Camera”, *PASP*, v. 129, n. 7 (jul.), pp. 074503. doi: 10.1088/1538-3873/aa6c55.
- BERTHIER, J., VACHIER, F., THUILLOT, W., et al., 2006, “SkyBoT, a new VO service to identify Solar System objects”. In: Gabriel, C., Arviset, C., Ponz, D., et al. (Eds.), *Astronomical Data Analysis Software and Systems XV*, v. 351, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, p. 367, Jul.
- BOEHNHARDT, H., TOZZI, G. P., BIRKLE, K., et al., 2001, “Visible and near-IR observations of transneptunian objects. Results from ESO and Calar Alto Telescopes”, *A&A*, v. 378 (Nov), pp. 653–667. doi: 10.1051/0004-6361:20011212.
- BRAGA-RIBAS, F., SICARDY, B., ORTIZ, J. L., et al., 2011, “Stellar Occultations by TNOs: the January 08, 2011 by (208996) 2003 AZ84 and the May 04, 2011 by (50000) Quaoar”. In: *EPSC-DPS Joint Meeting 2011*, v. 2011, p. 1060, Oct.
- BRAGA-RIBAS, F., SICARDY, B., ORTIZ, J. L., et al., 2014a, “A ring system detected around the Centaur (10199) Chariklo”, *Nature*, v. 508, n. 7494 (Apr), pp. 72–75. doi: 10.1038/nature13155.
- BRAGA-RIBAS, F., SICARDY, B., ORTIZ, J. L., et al., 2014b, “The Ring System Discovered Around the Centaur Object (10199) Chariklo”. In: *AGU Fall Meeting Abstracts*, v. 2014, pp. P43F–01, Decb.
- BROWN, M. E., 2008, “The Largest Kuiper Belt Objects”. In: Barucci, M. A., Boehnhardt, H., Cruikshank, D. P., et al. (Eds.), *The Solar System Beyond Neptune*, M. A. Barucci, H. Boehnhardt, D. P. Cruikshank, and A. Morbidelli (eds.), *University of Arizona Press, Tucson*, 592 pp., p.335-344, p. 335.

- BURKE, D. L., RYKOFF, E. S., ALLAM, S., et al., 2018, “Forward Global Photometric Calibration of the Dark Energy Survey”, *AJ*, 155(1):41. doi: 10.3847/1538-3881/aa9f22.
- CAMARGO, J. I. B., VIEIRA-MARTINS, R., ASSAFIN, M., et al., 2014, “Candidate stellar occultations by Centaurs and trans-Neptunian objects up to 2014”, *A&A*, 561:A37. doi: 10.1051/0004-6361/201322579.
- CARRASCO KIND, M., DRLICA-WAGNER, A., KOZIOL, A., et al., 2019, “easyaccess: Enhanced SQL command line interpreter for astronomical surveys”, *The Journal of Open Source Software*, v. 4, n. 33 (Jan), pp. 1022. doi: 10.21105/joss.01022.
- DELSANTI, A., HAINAUT, O., JOURDEUIL, E., et al., 2004, “Simultaneous visible-near IR photometric study of Kuiper Belt Object surfaces with the ESO/Very Large Telescopes”, *A&A*, v. 417 (Apr), pp. 1145–1158. doi: 10.1051/0004-6361:20034182.
- DELSANTI, A. C., BOEHNHARDT, H., BARRERA, L., et al., 2001, “BVRI Photometry of 27 Kuiper Belt Objects with ESO/Very Large Telescope”, *A&A*, v. 380 (Dec), pp. 347–358. doi: 10.1051/0004-6361:20011432.
- DELSANTI, A., JEWITT, D., 2006, “The Solar System Beyond The Planets”. In: Blondel, P., Mason, J. W. (Eds.), *Solar System Update, edited by P. Blondel and J. Mason. ISBN 3-540-26056-0. Library of Congress Catalog Card No. 2005936392. Published by Springer, Berlin, IX + 329 pp., 2006, p.267*, p. 267. doi: 10.1007/3-540-37683-6_11.
- DEMEO, F. E., FORNASIER, S., BARUCCI, M. A., et al., 2009, “Visible and near-infrared colors of Transneptunian objects and Centaurs from the second ESO large program”, *A&A*, v. 493, n. 1 (Jan), pp. 283–290. doi: 10.1051/0004-6361:200810561.
- DESMARS, J., CAMARGO, J. I. B., BRAGA-RIBAS, F., et al., 2015, “Orbit determination of trans-Neptunian objects and Centaurs for the prediction of stellar occultations”, *A&A*, 584:A96. doi: 10.1051/0004-6361/201526498.
- DIAS-OLIVEIRA, A., SICARDY, B., LELLOUCH, E., et al., 2015, “Pluto’s atmosphere from stellar occultations in 2012 and 2013”. In: *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts #47*, AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts, p. 200.09, Nov.

- DORESSOONDIRAM, A., PEIXINHO, N., DOUCET, C., et al., 2005, “The Meudon Multicolor Survey (2MS) of Centaurs and trans-neptunian objects: extended dataset and status on the correlations reported”, *Icarus*, v. 174, n. 1 (Mar), pp. 90–104. doi: 10.1016/j.icarus.2004.09.009.
- DORESSOONDIRAM, A., BOEHNHARDT, H., TEGLER, S. C., et al., 2008, “Color Properties and Trends of the Transneptunian Objects”. In: Barucci, M. A., Boehnhardt, H., Cruikshank, D. P., et al. (Eds.), *The Solar System Beyond Neptune*, M. A. Barucci, H. Boehnhardt, D. P. Cruikshank, and A. Morbidelli (eds.), University of Arizona Press, Tucson, 592 pp., p.91-104, p. 91.
- DRLICA-WAGNER, A., SEVILLA-NOARBE, I., RYKOFF, E. S., et al., 2018, “Dark Energy Survey Year 1 Results: The Photometric Data Set for Cosmology”, *ApJS*, 235(2):33. doi: 10.3847/1538-4365/aab4f5.
- ELLIOT, J. L., KERN, S. D., CLANCY, K. B., et al., 2005, “The Deep Ecliptic Survey: A Search for Kuiper Belt Objects and Centaurs. II. Dynamical Classification, the Kuiper Belt Plane, and the Core Population”, *AJ*, v. 129, n. 2 (Feb), pp. 1117–1162. doi: 10.1086/427395.
- ELLIOT, J. L., PERSON, M. J., ZULUAGA, C. A., et al., 2010a, “Size and albedo of Kuiper belt object 55636 from a stellar occultation”, *Nature*, v. 465, n. 7300 (Jun), pp. 897–900. doi: 10.1038/nature09109.
- ELLIOT, J. L., PERSON, M. J., ZULUAGA, C. A., et al., 2010b, “Size and Albedo of the Kuiper Belt Object 55636”. In: *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts #42*, AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts, p. 23.02, Octb.
- FEIGELSON, E. D., BABU, G. J., 2012, *Modern Statistical Methods for Astronomy*.
- FLAUGHER, B., DIEHL, H. T., HONSCHIED, K., et al., 2015, “The Dark Energy Camera”, *AJ*, 150(5):150. doi: 10.1088/0004-6256/150/5/150.
- FULCHIGNONI, M., BELSKAYA, I., BARUCCI, M. A., et al., 2008, “Transneptunian Object Taxonomy”. In: Barucci, M. A., Boehnhardt, H., Cruikshank, D. P., et al. (Eds.), *The Solar System Beyond Neptune*, M. A. Barucci, H. Boehnhardt, D. P. Cruikshank, and A. Morbidelli (eds.), University of Arizona Press, Tucson, 592 pp., p.181-192, p. 181.

- FULCHIGNONI, M., BIRLAN, M., ANTONIETTA BARUCCI, M., 2000, “The Extension of the G-Mode Asteroid Taxonomy”, *Icarus*, v. 146, n. 1 (Jul), pp. 204–212. doi: 10.1006/icar.2000.6381.
- GALIAZZO, M. A., WIEGERT, P., ALJBAAE, S., 2016, “Influence of the Centaurs and TNOs on the main belt and its families”, *Ap&SS*, 361(12):371. doi: 10.1007/s10509-016-2957-z.
- GINSBURG, A., SIPÓCZ, B. M., BRASSEUR, C. E., et al., 2019, “astroquery: An Astronomical Web-querying Package in Python”, *AJ*, 157(3):98. doi: 10.3847/1538-3881/aafc33.
- GLADMAN, B., MARSDEN, B. G., VANLAERHOVEN, C., 2008, “Nomenclature in the Outer Solar System”. In: Barucci, M. A., Boehnhardt, H., Cruikshank, D. P., et al. (Eds.), *The Solar System Beyond Neptune*, M. A. Barucci, H. Boehnhardt, D. P. Cruikshank, and A. Morbidelli (eds.), *University of Arizona Press, Tucson*, 592 pp., p.43-57, p. 43.
- GOMES, R., LEVISON, H. F., TSIGANIS, K., et al., 2005, “Origin of the cataclysmic Late Heavy Bombardment period of the terrestrial planets”, *Nature*, v. 435, n. 7041 (May), pp. 466–469. doi: 10.1038/nature03676.
- GOMES, R. S., 2011, “The origin of TNO 2004 XR₁₉₀ as a primordial scattered object”, *Icarus*, v. 215, n. 2 (Oct), pp. 661–668. doi: 10.1016/j.icarus.2011.08.002.
- GOMES-JÚNIOR, A. R., ASSAFIN, M., BEAUVALET, L., et al., 2016, “New orbits of irregular satellites designed for the predictions of stellar occultations up to 2020, based on thousands of new observations”, *MNRAS*, v. 462, n. 2 (Oct), pp. 1351–1358. doi: 10.1093/mnras/stw1738.
- GRUNDY, W. M., NOLL, K. S., STEPHENS, D. C., 2005, “Diverse albedos of small trans-neptunian objects”, *Icarus*, v. 176, n. 1 (Jul), pp. 184–191. doi: 10.1016/j.icarus.2005.01.007.
- HAINAUT, O. R., DELSANTI, A. C., 2002, “Colors of Minor Bodies in the Outer Solar System. A statistical analysis”, *A&A*, v. 389 (Jul), pp. 641–664. doi: 10.1051/0004-6361:20020431.
- HASSELMANN, P. H., CARVANO, J. M., LAZZARO, D., 2013, “Adapted G-mode Clustering Method applied to Asteroid Taxonomy”. In: *Proceedings of the 12th Python in Science Conference (SciPy 2013)*, pp. 48–55, Nov.
- HOWELL, S. B., 2000, *Handbook of CCD Astronomy*.

- HUGHES, D. W., 2003, “The absolute magnitude distribution of trans-Neptunian objects”, *MNRAS*, v. 345, n. 3 (Nov), pp. 981–984. doi: 10.1046/j.1365-8711.2003.07048.x.
- JEWITT, D., LUU, J., 1993, “Discovery of the candidate Kuiper belt object 1992 QB₁”, *Nature*, v. 362, n. 6422 (Apr), pp. 730–732. doi: 10.1038/362730a0.
- JONES, R. L., JURIC, M., IVEZIC, Z., 2016, “Asteroid Discovery and Characterization with the Large Synoptic Survey Telescope”. In: Chesley, S. R., Morbidelli, A., Jedicke, R., et al. (Eds.), *Asteroids: New Observations, New Models*, v. 318, *IAU Symposium*, pp. 282–292, Jan. doi: 10.1017/S1743921315008510.
- KAUFMAN, L., ROUSSEEUW, P. J., 1990, *Finding groups in data. an introduction to cluster analysis*.
- KHAIN, T., BECKER, J. C., LIN, H. W., et al., 2020, “Dynamical Classification of Trans-Neptunian Objects Detected by the Dark Energy Survey”, *arXiv e-prints*, art. arXiv:2001.06060.
- KING, I. R., 1983, “Accuracy of measurement of star images on a pixel array.” *PASP*, v. 95 (Feb), pp. 163–168. doi: 10.1086/131139.
- LI, T. S., DEPOY, D. L., MARSHALL, J. L., et al., 2016, “Assessment of Systematic Chromatic Errors that Impact Sub-1% Photometric Precision in Large-area Sky Surveys”, *AJ*, 151(6):157. doi: 10.3847/0004-6256/151/6/157.
- LINDEGREN, L., LAMMERS, U., BASTIAN, U., et al., 2016, “Gaia Data Release 1. Astrometry: one billion positions, two million proper motions and parallaxes”, *A&A*, 595:A4. doi: 10.1051/0004-6361/201628714.
- LINDEGREN, L., HERNÁNDEZ, J., BOMBRUN, A., et al., 2018, “Gaia Data Release 2. The astrometric solution”, *A&A*, 616:A2. doi: 10.1051/0004-6361/201832727.
- LSST SCIENCE COLLABORATION, ABELL, P. A., ALLISON, J., et al., 2009, “LSST Science Book, Version 2.0”, *arXiv e-prints*, art. arXiv:0912.0201.
- LYKAWKA, P. S., MUKAI, T., 2008, “An Outer Planet Beyond Pluto and the Origin of the Trans-Neptunian Belt Architecture”, *AJ*, v. 135, n. 4 (Apr), pp. 1161–1200. doi: 10.1088/0004-6256/135/4/1161.
- MA, C., ARIAS, E. F., EUBANKS, T. M., et al., 1998, “The International Celestial Reference Frame as Realized by Very Long Baseline Interferometry”, *AJ*, v. 116, n. 1 (Jul), pp. 516–546. doi: 10.1086/300408.

- MARSHALL, J. L., RHEAULT, J.-P., DEPOY, D. L., et al., 2013, “DECAL: A Spectrophotometric Calibration System For DECam”, *arXiv e-prints*, art. arXiv:1302.5720.
- MARSSET, M., FRASER, W. C., PIKE, R. E., et al., 2019, “Col-OSSOS: Color and Inclination Are Correlated throughout the Kuiper Belt”, *AJ*, 157(3): 94. doi: 10.3847/1538-3881/aaf72e.
- MIGHELL, K. J., 2005, “Stellar photometry and astrometry with discrete point spread functions”, *MNRAS*, v. 361, n. 3 (Aug), pp. 861–878. doi: 10.1111/j.1365-2966.2005.09208.x.
- MILLIS, R. L., BUIE, M. W., WASSERMAN, L. H., et al., 2002, “The Deep Ecliptic Survey: A Search for Kuiper Belt Objects and Centaurs. I. Description of Methods and Initial Results”, *AJ*, v. 123, n. 4 (Apr), pp. 2083–2109. doi: 10.1086/339481.
- MORBIDELLI, A., LEVISON, H. F., TSIGANIS, K., et al., 2005, “Chaotic capture of Jupiter’s Trojan asteroids in the early Solar System”, *Nature*, v. 435, n. 7041 (May), pp. 462–465. doi: 10.1038/nature03540.
- MORGANSON, E., GRUENDL, R. A., MENANTEAU, F., et al., 2018, “The Dark Energy Survey Image Processing Pipeline”, *PASP*, v. 130, n. 989 (Jul), pp. 074501. doi: 10.1088/1538-3873/aab4ef.
- MURRAY, C. D., DERMOTT, S. F., 2000, *Solar System Dynamics*. Cambridge University Press. doi: 10.1017/CBO9781139174817.
- NEILSEN, E., BERNSTEIN, G., GRUENDL, R., et al., 2015, “Limiting magnitude, τ , T_{eff} , and image quality in DES Year 1”, .
- NEWBERRY, M. V., 1991, “Signal-to-Noise Considerations for Sky-Subtracted CCD Data”, *PASP*, v. 103 (Jan), pp. 122. doi: 10.1086/132801.
- OFEK, E. O., 2012, “Sloan Digital Sky Survey Observations of Kuiper Belt Objects: Colors and Variability”, *ApJ*, 749(1):10. doi: 10.1088/0004-637X/749/1/10.
- ORTIZ, J. L., SICARDY, B., BRAGA-RIBAS, F., et al., 2012, “Albedo and atmospheric constraints of dwarf planet Makemake from a stellar occultation”, *Nature*, v. 491, n. 7425 (Nov), pp. 566–569. doi: 10.1038/nature11597.

- ORTIZ, J. L., SANTOS-SANZ, P., SICARDY, B., et al., 2017, “The size, shape, density and ring of the dwarf planet Haumea from a stellar occultation”, *Nature*, v. 550, n. 7675 (Oct), pp. 219–223. doi: 10.1038/nature24051.
- ORTIZ, J. L., SICARDY, B., CAMARGO, J. I. B., et al., 2019, “Stellar Occultations by Transneptunian objects: from Predictions to Observations and Prospects for the Future”, *arXiv e-prints*, art. arXiv:1905.04335.
- ORTIZ, J. L., OTHERS, 2011, “The stellar occultation by Makemake on 2011 April 23”. In: *EPSC-DPS Joint Meeting 2011*, p. 704.
- PEIXINHO, N., DELSANTI, A., GUILBERT-LEPOUTRE, A., et al., 2012, “The bimodal colors of Centaurs and small Kuiper belt objects”, *A&A*, 546: A86. doi: 10.1051/0004-6361/201219057.
- PEIXINHO, N., DELSANTI, A., DORESSOUNDIRAM, A., 2015, “Reanalyzing the visible colors of Centaurs and KBOs: what is there and what we might be missing”, *A&A*, 577:A35. doi: 10.1051/0004-6361/201425436.
- PENCE, W., SEAMAN, R., WHITE, R., 2011, “Fpack and Funpack User’s Guide: FITS Image Compression Utilities”, *arXiv e-prints*, (dez.).
- PERNA, D., BARUCCI, M. A., FORNASIER, S., et al., 2010, “Colors and taxonomy of Centaurs and trans-Neptunian objects”, *A&A*, 510:A53. doi: 10.1051/0004-6361/200913654.
- PERNA, D., DOTTO, E., BARUCCI, M. A., et al., 2013, “Photometry and taxonomy of trans-Neptunian objects and Centaurs in support of a Herschel key program”, *A&A*, 554:A49. doi: 10.1051/0004-6361/201219859.
- PLANCK COLLABORATION, ADE, P. A. R., AGHANIM, N., et al., 2014, “Planck 2013 results. XVI. Cosmological parameters”, *A&A*, 571:A16. doi: 10.1051/0004-6361/201321591.
- PLEWA, P. M., GILLESSEN, S., BAUBÖCK, M., et al., 2018, “Optical Distortion in the NACO Imager”, *Research Notes of the American Astronomical Society*, 2(1):35. doi: 10.3847/2515-5172/aab3df.
- PRESS, W. H., TEUKOLSKY, S. A., VETTERLING, W. T., et al., 1992, *Numerical recipes in FORTRAN. The art of scientific computing*.
- R CORE TEAM, 2017, *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>.

- RABINOWITZ, D. L., BARKUME, K., BROWN, M. E., et al., 2006, “Photometric Observations Constraining the Size, Shape, and Albedo of 2003 EL61, a Rapidly Rotating, Pluto-sized Object in the Kuiper Belt”, *ApJ*, v. 639, n. 2 (Mar), pp. 1238–1251. doi: 10.1086/499575.
- SANTOS-SANZ, P., ORTIZ, J. L., BARRERA, L., et al., 2009, “New BVRI photometry results on Kuiper Belt Objects from the ESO VLT”, *A&A*, v. 494, n. 2 (Feb), pp. 693–706. doi: 10.1051/0004-6361:20078301.
- SCARGLE, J. D., 1982, “Studies in astronomical time series analysis. II. Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data.” *ApJ*, v. 263 (Dec), pp. 835–853. doi: 10.1086/160554.
- SCHAEFER, B. E., RABINOWITZ, D. L., TOURTELLOTTE, S. W., 2009, “The Diverse Solar Phase Curves of Distant Icy Bodies II. The Cause of the Opposition Surges and Their Correlations”, *AJ*, v. 137, n. 1 (Jan), pp. 129–144. doi: 10.1088/0004-6256/137/1/129.
- SCHAFFER, K. K., CRAWFORD, T. M., AIRD, K. A., et al., 2011, “The First Public Release of South Pole Telescope Data: Maps of a 95 deg² Field from 2008 Observations”, *ApJ*, 743(1):90. doi: 10.1088/0004-637X/743/1/90.
- SHEPPARD, S. S., 2006, “Small Bodies in the Outer Solar System”. In: Kannappan, S. J., Redfield, S., Kessler-Silacci, J. E., et al. (Eds.), *New Horizons in Astronomy: Frank N. Bash Symposium*, v. 352, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, p. 3.
- SHEPPARD, S. S., LACERDA, P., ORTIZ, J. L., 2008, “Photometric Lightcurves of Transneptunian Objects and Centaurs: Rotations, Shapes, and Densities”. In: Barucci, M. A., Boehnhardt, H., Cruikshank, D. P., et al. (Eds.), *The Solar System Beyond Neptune*, pp. 129–142.
- SHEPPARD, S. S., WILLIAMS, G. V., THOLEN, D. J., et al., 2018, “New Jupiter Satellites and Moon-Moon Collisions”, *Research Notes of the American Astronomical Society*, 2(3):155. doi: 10.3847/2515-5172/aadd15.
- SICARDY, B., ORTIZ, J. L., ASSAFIN, M., et al., 2011, “A Pluto-like radius and a high albedo for the dwarf planet Eris from an occultation”, *Nature*, v. 478, n. 7370 (Oct), pp. 493–496. doi: 10.1038/nature10550.
- STELLINGWERF, R. F., 1978, “Period determination using phase dispersion minimization.” *ApJ*, v. 224 (Sep), pp. 953–960. doi: 10.1086/156444.

- THUILLOT, W., BANCELIN, D., IVANTSOV, A., et al., 2015, “The astrometric Gaia-FUN-SSO observation campaign of 99942 Apophis”, *A&A*, 583:A59. doi: 10.1051/0004-6361/201425603.
- TOMBAUGH, C. W., 1946, “The Search for the Ninth Planet, Pluto”, *Leaflet of the Astronomical Society of the Pacific*, v. 5, n. 209 (Jan), pp. 73.
- TSIGANIS, K., GOMES, R., MORBIDELLI, A., et al., 2005, “Origin of the orbital architecture of the giant planets of the Solar System”, *Nature*, v. 435, n. 7041 (May), pp. 459–461. doi: 10.1038/nature03539.
- VERBISCER, A. J., HELFENSTEIN, P., BURATTI, B. J., 2013, “Photometric Properties of Solar System Ices”. In: Gudipati, M. S., Castillo-Rogez, J. (Eds.), *Astrophysics and Space Science Library*, v. 356, p. 47, Jan. doi: 10.1007/978-1-4614-3076-6_2.
- WILLIAMS, I. P., COLLANDER-BROWN, S. J., 1997, “Trans-neptunian objects”, *Surveys in Geophysics*, v. 18, n. 4 (Jan), pp. 341–361. doi: 10.1023/A:1006551530156.
- ZACHARIAS, N., FINCH, C., GIRARD, T., et al., 2010, “The Third US Naval Observatory CCD Astrograph Catalog (UCAC3)”, *AJ*, v. 139, n. 6 (Jun), pp. 2184–2199. doi: 10.1088/0004-6256/139/6/2184.
- ZACHARIAS, N., FINCH, C. T., GIRARD, T. M., et al., 2013, “The Fourth US Naval Observatory CCD Astrograph Catalog (UCAC4)”, *AJ*, 145(2):44. doi: 10.1088/0004-6256/145/2/44.































































Apêndice A

Artigo publicado

A seguir, meu artigo publicado (BANDA-HUARCA *et al.*, 2019) no *Astronomical Journal*.



Astrometry and Occultation Predictions to Trans-Neptunian and Centaur Objects Observed within the Dark Energy Survey

M. V. Banda-Huarca^{1,2} , J. I. B. Camargo^{1,2} , J. Desmars³ , R. L. C. Ogando^{1,2} , R. Vieira-Martins^{1,2} , M. Assafin^{2,4} ,
L. N. da Costa^{1,2} , G. M. Bernstein⁵ , M. Carrasco Kind^{6,7} , A. Drlica-Wagner^{8,9} , R. Gomes^{1,2} , M. M. Gysi^{2,10} ,
F. Braga-Ribas^{1,2,10} , M. A. G. Maia^{1,2} , D. W. Gerdes^{11,12} , S. Hamilton¹¹ , W. Wester⁸ , T. M. C. Abbott¹³ ,
F. B. Abdalla^{14,15} , S. Allam⁸ , S. Avila¹⁶ , E. Bertin^{17,18} , D. Brooks¹⁴ , E. Buckley-Geer⁸ , D. L. Burke^{19,20} ,
A. Carnero Rosell^{1,2} , J. Carretero²¹ , C. E. Cunha¹⁹ , C. Davis¹⁹ , J. De Vicente²² , H. T. Diehl⁸ , P. Doel¹⁴ , P. Fosalba^{23,24} ,
J. Frieman^{8,9} , J. García-Bellido²⁵ , E. Gaztanaga^{23,24} , D. Gruen^{19,20} , R. A. Gruendl^{6,7} , J. Gschwend^{1,2} , G. Gutierrez⁸ ,
W. G. Hartley^{14,26} , D. L. Hollowood²⁷ , K. Honscheid^{28,29} , D. J. James³⁰ , K. Kuehn³¹ , N. Kuropatkin⁸ , F. Menanteau^{6,7} ,
C. J. Miller^{11,12} , R. Miquel^{21,32} , A. A. Plazas³³ , A. K. Romer³⁴ , E. Sanchez²² , V. Scarpine⁸ , M. Schubnell¹¹ ,
S. Serrano^{23,24} , I. Sevilla-Noarbe²² , M. Smith³⁵ , M. Soares-Santos³⁶ , F. Sobreira^{2,37} , E. Suchyta³⁸ ,
M. E. C. Swanson⁷ , and G. Tarle¹¹ 

DES Collaboration

¹ Observatório Nacional, Rua Gal. José Cristino 77, Rio de Janeiro, RJ—20921-400, Brazil; martin.banda@linea.gov.br

² Laboratório Interinstitucional de e-Astronomia—LIneA, Rua Gal. José Cristino 77, Rio de Janeiro, RJ—20921-400, Brazil

³ LESIA, Observatoire de Paris, PSL Research University, CNRS, Sorbonne Universités, UPMC Univ. Paris 06, Univ. Paris Diderot, Sorbonne Paris Cité, France

⁴ Observatório do Valongo, Ladeira do Pedro Antonio, 43—Saude 20.080-090, Rio de Janeiro, RJ, Brazil

⁵ Department of Physics and Astronomy, University of Pennsylvania, Philadelphia, PA 19104, USA

⁶ Department of Astronomy, University of Illinois at Urbana-Champaign, 1002 W. Green Street, Urbana, IL 61801, USA

⁷ National Center for Supercomputing Applications, 1205 West Clark Street, Urbana, IL 61801, USA

⁸ Fermi National Accelerator Laboratory, P.O. Box 500, Batavia, IL 60510, USA

⁹ Kavli Institute for Cosmological Physics, University of Chicago, Chicago, IL 60637, USA

¹⁰ Federal University of Technology—Paraná (UTFPR/DAFIS), Av. Sete de Setembro 3165, 80230-901, Curitiba, Brazil

¹¹ Department of Physics, University of Michigan, Ann Arbor, MI 48109, USA

¹² Department of Astronomy, University of Michigan, Ann Arbor, MI 48109, USA

¹³ Cerro Tololo Inter-American Observatory, National Optical Astronomy Observatory, Casilla 603, La Serena, Chile

¹⁴ Department of Physics & Astronomy, University College London, Gower Street, London, WC1E 6BT, UK

¹⁵ Department of Physics and Electronics, Rhodes University, P.O. Box 94, Grahamstown, 6140, South Africa

¹⁶ Institute of Cosmology & Gravitation, University of Portsmouth, Portsmouth, PO1 3FX, UK

¹⁷ CNRS, UMR 7095, Institut d’Astrophysique de Paris, F-75014, Paris, France

¹⁸ Sorbonne Universités, UPMC Univ Paris 06, UMR 7095, Institut d’Astrophysique de Paris, F-75014, Paris, France

¹⁹ Kavli Institute for Particle Astrophysics & Cosmology, P.O. Box 2450, Stanford University, Stanford, CA 94305, USA

²⁰ SLAC National Accelerator Laboratory, Menlo Park, CA 94025, USA

²¹ Institut de Física d’Altes Energies (IFAE), The Barcelona Institute of Science and Technology, Campus UAB, E-08193 Bellaterra (Barcelona), Spain

²² Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), Madrid, Spain

²³ Institut d’Estudis Espacials de Catalunya (IEEC), E-08193 Barcelona, Spain

²⁴ Institute of Space Sciences (ICE, CSIC), Campus UAB, Carrer de Can Magrans, s/n, E-08193 Barcelona, Spain

²⁵ Instituto de Física Teórica UAM/CSIC, Universidad Autónoma de Madrid, E-28049 Madrid, Spain

²⁶ Department of Physics, ETH Zurich, Wolfgang-Pauli-Strasse 16, CH-8093 Zurich, Switzerland

²⁷ Santa Cruz Institute for Particle Physics, Santa Cruz, CA 95064, USA

²⁸ Center for Cosmology and Astro-Particle Physics, The Ohio State University, Columbus, OH 43210, USA

²⁹ Department of Physics, The Ohio State University, Columbus, OH 43210, USA

³⁰ Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, Cambridge, MA 02138, USA

³¹ Australian Astronomical Observatory, North Ryde, NSW 2113, Australia

³² Institutíó Catalana de Recerca i Estudis Avançats, E-08010 Barcelona, Spain

³³ Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, 4800 Oak Grove Drive, Pasadena, CA 91109, USA

³⁴ Department of Physics and Astronomy, Pevensey Building, University of Sussex, Brighton, BN1 9QH, UK

³⁵ School of Physics and Astronomy, University of Southampton, Southampton, SO17 1BJ, UK

³⁶ Brandeis University, Physics Department, 415 South Street, Waltham, MA 02453, USA

³⁷ Instituto de Física Gleb Wataghin, Universidade Estadual de Campinas, 13083-859, Campinas, SP, Brazil

³⁸ Computer Science and Mathematics Division, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN 37831, USA

Received 2018 October 23; revised 2018 December 21; accepted 2018 December 28; published 2019 February 15

Abstract

Trans-Neptunian objects (TNOs) are a source of invaluable information to access the history and evolution of the outer solar system. However, observing these faint objects is a difficult task. As a consequence, important properties such as size and albedo are known for only a small fraction of them. Now, with the results from deep sky surveys and the *Gaia* space mission, a new exciting era is within reach as accurate predictions of stellar occultations by numerous distant small solar system bodies become available. From them, diameters with kilometer accuracies can be determined. Albedos, in turn, can be obtained from diameters and absolute magnitudes. We use observations from the Dark Energy Survey (DES) from 2012 November until 2016 February, amounting to 4,292,847 charge-coupled device (CCD) frames. We searched them for all known small solar system bodies and recovered a total of 202 TNOs and Centaurs, 63 of which have been discovered by the DES collaboration as of the date of submission. Their positions were determined using the *Gaia* Data Release 2 as

reference and their orbits were refined. Stellar occultations were then predicted using these refined orbits plus stellar positions from *Gaia*. These predictions are maintained, and updated, in a dedicated web service. The techniques developed here are also part of an ambitious preparation to use the data from the Large Synoptic Survey Telescope (LSST), that expects to obtain accurate positions and multifilter photometry for tens of thousands of TNOs.

Key words: astrometry – ephemerides – Kuiper belt: general – occultations – surveys

1. Introduction

The trans-Neptunian region (30 au distance from the Sun and beyond) is a world of small (diameters smaller than 2400 km), faint (typically, $V > 21$), and cold (20–50 K) bodies. These are pristine objects, as well as collisional and dynamical remnants, of an evolved planetesimal disk of the outer solar system whose history and evolution can therefore be accessed from the trans-Neptunian objects (TNOs).

Centaur also play an important role in this study. They are located closer to the Sun in unstable orbits between Jupiter and Neptune, and it is generally accepted that they share a common origin with the TNOs. In this context, they serve as proxies to those more distant and fainter bodies (Fernández et al. 2002).

Because of their large distances from the Sun, TNOs are difficult to observe and study. It is interesting to note that the 30–50 au region is expected to contain 70,000 or more TNOs with diameters larger than 100 km (Iorio 2007). However, the Minor Planet Center³⁹ (MPC) lists, to date, a total of ~ 2700 TNOs/Centaurs and features like diameters, colors, and taxonomy, and the presence of satellites are known for less than 15% of these objects.⁴⁰ As a consequence, a number of questions about them, like their sizes, size distribution, and the relationship between size and magnitude, are poorly answered. The answers to these questions reveal the history of the trans-Neptunian region and leads to the knowledge of its total mass (see Barucci et al. 2008 for a comprehensive review and discussion of the trans-Neptunian region).

A dramatic change in this scenario, however, is expected from the deep sky surveys. The Large Synoptic Survey Telescope (LSST) Science Collaboration et al. (2009), for instance, estimates that 40,000 TNOs will be observed by the LSST during its 10 years of operation.

As far as the study of these objects through the stellar occultation technique is concerned, it is clear that the combination of large sky surveys and the astrometry from the *Gaia* space mission (Gaia Collaboration et al. 2018) will provide accurate occultation prediction for numerous bodies.

Although stellar occultations are transient events and are still poorly predicted for most TNOs and Centaurs, it is the only ground-based technique from which sizes and shapes can be obtained with kilometer accuracies. Atmospheres can also be studied as their presence, or upper limits for their existence to the level of few nano-bars, can be inferred and modeled (see Widemann et al. 2009; Elliot et al. 2010; Sicardy et al. 2011; Ortiz et al. 2012; Braga-Ribas et al. 2013; Gomes-Júnior et al. 2015; Sicardy et al. 2016, for details on sizes, shapes, and atmospheres from stellar occultations). In addition, structures like rings (Braga-Ribas et al. 2014; Ortiz et al. 2017) or even topographic features (Dias-Oliveira et al. 2017) can be detected.

The Dark Energy Survey (DES; Flaugher 2005) observations offer a considerable contribution to the study of small bodies in the solar system (see Dark Energy Survey Collaboration et al. 2016 for an overview of the capabilities of the survey). During its first three years of operation, 2013–2016, more than 4 million charge-coupled device (CCD) images were acquired, where tens of thousands of solar system objects can be found. This considerable amount of data provides accurate positions and multifilter photometry to, so far, more than 100 TNOs and tens of Centaurs as faint as $r \sim 24.0$.

Here we present, from the abovementioned observations, positions, orbit refinement, and stellar occultation predictions for all known TNOs and Centaurs, 63 of the them discovered by the DES date range for data as part of the tasks of its transient and moving object working group. One of these objects, 2014 UZ224, has already been studied in more detail from radiometric techniques by Gerdes et al. (2017).

In the next section, we briefly describe the DES. In Section 3, we describe the procedure to identify the known solar system objects in the images and the data reduction. In Section 4, we present the results and data analysis. Conclusions and comments are presented in Section 5. Photometric data will be presented and explored in a separate paper.

2. The Dark Energy Survey

The DES is a survey that covers 5000 square degrees in the *grizY* bands of the southern celestial hemisphere. It aims primarily to study the nature of the dark energy, an unknown form of energy that leads to an accelerated expansion of the universe (e.g., Perlmutter et al. 1998; Riess et al. 1998; Peebles & Ratra 2003).

Observations within the survey are made with the Dark Energy Camera (DECam; Flaugher et al. 2015), a mosaic of 62 $2k \times 4k$ red-sensitive CCDs installed on the prime focus of the 4 m Blanco telescope at the Cerro Tololo Inter-American Observatory. The DECam has a field of view (FOV) of 3 square degrees and the wide-area survey images have, at a 10σ detection level, a nominal limiting magnitude of $r = 23.34$, with the final co-added depth being roughly one magnitude deeper (Morganson et al. 2018). The limiting magnitude is a quantity explained later in the text.

Considering only those observations made during the first three years of operation of the DES, the DECam acquired science images from more than 69,000 pointings or, more precisely, 4,292,847 individual CCD exposures in the five bands. This is an invaluable data set to studies in several fields of astronomy (see Dark Energy Survey Collaboration et al. 2016), in particular, those related to transient events and moving objects.

3. Data and Tools

Our basic observational resources are the individual CCD images available from the DES database. In this database, the images taken until 2016 February were already corrected for a

³⁹ <https://minorplanetcenter.net/iau/mpc.html>

⁴⁰ <http://www.johnstonsarchive.net/astro/tnolist.html>

number of effects (crosstalk, bias, bad pixels, nonlinear pixel response, and flat field), in addition to image-specific corrections like bleed trails from saturated stars, streaks, and cosmic rays (see Morganson et al. 2018 for a detailed description of the DES image processing pipeline).

The set of tools used in this work are general, in the sense that they can be applied to any other survey or image database, and comprehensive, in the sense that they consider all necessary steps (in brief, identification of images with known solar system bodies, astrometry, orbit refinement, and prediction of a stellar occultation).

These tools, described next, have been ingested in a high-performance computational environment to form a pipeline in preparation to also use of the data from the LSST. In fact, although LSST is expected to deliver astrometric accuracy ranging typically from 11 mas ($r = 21$) to 74 mas ($r = 24$) (LSST Science Collaboration et al. 2009), better astrometry (1–2 mas) is necessary to accurately predict stellar occultations by satellites of small bodies or grazing occultations by rings or by the main body itself, for example. Therefore, it is essential to have tools to independently determine accurate positions when needed. It should be emphasized that, although milliarcsecond-level astrometry is certainly desirable in many instances, accuracies of tens of milliarcseconds for most of the positions of distant small solar system bodies have been usual and did not prevent the study of a number of them through stellar occultations.

3.1. Data Retrieval and Object Search

The very first step consists of obtaining the necessary information—pointing, observing date, location in the DES database, among others—on all CCD images acquired during the first three years of observations within the DES. This was done through *easyaccess* (Carrasco Kind et al. 2018), a friendly structured query language (SQL)-based tool to query the DES database. The result from such a query was a file containing the metadata from 4,292,847 CCD images. This file then feeds into the Sky Body Tracker (SkyBoT; Berthier et al. 2006).

SkyBoT is a project aimed at providing a virtual observatory tool useful to prepare and analyze observations of solar system objects. In addition to the web-interface service it offers, queries are also possible from the command line. The basic inputs to a cone search,⁴¹ for instance, are IAU identification of the observatory, J2000 pointing coordinates of a given CCD image, observation date, and a region centered on the pointing coordinates. All of these data come from the metadata previously mentioned. The output is a text or VOTable file format with pieces of information on all of the known small solar system bodies inside the given region, such as their J2000 astrometric right ascensions and declinations, V magnitudes, names and numbers (when they are numbered), and dynamical classes, among others. Table 1 lists the total number of TNOs and Centaurs found in the DES images as well as the expected number of objects for which positions can be determined from them. As we will see later in the text, these expected numbers (column 4 in particular) were surpassed.

The result of the search with the SkyBoT was a file having 1,708,335 entries, most of them of around 140,000 main-belt asteroid objects in more than 1.5 million CCD images. These objects, in addition to a few thousand members of other

⁴¹ A search based on a sky position and an angular distance from this position.

Table 1

Statistics of Known TNOs and Centaurs in the DES Images from the First Three Years of the Survey

Dynamical Class ^a	Total Objects	Total Observations	Expected Objects	Expected Observations
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
TNOs	270	16,537	84	3010
Centaurs	67	2519	13	333

Notes. Columns (2) and (3): total number of TNOs, Centaurs, and their respective observations, as alerted by the SkyBoT among the observations made by the DES until 2016 February. Columns (4) and (5): expected total number of TNOs, Centaurs, and their respective observations, under the following constraints: ($V \leq 24.0$) and ephemeris uncertainty $\leq 2''$ in both R.A. and decl. The visual magnitude as well as the positional uncertainties were also obtained from the SkyBoT.

^a As provided by the SkyBoT.

dynamical classes also found in the images, are being treated separately.

Note that the detection of a TNO or Centaur is not expected for all of the selected CCD images. Objects that are faint ($V \gtrsim 24.0$) in the DES images, or images taken under non-transparent sky, may not provide a detectable signal of the target. The most frequent exposure time of the DES frames presented here is 90 s (see Morganson et al. 2018).

3.2. Astrometry

Our astrometric tool is the Platform for Reduction of Astronomical Images Automatically (PRAIA; Assafin et al. 2011) package. PRAIA was conceived to determine photometry and accurate positions from large numbers of CCD images as unsupervised as possible. Its use and performance have been reported by various works (see, for instance, Assafin et al. 2013; Thuillot et al. 2015; Gomes-Júnior et al. 2016) from reference frame to solar system studies. The reference catalog used here for astrometry is the *Gaia* Data Release 2 (Lindgren et al. 2018). All differences in R.A. as well as all uncertainties related to measurements along R.A. are multiplied by the cosine of the decl.

A Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2650 v4 2.20 GHz configuration, using 40 cores, reduces 1000 CCD images in 20 minutes from a parallelized run of PRAIA. A total of 12,561 CCD images were treated here.

The presence of distortion effects, also known as the field distortion pattern (FDP), are expected in detectors with large FOVs such as that of the DECam. Common solutions are, e.g., the use of a high-degree polynomial (not always recommended) to relate CCD and gnomonic coordinates of reference stars, the brute-force determination of a distortion mask (e.g., Assafin et al. 2010), and the construction of an empirical model that takes into consideration effects due to the atmosphere and the instrument. This last one was the solution adopted here to correct for the FDP.

Such a solution (hereafter C0) is based on the model developed by Bernstein et al. (2017) and was the first step toward the determination of positions. C0 provides corrections for the instrumental distortion effects including color terms from the optics, delivering an astrometric solution for the DECam with rms errors below 10 mas. This astrometric solution is obtained from a parametric model that considers the celestial coordinates of an object and its respective pixel

coordinates along with a set of observing circumstances (e.g., object's color, exposure time, filter), profiting from internal comparisons of around 40 million high signal-to-noise ratio measurements of stellar images. A first degree polynomial can be subsequently used to relate CCD and gnomonic coordinates of reference stars, providing reliable solutions from fields with low star densities. Observed positions will be sent to the MPC.

3.3. Orbits

The refinement of orbits is obtained with the code numerical integration of the motion of an asteroid (NIMA; Desmars et al. 2015). NIMA starts from existing orbital parameters and then iteratively corrects the state vector from the differences between observations and computed positions through least squares. NIMA adopts a specific weighing scheme that takes into account the estimated precision of each position (σ_i), depending on the observatory and stellar catalog used as reference to determine the observed positions and the number of observations obtained during the same night in the same observatory (N_i) as well as a possible bias due to the observatory (b_i). The final variance of observation i is given by $\omega_i^2 = N_i b_i^2 + \sigma_i^2$. As a consequence, the weight is given by $1/\omega_i^2$. This weighing scheme is particularly relevant when we consider old epoch positions that do not use the *Gaia* catalog as a reference.

The values used in the NIMA weighing scheme are described in Desmars et al. (2015) and were consolidated before the release of the astrometric data from the *Gaia* mission. Therefore, the code was improved to profit from the DES observations and from the *Gaia* releases. In this way, we have adopted $\sigma_i = b_i = 0''.125$ for observations reduced with the *Gaia* DR1 and $\sigma_i = b_i = 0''.1$ for observations reduced with the *Gaia* DR2. We emphasize that the latter is the case of DES observations presented here.

It is possible to run NIMA, with the help of few scripts, in an unsupervised way so that it is suitable for a pipeline. One of its outputs is the object ephemeris in a format (*bsp*—binary Spacecraft and Planet Kernel) that can be readily used by the SPICE/NAIF tools (Acton 1996; Acton et al. 2018) to derive the state vector of a given body at any time.

3.4. Prediction of Stellar Occultations

The prediction of an occultation event is given by prediction maps that show where and when, on the Earth, such an event can be observed. This involves the knowledge of the Earth's position in space, the geocentric ephemeris of the occulting body, and a set of stellar positions in the neighborhoods of the sky path of the occulting object as seen by a geocentric observer (see details in Assafin et al. 2010). Note that, with the astrometry from *Gaia*, the uncertainties in predictions rest completely upon the accuracy of the ephemerides.

A dedicated website, as presented in the next section, provides these occultations maps where many events occurring during daylight are also shown. This is done so that we are aware of even those ones that can be observed near the Earth terminator.

4. Results and Analysis

The high quality of the DES images provided us with an accurate set of positions within the range of the observed

magnitudes. As a consequence, the objects studied here were grouped according to the number of observations and the uncertainty of their existing ephemeris, rather than on the accuracy of the observed positions. Note that we use the ephemeris positions as a primary parameter to identify the observed position of a given TNO/Centaur in the images.

4.1. Filtering

The determination of positions of TNOs and Centaurs from the DES images was subject to at least three constraints. The first one is that the ephemeris position of the target falls inside a box size of $4'' \times 4''$ centered on its observational counterpart. The second is an iterative 3σ filtering on the offsets, as obtained from the differences between observations and a reference ephemeris, to eliminate outliers. The third constraint is based on a brief inspection of the magnitudes as obtained from the DES database for each filter. Differences larger than $\Delta = 0.9$ mag between the brightest and faintest values in each filter, when multiple measurements were available, were investigated and eventually eliminated. This value of Δ takes into account a maximum variation of $\sigma_S = 0.15$ (absolute value) in the magnitude due to the object's rotation, a maximum uncertainty of $\sigma_M = 0.1$ in the observed magnitude, and a maximum variation of $\sigma_P = 0.25$ (absolute value) in the observed magnitude due to the phase angle. In other words, $\Delta \sim 3 \times \sqrt{\sigma_S^2 + \sigma_M^2 + \sigma_P^2}$.

These constraints were expected to provide a reliable identification of the solar system objects in the images with minimum elimination of good data. However, a preliminary orbit fitting of some objects still showed the presence of real outliers (misidentifications). To solve this, a fourth filter was applied to our data and affected mostly those sources whose ephemerides presented large uncertainties (extension and doubtful sources; see Section 4.2). This filter has as an input the offsets that remained from the application of the previous filters and works as follows.

First, a mean (m_0) and a standard deviation (s_0) are obtained from a sigma-clipping iterative process, where σ is a low value (1.5 in the present case). The adopted standard deviation is the largest value between 10 mas and s_0 as given by the sigma-clipping iterations. Then, any offset within N times the adopted standard deviation from the mean was kept. Most frequently, $N = 5$ was used.

As a result from this process, misidentifications of TNOs and Centaurs from the images were reduced to a minimum, although real outliers can still be found mostly among the doubtful sources.

4.2. Organization

Our results in astrometry are organized in Tables 5–7 (Appendix), and the respective source distribution in the sky can be seen in Figure 1.

Table 5 (main) considers those sources for which the 1σ ephemeris uncertainty (σ_E) in both R.A./decl. is smaller than or equal to $2''$ for TNOs and Centaurs and the number of observations (N) is greater than or equal to 3. Table 6 (extension) considers those sources for which the ephemeris uncertainty is $2'' < \sigma_E \leq 12''$ and $N \geq 5$. Table 7 (doubtful) considers the remaining sources. All of the ephemeris uncertainties used in these tables were obtained from JPL on 2018 April 27 and are referred to 2014 January 1 at 0 hr UTC.

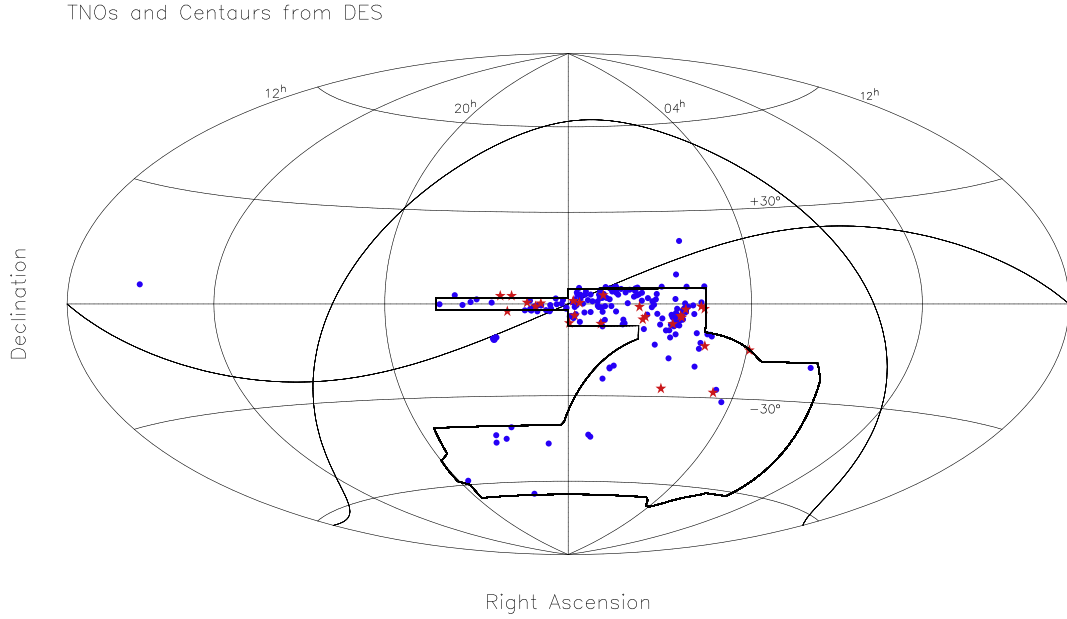


Figure 1. Hammer–Aitoff equal-area projection of the sphere for the TNOs (blue dots) and Centaurs (red stars) for which a position was determined. The ecliptic and Galactic planes, as well as the DES footprint, are also represented by black lines. Some fields are clearly outside the DES footprint. They refer to observations associated to the Vimos Very Large Telescope (VLT) deep survey (leftmost blue dot; Le Fèvre et al. 2005), to the LIGO event G21117 (the two northernmost blue dots; Cowperthwaite et al. 2016), and to DES engineering time (blue dots close to the ecliptic, at R.A. ~ 22.4 hr).

Note that these uncertainties are given as they appear in their respective ephemerides, that is, 3σ values.

Note that the choice of the $4''$ square box, although somewhat arbitrary, is a good compromise within the organization of our results to keep reliable source identifications in Tables 5 and 6, most of them in Table 5. Few objects would have moved from Tables 6 to 5 if we had opted, for instance, for a $5''$ or $6''$ square box. This is so because objects in Table 6 frequently have at least one coordinate (R.A./decl.) with a large ephemeris uncertainty when compared to the respective columns in Table 5. In any case, as shown later, objects in Table 6 are also a contribution to orbit refinement.

4.2.1. The Extension Table: Rationale

Most (90%) of the CCD images treated here have less than 1100 sources. Knowing that the size of one CCD in the DECam is $\sim 9' \times 18'$, we can consider that there is one field object,⁴² on average, inside a box of $24'' \times 24''$. In this way, it is expected that a box of this size centered on the ephemeris (calculated) position of an object in Table 6 contains the respective observed position and a field star. If any of them fall inside a box of $4'' \times 4''$ around the ephemeris position, then this observed position is flagged as an eligible target. If not eliminated by the other steps of the filtering process, then this observed position is selected to refine the respective orbit.

We adopted the number five as the minimum number of filtered (see Section 4.1) selected positions that an object with an ephemeris uncertainty of $2'' < \sigma_E \leq 12''$ must have to appear in the extension table. Orbits for the objects in this table do not have the same quality as those for objects in Table 5. However, as illustrated by Figure 2 (compare it to Figure 6 panel (a), shown later in the text), the five or more positions of

⁴² Any signal on the CCD that is recognized as an object (star, solar system object, etc.).

each object in that table are a relevant contribution to the refinement of their respective orbits.

4.3. Accuracies

In the astrometric analysis of these images, it is interesting to introduce here the concept of limiting magnitude, as presented by Neilsen et al. (2015) and also discussed by Morganson et al. (2018).

The limiting magnitude is that at which the magnitude of a star is measured with an uncertainty of 0.1 mag. It can be shown to be related to a quantity τ by

$$m_{\text{lim}} = m_0 + 1.25 \log \tau, \quad (1)$$

where τ is a scaling factor to the actual exposure time (given by the image header). As a consequence, an effective exposure time can be defined as $\tau \times$ nominal exposure time. The τ quantity and the limiting magnitude, therefore, can be used as a quality parameter for a given image. In order to determine the limiting magnitude in the r -band shown in Figures 3 and 4, the value $m_0 = 23.1$ was taken from Neilsen et al. (2015) and the values of τ were obtained directly from the DES database for each CCD (Morganson et al. 2018).

The accuracy of the observations for the objects presented in Tables 5–6 (columns 5 and 6) is illustrated by Figure 3, where the average limiting magnitude (22.9) in the r -band (dashed line) sets a rough limit in the upper panels from which the uncertainties become larger, mainly when the number of observations is low. It also shows that the sources with a large number (hundreds) of observations have magnitudes that are close to or fainter than this limiting magnitude.

Two relevant features are shown by Figure 3. First, the lower panels show that, even in frames with the shortest exposure time (90 s), we detect sources with r as faint as ~ 24.0 with a quality that is comparable to those from frames with an exposure time of 400 s thanks to the excellent quality of the

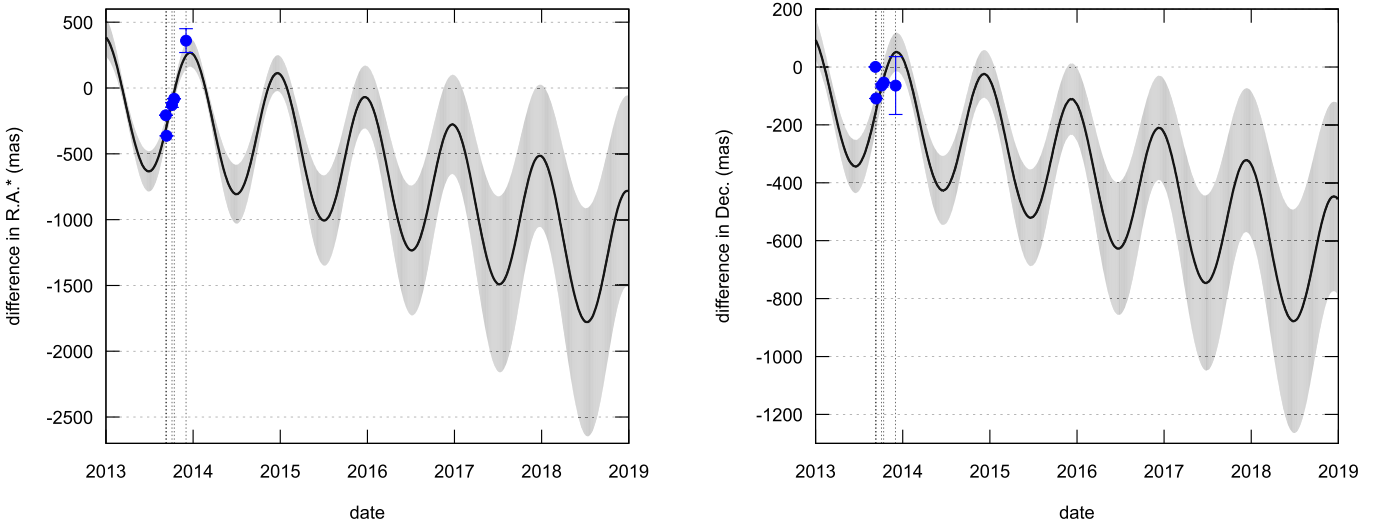


Figure 2. Difference (black lines) in R.A. (left panel) and decl. (right panel) between the orbit determined with NIMA and that from JPL (version: JPL#4) for the TNO 2002 PD149. In the same way, blue dots are the differences between the observed positions and those from JPL ephemeris. This object belongs to the TNO extension group (Table 6). The sense of the differences is NIMA minus JPL.

images. It is worth mentioning that the faintest objects are more than 1 mag fainter than the average limiting magnitude in the r -band. Second, it is also possible to note that the range of uncertainties in R.A. is wider than that in decl. This feature most probably results from the fact that the ephemeris uncertainties (columns 3 and 4, Tables 5–7) are, on average, larger in R.A. than in decl., since we do not verify such a large difference between our measurements in R.A. and decl. as discussed below.

The standard deviations in Tables 5–7 (columns 5 and 6), obtained from the differences between the observed positions and those from the respective JPL ephemeris, is a common way to express the positional accuracy of solar system targets. These differences vary as a function of time so that, in the present study, the standard deviations provided by these columns numerically overestimate the internal accuracy (or repeatability) of the astrometric measurements.

A second astrometric empirical model (hereafter C1), also developed by the DES collaboration and based on Bernstein et al. (2017), provides improved astrometric solutions for all of the good-quality wide-survey DES exposures for years one through four of the survey. From C1, instrumental solutions are believed accurate to smaller than 3 mas rms per coordinate (see Bernstein et al. 2017). As a consequence, every DES astrometric measurement will be limited by the stochastic atmospheric distortions, typically ~ 10 mas rms in a single exposure within this solution. Note that, as compared to C0, C1 is available to a smaller set of DES exposures.

We compared the positions we determined for TNOs and Centaurs to all those ones resulting from C1. This comparison is summarized in Table 2, where all of the differences we found between our results and those from C1 were kept. It is important to note, however, that C1 does not provide a solution for all CCDs. We stress that C1 is only used to provide a more realistic estimate of the internal accuracy of our measurements as well as a comparison between our positions and those from the most recent astrometric empirical model developed by the DES collaboration. C1 does not participate in any of the astrometric determinations provided here.

The standard deviations shown in Table 2 (columns 4 and 5) are a more reliable estimate of the internal accuracy of our measurements, as compared to those obtained in Tables 5–6. This internal accuracy is given by the standard deviation of the measurements, not of the mean. Therefore, the small systematics between both solutions (columns 2 and 3) cannot be considered negligible. Part of them, at least, may be explained by the fact that the empirical model is based on the *Gaia* Data Release 1 (*Gaia* DR1; Lindegren et al. 2016). It is also worth mentioning that, when our positions are referred to the *Gaia* DR1 (that is, the *Gaia* DR1 is used as reference for astrometry), the values of these standard deviations in R.A. and decl. are more similar to each other.

On the other hand, a realistic estimate of the final positional accuracy of the targets (or how accurate their equatorial coordinates are given in the International Celestial Reference Frame (Ma et al. 1998)) can be obtained from the root mean square (rms) of the reference stars, as given by the differences between their observed and catalog positions, and the precision in the determination of the object’s centroid. The latter, as well as the rms of the reference stars for different filters and magnitude ranges, are provided by Table 3. In this context, this final accuracy to both equatorial coordinates is obtained, at the 1σ level, from the quantity

$$\sigma_F = \sqrt{\sigma_C^2 + \sigma_R^2}, \quad (2)$$

where σ_C is the uncertainty in the determination of the objects’ centroid and σ_R is the rms of the reference stars. For the r filter, for instance, $12 \text{ mas} < \sigma_F < 20 \text{ mas}$.

4.4. Timing

When dealing with solar system objects, the mid-exposure time (time of the shutter opening plus half of the exposure time) is of particular importance. DECam has a shutter that takes a while (about 1 s) to cross the focal plane, so the actual mean of the exposed time depends on the position in the focal plane. To compensate for this feature, the mid-exposure time was

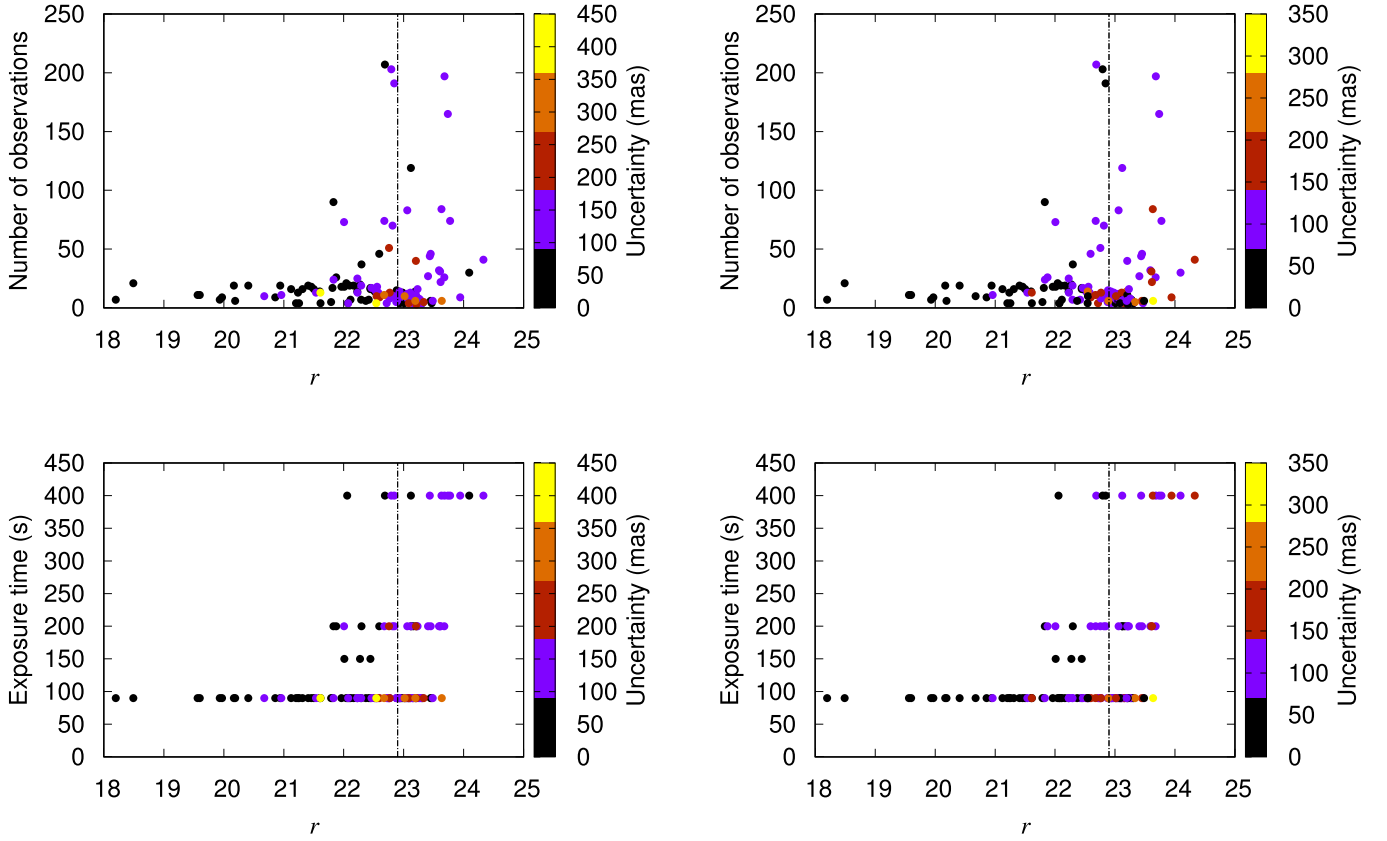


Figure 3. Positional uncertainty as a function of the magnitude and the number of observations in R.A. (left panels) and decl. (right panels) for the TNOs and Centaurs in Tables from 5 to 6. In the upper panels, the number of observations is given as a function of the magnitude. In the lower panels, the exposure times are given as a function of the magnitude. In case of different exposure times for the same object, the longest one was considered. In all of the panels, the positional uncertainty is given in milliarcseconds and are color coded. The dashed line gives the median value (22.9) of the limiting magnitude in the r -band for these observations. In the upper panels, the TNO (437360) 2013 TV158 (see Table 5) is not shown due to its large number of observations (438). In all of the panels, the TNO 2015 RW245 is not shown because its large uncertainty prevented a clear visualization of the color variation.

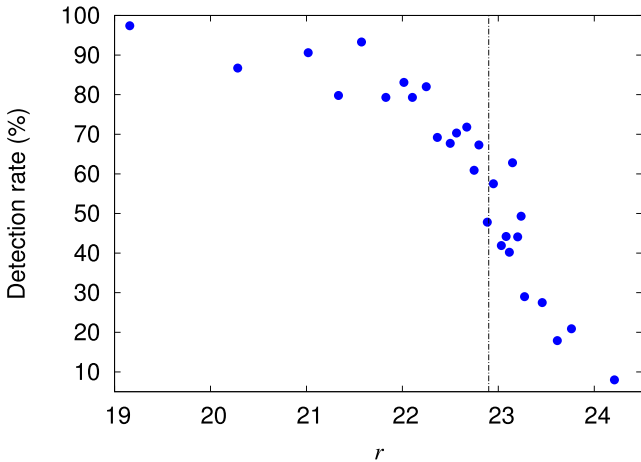


Figure 4. Detection efficiency as a function of the magnitude. No constraints on image quality are applied. The median limiting magnitude in the r -band (22.9), when accounting for τ , is indicated by the vertical dashed line. Only TNOs and Centaurs in Tables 5–6 with at least one measured magnitude in the r -band were considered.

obtained by adding

$$0.5 \times (\text{exposure time} + 1.05 \text{ s}) \quad (3)$$

Table 2

Differences between the Astrometric Results Presented Here and the DES Empirical Model

Type	$\Delta\alpha\cos\delta$ (mas)	$\Delta\delta$ (mas)	$\sigma_\alpha\cos\delta$ (mas)	σ_δ (mas)	Measurements
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
TNO	3	−4	11	9	142
Centaur	2	−5	12	5	22

Note. Columns (2) and (3): average of the differences between this work and the empirical model in R.A. and decl., respectively. Columns (4) and (5): standard deviation from the measurements used to determine the values in columns (2) and (3), respectively. Sense of the differences: this work minus the empirical model.

to the value of the Modified Julian Date (MJD) as read from the image headers (see Flaugher et al. 2015). This becomes particularly relevant when dealing with objects in the inner solar system.

4.5. Detection Efficiency

In Figure 4 we show the detection efficiency as measured by the number of observed positions divided by the number of images for a given object. This figure has contributions from all of the images matched to objects in Tables 5 and 6, including

Table 3
Overall Uncertainty Values

Mag. interval	Centroid (mas)				Reference Stars (mas)			
	<i>g</i>	<i>r</i>	<i>i</i>	<i>z</i>	<i>g</i>	<i>r</i>	<i>i</i>	<i>z</i>
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
$18 \leq \text{mag} < 19$	7	5	5	5	14	11	11	10
$19 \leq \text{mag} < 20$	11	6	5	6	14	12	11	10
$20 \leq \text{mag} < 21$	17	9	7	8	15	12	11	11
$22 \leq \text{mag}$	26	13	10	12	15	15	12	12

Note. Column (1): magnitude interval. Columns (2)–(5): precision in the determination of the centroid of TNOs and Centaurs as a function of the magnitude in a given filter. Columns (6)–(9): rms of the reference stars as a function of the magnitude in a given filter. Note: these magnitudes do not correlate directly to those from *Gaia*.

those taken under non-photometric sky. This efficiency justifies the more favorable detection statistics shown in Table 4 (column 3) as compared to the initial estimates given by Table 1. It is true that this latter, as opposed to Table 4, considers only those objects for which the uncertainty in the ephemeris is $\leq 2''$. However, Table 5 alone, with 114 entries, corroborates this better performance.

4.6. Orbits

Orbit refinement is a straightforward process with NIMA, once positions are obtained. One ephemeris (*bsp* format) file is provided for each of the 177 TNOs and each of the 25 Centaurs (see Table 4), from which the J2000 equatorial heliocentric state vector of each body at any time⁴³ can be obtained with the help of the SPICE/NAIF tools.

As far as stellar occultations are concerned, it is enough to be aware of an occultation event one or two years in advance so that the object’s ephemeris can be more intensively refined, if necessary, and the respective observation missions for the occultation can be organized. In this way, these ephemerides should be sufficiently accurate for 1–2 yr after the most recent observations and constant updates must be provided. Ideally, we consider an ephemeris to be sufficiently accurate when its 1σ uncertainty is smaller than the angular size of the respective occulting body and very few objects—(10199) Chariklo and Pluto among them—profit from such ephemerides. Observations like those from the DECam are invaluable to change this scenario.

One disadvantage of the *bsp* files is that they do not carry information on uncertainties. Our dedicated website provides an orbit quality table in which uncertainties are given in steps of six months to each target. These uncertainties vary from few to hundreds of milliarcseconds, depending mainly on the astrometric quality of the current epoch of observations.

The result of an ephemeris refinement is illustrated by Figures 2 (object from Table 6) and 6 panel (a) (object from Table 5). They compare the refined orbit with its counterpart from JPL and show the uncertainty of the refined orbit along with the recently observed positions of the respective solar system body. Among others, it helps to have a first idea of the work still needed to reach suitable uncertainties for successful predictions.

The waving pattern seen in Figure 6 panel (a) is a common feature. It is a consequence of the different heliocentric

⁴³ Limited to an interval of few decades (for instance, 2015–2025) to avoid large files.

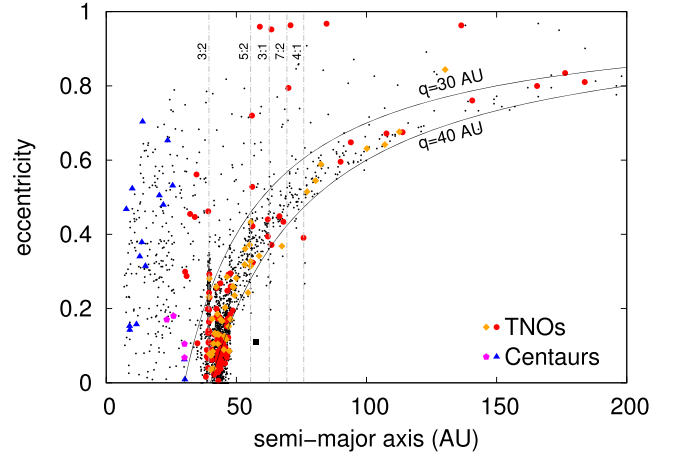


Figure 5. Distribution of the TNOs and Centaurs whose orbits were refined (red circles, orange diamonds, blue triangles, and magenta pentagons), along with others taken from the MPC (small back dots), in the $a \times e$ plane. Some mean motion resonances (MMR) with Neptune are also indicated. Objects discovered by the DES are given by orange diamonds (Centaurs) and magenta pentagons (TNOs). The black square shows the scattered disk object 2004 XR190, not observed by the DES.

Table 4
General Numbers from Images Containing Known TNOs and Centaurs

Type	Total	Ast	Pos	<i>g</i>	<i>r</i>	<i>i</i>	<i>z</i>	<i>griz</i>
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
TNO	270	177	3454	54	93	75	48	34
Centaur	67	25	545	9	6	9	6	3

Note. Columns (2): total number of objects at the start. Column (3): total number of objects with at least one position determined. Column (4): total number of positions determined. Columns (5)–(8): number of objects with at least 3 mag measurements in each indicated filter. Columns (9): number of objects with at least 3 mag measurements in each the four filters. Note: there were four positions measured in the *Y*-band and none measured in the *u*-band.

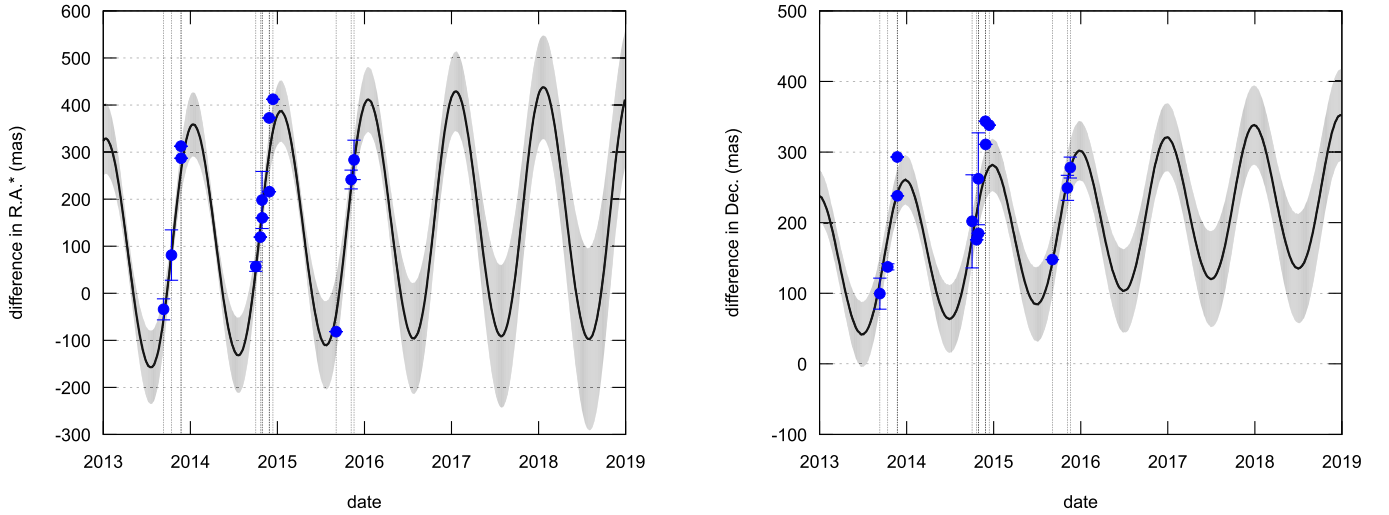
distances of the solar system bodies as determined from NIMA and JPL combined with the Earth’s motion around the Sun. Deep sky surveys like the DES also play a relevant role to improve the determination of these distances by providing observations at different phase angles.

Orbits determined in this work can be found from <http://lesia.obspm.fr/lucky-star/des/nima>. For each object, a text file lists the positions determined here as well as the respective observational history from AstDys⁴⁴ (MPC, if the object is not found in the AstDys) that were used to determine the orbit. The 1σ orbit uncertainty ($\sigma_\alpha \cos \delta$ and σ_δ) is given for a period of two years in steps of six months from the last observation. Orbits themselves are available in the *bsp* format. Details on the pages content are provided in a README file.

4.7. The $a \times e$ Plane

One important feature of surveys like DES is the possibility to provide a better insight on dynamical theories as the number of objects on which such theories may be employable increase through new discoveries. This is illustrated with the help of Figure 5.

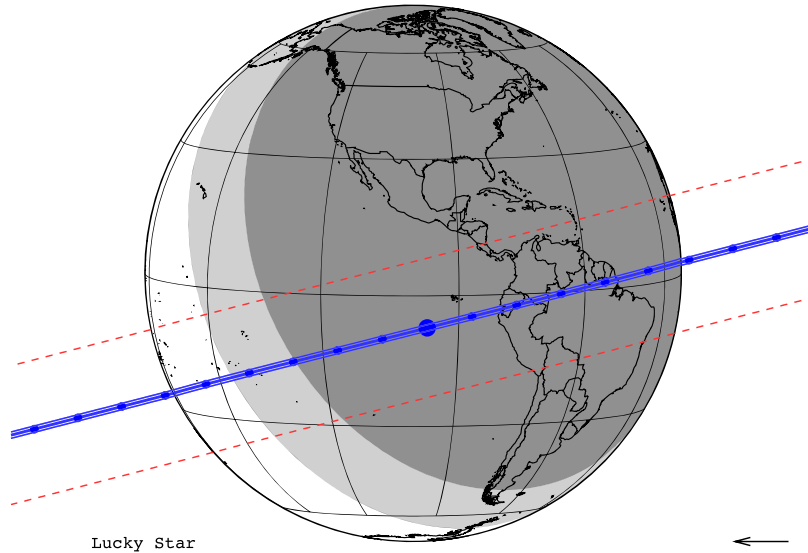
⁴⁴ <http://hamilton.dm.unipi.it/astdys/>



(a)

1999RB216, GAIADR2+pmGAIADR2, NIMAv1

Offset: 0.0mas 0.0mas



Lucky Star

yyyy mm dd hh:mm:ss.s	RA_star_J2000	DE_star_J2000	C/A	P/A	vel	Delta	G*	RP*
2018-12-03 04:04:00.4	02 11 24.3319	+04 44 01.424	0.056	165.53	-17.88	32.9763	19.8	18.7

(b)

Figure 6. Example of prediction result and orbit refinement for TNO (137295) 1999 RB216. Panel (a): same as that in Figure 2 for the TNO (137295) 1999 RB216. The ephemeris JPL#18 is used to determine the differences of NIMA minus JPL. This object belongs to the TNO main group (Table 5). Panel (b): occultation map showing the date and time (UTC) of the closest approach (largest blue point) between the shadow path and the geocenter; equatorial coordinates of the candidate star to be occulted; the closest approach (angular distance as seen from the occulting body, in arcseconds, between the geocenter and the largest blue dot); the position angle (angle measured, in degrees, from the north pole to the segment linking the geocenter and the largest blue point, counted clockwise); an estimate of the shadow speed on the Earth (km s^{-1}); the geocentric distance of the occulting body (au); the *Gaia* DR2 *G* magnitude of the occulted star normalized to a reference shadow speed of 20 km s^{-1} ; and the magnitude of the occulted star from the *Gaia* DR2 red photometer also normalized to the same reference shadow speed. The dark and white areas indicate nighttime and daylight, respectively. The gray zone shows the limits of the terminator (see also Assafin et al. 2010 for a detailed description). The distance between the blue lines indicates the diameter of the occulting body. The prediction uncertainty is given by the red dashed lines. The arrow in the bottom right corner of the map indicates the sense of the movement of the shadow.

Considering explicitly the osculating elements, it is interesting to note that the MPC lists, to date, 48 objects with $q > 40 \text{ au}$ and $a > 50 \text{ au}$. They constitute a conspicuous population of detached objects, for which mechanisms capable of increasing their perihelia is a subject of interest. Three of these—2013 VD24, 2014 QR441, and 2005 TB190—were observed by the DES, the first two being discovered by the survey. All of them are shown in Figure 5.

Gomes (2011) showed that there is a path between a scattering particle, induced by the migration of the giant planets, and the stable orbit similar to that of 2004 XR190 (black square in Figure 5, object not observed by the DES). This path results from a combination of Neptune’s migration and mean motion resonance (MMR) plus Kozai resonance. One of the features of this dynamical path is that the new stable

orbits escape the MMR of Neptune. The discovery of more objects by deep sky surveys with $q > 40$ au and $a > 50$ au may help to confirm this dynamical path.

2013 VD24 (close to the 5:2 resonance) and 2014 QR441 (close to the 7:2 resonance) are potentially among these objects. Numerical integrations of the equations of motion are necessary to check if they are not trapped in the resonances indicated in Figure 5. A more detailed study is ongoing.

4.8. Occultation Maps

A dedicated website also provides access to occultation prediction maps for the TNOs and Centaurs in this work.

These maps can be found at <http://lesia.obspm.fr/lucky-star/des/predictions> along with a link to specific ongoing campaigns where intense astrometric efforts are done to orbit improvement. These specific campaigns are those for which worldwide alerts are sent. The basic pieces of information given by the maps are as illustrated by Figure 6(b).

Prediction maps, plots with ephemeris uncertainties, as well as the respective ephemerides (bsp files) are available and are constantly updated at the websites mentioned earlier in the text.

5. Comments and Conclusions

We used 4,292,847 individual CCD frames from the DES collaboration to search for all known small bodies in the solar system. They represent a huge amount of high-quality data, obtained by a single instrument and treated in a homogeneous and reproducible way.

Our procedure provided accurate positions from the DECam images and can be extended to other detectors. The correction for the chromatic refraction is a step to profit from the full excellence in space metrology of the instrument. Such a correction is in progress.

The whole procedure, from image retrieval from the DES database to the prediction of stellar occultations, is part of a pipeline that is being implemented in a high-performance computational environment. Nevertheless, we interfered a number of times to check the data quality. As a result, the pipeline itself is refined.

The accuracy of the positions has a stronger dependence on the objects' magnitude than on its number of observations. This means that the low detection threshold adopted by the PRAIA software to extract the faintest sources did not compromise the quality of the results.

Our detection efficiency is around 90% to $r < 22$ and we detect objects as faint as $r \sim 24$, more than one magnitude fainter than the average limiting magnitude in the same band. Again, this indicates that the faintest sources were found.

The basic results provided here (astrometry, orbits, and predictions to TNOs and Centaurs) are constantly updated as more observations from the DES or from other telescopes become available, the LSST being a natural continuation of this work. These results are available in the dedicated websites.

M.V.B.H. acknowledges a CAPES fellowship. J.I.B.C. acknowledges CNPq grant 308150/2016-3. M.A. thanks the CNPq (grants 473002/2013-2 and 308721/2011-0) and FAPERJ (grant E-26/111.488/2013). R.V.-M. thanks grants CNPq-304544/2017-5 and 401903/2016-8. adn Faperj PAPDRJ-45/2013 and E-26/203.026/2015. F.B.-R. acknowledges CNPq grant 309578/2017-5. M.M.G. acknowledges a

Capes fellowship (Proc. n.º 88887.144443/2017-00). The work leading to these results has received funding from the National Institute of Science and Technology of the e-Universe project (INCT do e-Universo, CNPq grant 465376/2014-2). The work leading to these results has received funding from the European Research Council under the European Community's H2020 2014-2020 ERC grant Agreement n.º 669416 "Lucky Star."

Funding for the DES Projects has been provided by the U.S. Department of Energy, the U.S. National Science Foundation, the Ministry of Science and Education of Spain, the Science and Technology Facilities Council of the United Kingdom, the Higher Education Funding Council for England, the National Center for Supercomputing Applications at the University of Illinois at Urbana-Champaign, the Kavli Institute of Cosmological Physics at the University of Chicago, the Center for Cosmology and Astro-Particle Physics at the Ohio State University, the Mitchell Institute for Fundamental Physics and Astronomy at Texas A&M University, Financiadora de Estudos e Projetos, Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico and the Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, the Deutsche Forschungsgemeinschaft, and the collaborating institutions in the Dark Energy Survey.

The collaborating institutions are Argonne National Laboratory, the University of California at Santa Cruz, the University of Cambridge, Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas-Madrid, the University of Chicago, University College London, the DES-Brazil Consortium, the University of Edinburgh, the Eidgenössische Technische Hochschule (ETH) Zürich, Fermi National Accelerator Laboratory, the University of Illinois at Urbana-Champaign, the Institut de Ciències de l'Espai (IEEC/CSIC), the Institut de Física d'Altes Energies, Lawrence Berkeley National Laboratory, the Ludwig-Maximilians Universität München and the associated Excellence Cluster Universe, the University of Michigan, the National Optical Astronomy Observatory, the University of Nottingham, The Ohio State University, the University of Pennsylvania, the University of Portsmouth, SLAC National Accelerator Laboratory, Stanford University, the University of Sussex, Texas A&M University, and the OzDES Membership Consortium.

Based in part on observations at Cerro Tololo Inter-American Observatory, National Optical Astronomy Observatory, which is operated by the Association of Universities for Research in Astronomy (AURA) under a cooperative agreement with the National Science Foundation.

The DES data management system is supported by the National Science Foundation under grant Nos. AST-1138766 and AST-1536171. The DES participants from Spanish institutions are partially supported by MINECO under grants AYA2015-71825, ESP2015-66861, FPA2015-68048, SEV-2016-0588, SEV-2016-0597, and MDM-2015-0509, some of which include ERDF funds from the European Union. IFAE is partially funded by the CERCA program of the Generalitat de Catalunya. Research leading to these results has received funding from the European Research Council under the European Union's Seventh Framework Program (FP7/2007-2013) including ERC grant agreements 240672, 291329, and 306478. We acknowledge support from the Australian Research Council Centre of Excellence for All-sky Astrophysics (CAASTRO), through project No. CE110001020, and

the Brazilian Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia (INCT) e-Universe (CNPq grant 465376/2014-2).

This manuscript has been authored by Fermi Research Alliance, LLC under contract No. DE-AC02-07CH11359 with the U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of High Energy Physics. The United States Government retains and the publisher, by accepting the article for publication, acknowledges that the United States Government retains a non-exclusive, paid-up, irrevocable, worldwide license to publish or reproduce the published form of this manuscript, or allow others to do so, for United States Government purposes.

Special thanks to J. Giorgini (JPL—Pasadena—California) for the help with Horizons ephemerides. The authors acknowledge an anonymous referee for suggestions about the text.

Software: SkyBoT (Berthier et al. 2006), PRAIA (Assafin et al. 2011), NIMA (Desmars et al. 2015), easyaccess Carrasco Kind et al. 2018, (SPICE/NAIF Acton 1996; Acton et al. 2018).

Appendix Astrometric Results

Our results in astrometry are organized in Tables 5–7, below, according to their contribution to orbit refinement (main, extension, doubtful) as explained earlier in the text.

Table 5
Statistics from the Reduction of TNOs and Centaurs: Main Sources

Object	App. Mag.	R.A.- 3σ	Decl.- 3σ	$\sigma_{\alpha\cos\delta}$	σ_{δ}	Exposure	Positions	Detections	Images	Filters
Id.	^a	(mas) ^b		(mas)		min. (s) max.	(8)	(9)	(10)	(11)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
TNO										
1999 OZ3	23.1 (0.1)	2015	928	69	68	200 200	6	6	6	6r
2001 QP297	23.2 (0.3)	2605	1889	152	152	90 90	4	4	15	2r1i
2001 QQ297	23.19 (0.06)	2761	2168	285	134	90 90	6	6	20	2r
2001 QQ322	22.8 (0.2)	3154	1736	180	165	90 90	13	13	18	4r4i2z
2001 QS322	23.1 (0.1)	1774	1399	91	103	90 90	12	13	21	6r2i2z
2003 QQ91	23.4 (0.1)	1802	1662	83	174	90 90	6	6	16	1r1i
2003 QT91	23.5 (0.1)	3074	2141	60	89	90 90	4	4	15	1r1i
2003 QV90	22.9 (0.1)	4122	2598	196	124	90 90	3	3	17	1i
2003 QY111	23.3 (0.4)	3386	2144	191	219	90 90	5	5	17	2r
2003 QZ111	23.2 (0.1)	4725	2510	172	63	90 90	11	11	19	3r3i
2003 SQ317	23.0 (0.1)	4030	1745	98	94	90 90	10	14	19	3g4r1i1z
2003 SR317	23.2 (0.1)	438	311	174	115	90 90	4	4	15	1r1i
2003 UJ292	22.6 (0.4)	474	294	135	90	90 90	5	5	9	2i2z
2004 SC60	22.886 (0.008)	177	151	39	53	90 90	7	7	7	2g3r1i1z
2006 QF181	23.31 (0.09)	258	196	73	118	90 90	4	4	22	2r1i
2006 QQ180	23.3 (0.1)	1373	973	116	98	90 90	15	15	19	1g4r2i5z
2006 UO321	23.5 (0.1)	333	279	274	204	90 90	10	10	22	1g2r2i
2007 TD418	24.27 (0.06)	2190	738	154	123	90 200	26	29	133	4g6r4i2z
2007 TZ417	23.7 (0.2)	1356	1598	56	276	90 90	14	14	31	4g5r1i
2010 RD188	22.17 (0.02)	1718	1630	429	209	90 90	13	13	13	3g4r3i3z
2010 RF188	23.4 (0.1)	437	285	262	58	90 90	10	10	12	1g3r4i2z
2010 RF64	21.5 (0.1)	2213	1188	175	94	90 90	11	11	16	3g3r3i1z
2010 RO64	22.12 (0.05)	141	128	37	43	90 90	4	4	10	2g1r1i
2010 TJ	22.00 (0.04)	1854	1785	102	95	90 90	13	14	15	2g3r2i4z
2010 TY53	20.90 (0.07)	138	176	37	13	90 90	19	20	20	6g7r1i5z
2012 TC324	22.81 (0.06)	122	103	97	119	90 90	24	24	26	5g3r5i6z
2012 TD324	23.1 (0.1)	708	444	260	181	90 90	9	9	14	4g1r1i2z
2012 YO9	23.6 (0.2)	1711	1759	169	174	90 200	22	25	174	5r2i
2013 QP95	23.4 (0.1)	144	261	93	67	90 400	203	218	321	20g21r40i84z
2013 RB98	23.5 (0.1)	870	1004	190	117	90 200	51	53	92	4g11r12i13z
2013 RD98	24.13 (0.06)	314	399	163	137	90 400	165	188	655	4g25r32i19z
2013 RR98	23.85 (0.02)	3450	3244	98	129	90 90	14	16	30	2g2r4i5z
2013 SE99	24.0 (0.1)	982	1195	226	232	150 400	30	46	479	3i
2013 SZ99	23.6 (0.2)	458	357	273	349	90 90	6	6	19	1r1i
2013 TH159	24.2 (0.2)	5163	3873	171	158	200 400	41	60	670	1g7r1i
2013 TM159	23.3 (0.2)	727	486	129	122	90 90	17	17	24	2g3r4i3z
2013 UK15	23.2 (0.1)	4669	2236	248	58	90 90	3	3	6	1r1i
2013 UO15	22.9 (0.1)	320	254	56	96	90 90	4	4	10	1r1i
2013 UQ15	23.440 (0.004)	473	387	120	86	90 90	5	5	11	2g3r
2013 UR15	23.7 (0.2)	492	336	168	77	90 90	6	6	16	1g1r2i
2014 GE54	22.81 (0.07)	151	128	41	43	150 150	20	21	35	6g6r4i3z
2014 LO28	21.69 (0.08)	213	107	30	37	90 90	13	13	14	5g3r3i1z
2014 OD394	22.93 (0.08)	3146	663	56	40	90 90	6	6	14	1g2r2i1z
2014 OQ394	22.29 (0.09)	152	114	55	79	90 90	7	7	8	3r2i1z
2014 OR394	22.7 (0.1)	241	165	100	185	90 90	4	4	5	1r1i1z

Table 5
(Continued)

Object	App. Mag.	R.A.- 3σ	Decl.- 3σ	$\sigma_{\alpha}\cos\delta$	σ_{δ}	Exposure	Positions	Detections	Images	Filters
Id.	^a	(mas) ^b		(mas)		min. (s) max.	(8)	(9)	(10)	(11)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
2014 QA442	21.113 (0.003)	272	290	114	52	90 90	10	10	26	2g4r2i2z
2014 QC442	23.3 (0.1)	2772	683	363	58	90 90	4	5	9	1g1r1i1z
2014 QE442	23.73 (0.05)	4058	2250	90	104	90 200	10	17	37	3g1r4i
2014 QF442	23.8 (0.3)	5780	5998	149	151	90 90	13	14	25	3g4r2i
2014 QG442	23.03 (0.05)	3160	3239	140	272	90 90	14	14	22	4g4r6i
2014 QL441	22.8 (0.2)	2024	683	136	130	90 200	73	102	111	11g14r16i29z
2014 QM441	23.5 (0.2)	1225	470	152	110	90 200	70	86	153	6g15r21i21z
2014 QR441	23.7 (0.1)	1625	2738	130	87	90 200	83	93	177	11g22r19i17z
2014 QU441	26.0 (0.1)	5857	3317	117	104	90 200	27	29	106	1g8r5i1z
2014 SK349	22.7 (0.1)	248	190	33	54	90 90	21	22	22	6g5r6i4z
2014 SQ350	24.00 (0.08)	3726	2697	112	126	90 400	44	53	208	5g9r12i2z
2014 SZ348	24.44 (0.08)	911	1313	131	115	90 400	197	239	515	7g36r52i45z
2014 TT85	23.6 (0.2)	620	845	168	149	90 200	31	39	260	6r6i
2014 UF224	24.1 (0.1)	1050	1558	158	163	90 400	84	105	499	3g15r14i7z
2014 UZ224	23.75 (0.02)	2322	3439	89	75	90 90	13	13	19	2g4r5i1z
2014 XY40	23.01 (0.05)	2780	2735	138	87	90 90	13	13	15	3g4r3i3z
2015 PD312	23.6 (0.1)	5337	2765	172	125	90 200	16	21	55	1g4r4i
2015 PF312	22.82 (0.07)	1832	726	75	68	90 200	37	39	57	8g10r8i7z
2015 RR245	22.624 (0.001)	118	90	19	54	90 90	5	5	6	2g2r1i
2015 RT245	22.9 (0.1)	1582	1000	113	70	90 90	9	9	16	3r4i2z
2015 RU245	23.9 (0.2)	4749	799	88	111	90 90	9	13	20	1g2r2i
2015 RW245	23.11 (0.09)	5624	5717	655	445	90 90	6	6	16	1r1i1z
2015 TS350	23.06 (0.09)	866	2444	51	79	90 90	7	8	11	1g1r4z
2015 UK84	23.22 (0.08)	5265	5214	40	98	90 90	14	14	19	2g3r4i5z
(119956) 2002 PA149	23.2 (0.1)	2322	1471	177	139	90 90	11	11	16	1g2r4i2z
(120348) 2004 TY364	21.01 (0.09)	182	209	71	28	90 90	19	19	19	4g6r4i4z
(134210) 2005 PQ21	23.5 (0.1)	1828	1179	89	50	90 90	8	8	18	1g2r2i
(136199) Eris 2003 UB313	19.05 (0.02)	120	109	8	8	90 90	21	22	22	6g3r5i7z
(137295) 1999 RB216	23.1 (0.1)	777	382	143	82	90 90	25	25	26	6g6r6i6z
(139775) 2001 QG298	22.5 (0.2)	127	101	44	46	90 90	14	14	14	4g4r2i4z
(143707) 2003 UY117	20.97 (0.08)	128	99	20	82	90 90	3	3	4	1i2z
(144897) 2004 UX10	21.00 (0.02)	75	76	48	20	90 90	6	6	6	1g3r1i1z
(145452) 2005 RN43	20.36 (0.08)	104	77	8	10	90 90	11	11	11	3g2r2i4z
(145474) 2005 SA278	22.6 (0.1)	153	138	43	25	90 90	19	19	22	7g4r5i2z
(145480) 2005 TB190	21.65 (0.09)	108	73	79	30	90 90	19	19	19	6g4r4i4z
(184212) 2004 PB112	23.9 (0.2)	1376	1124	122	101	90 90	8	8	10	1g2r3i1z
(303775) 2005 QU182	21.26 (0.03)	140	128	88	50	90 90	9	9	10	1g1r3i4z
(307616) 2003 QW90	22.25 (0.03)	99	76	31	50	90 90	16	17	19	4g3r5i4z
(309239) 2007 RW10	21.67 (0.07)	89	91	47	20	90 90	16	17	17	4g3r5i4z
(385191) 1997 RT5	23.3 (0.2)	2466	1746	116	58	90 90	7	7	16	3r4i
(385199) 1999 OE4	23.16 (0.05)	594	498	60	31	200 200	6	6	6	6r
(385201) 1999 RN215	22.9 (0.3)	1936	1607	127	247	90 90	6	6	17	3r2i
(385458) 2003 SP317	23.49 (0.04)	2827	1930	101	34	90 90	6	6	21	2r1z
(437360) 2013 TV158	22.8 (0.1)	101	121	52	46	90 400	438	467	504	44g72r10i1214z
(44594) 1999 OX3	20.972 (0.005)	90	66	14	20	90 90	9	9	9	2g3r2i2z
(451657) 2012 WD36	24.0 (0.1)	376	416	156	129	90 200	46	51	195	4g12r6i2z
(455171) 1999 OM4	23.2 (0.1)	584	574	32	76	200 200	6	6	6	6r
(469372) 2001 QF298	22.0 (0.1)	123	97	34	49	90 90	16	16	16	4g4r4i4z
(469750) 2005 PU21	23.24 (0.07)	137	97	122	73	90 90	19	20	21	4g4r4i5z
(47171) Lempo 1999 TC36	20.59 (0.04)	76	66	32	18	90 90	11	12	12	2g2r4i3z
(471954) 2013 RM98	22.4 (0.2)	121	92	79	67	90 150	18	18	21	7g3r5i3z
(472262) 2014 QN441	22.8 (0.2)	113	148	60	40	90 200	90	94	109	14g19r20i36z
(480017) 2014 QB442	23.3 (0.1)	148	125	64	42	90 90	19	21	26	3g6r5i5z
(483002) 2014 QS441	22.2 (0.2)	586	601	70	85	90 200	26	27	49	6g6r5i9z
(491767) 2012 VU113	24.0 (0.2)	285	404	181	108	90 200	40	47	107	3g14r7i4z
(491768) 2012 VV113	23.6 (0.1)	448	545	163	139	90 200	32	38	196	4r8i2z
(495189) 2012 VR113	23.3 (0.1)	359	310	97	92	90 200	74	78	114	7g16r17i21z
(495190) 2012 VS113	23.5 (0.1)	515	426	119	68	90 400	191	200	254	24g32r52i70z
(495297) 2013 TJ159	23.2 (0.1)	2334	1310	77	58	90 150	17	18	24	1g3r5i4z
(503883) 2001 QF331	23.458 (0.007)	344	271	138	89	90 90	11	11	17	2g3r3i1z
(504555) 2008 SO266	22.3 (0.2)	121	134	38	51	90 90	19	19	19	6g6r4i3z

Table 5
(Continued)

Object Id.	App. Mag. ^a	R.A.- 3σ (mas) ^b	Decl.- 3σ (mas)	$\sigma_{\alpha}\cos\delta$ (mas)	σ_{δ} (mas)	Exposure min. (s) max.	Positions (8)	Detections (9)	Images (10)	Filters (11)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
(504847) 2010 RE188	22.8 (0.1)	286	198	99	45	90 90	4	4	5	1g1r1i1z
(505412) 2013 QO95	23.4 (0.1)	439	371	76	105	90 200	46	52	81	7g10r12i12z
(505446) 2013 SP99	23.3 (0.2)	416	280	178	132	90 90	8	8	17	2r2i
(505447) 2013 SQ99	23.2 (0.1)	322	239	129	57	90 90	10	10	19	1g2r4i
(505448) 2013 SA100	23.4 (0.3)	352	258	65	83	90 90	15	15	20	2g4r6i2z
(505476) 2013 UL15	23.8 (0.2)	392	253	78	69	90 90	4	4	11	1g3r
(508338) 2015 SO20	22.5 (0.1)	127	105	49	27	90 90	17	19	20	4g4r5i3z
(87555) 2000 QB243	23.8 (0.1)	2956	2056	68	102	90 90	6	6	7	1g2r2i1z
Centaur										
2004 DA62	23.30 (0.03)	1471	4914	90	36	90 90	4	4	15	2r2i
2007 UM126	22.5 (0.1)	4629	815	83	54	90 90	18	19	22	7g4r5i1z
2011 SO277	23.3 (0.1)	420	368	45	64	90 90	16	17	19	4g1r6i4z
2012 PD26	22.72 (0.09)	1591	783	311	172	90 90	11	13	15	5g2r1i2z
2013 RG98	23.3 (0.1)	264	780	85	78	90 400	207	224	271	23g31r4i97z1Y
2014 OX393	22.70 (0.06)	779	452	86	62	90 90	4	4	5	1g1r1i1z
2014 QO441	23.63 (0.06)	254	350	87	97	90 400	119	145	301	13g19r3i134z
2014 QP441	23.8 (0.3)	866	593	111	95	90 400	74	123	436	2g17r17i11z
2014 SB349	23.80 (0.04)	2793	1964	110	39	90 200	12	18	62	2g3r4i2z
2014 SS303	22.07 (0.05)	5559	2124	71	52	90 90	4	5	7	1r1i2z
2015 RV245	23.61 (0.07)	2878	3169	260	23	90 90	4	4	7	2g1r1i
2015 VV1	21.77 (0.03)	85	87	27	36	90 90	4	4	4	1g2r1i
(2060) Chiron 1977 UB	18.5 (0.2)	53	50	18	13	90 90	7	7	7	3g1r1i2z
(472265) 2014 SR303	22.0 (0.2)	95	79	27	30	90 90	18	19	22	6g6r3i3z

Notes. Column (1): object identification. Those discovered by the DES are highlighted. Column (2): average magnitude as obtained from the bluest filter. Columns (3) and (4): 3σ uncertainty in the ephemeris position in R.A. and decl., respectively. Columns (5) and (6): standard deviations as obtained from the observed positions minus those from the respective JPL ephemeris, in R.A. and decl., respectively. Column (7): minimum and maximum exposure times of the images from which a position was obtained. Columns (8), (9), and (10): number of positions obtained, number of detections delivered by the astrometric code (all positions, no eliminations), and total number of images with exposure times greater than or equal to 50 s, respectively. Column (11): number of magnitudes per filter found to a given object in the DES database. Note that the total number of filters in each row of column (11) is always less than or equal to the respective number of positions in column (8). This is because either a magnitude was not found in the DES database for a given position or the position itself was not found in the DES database.

^a Bluest magnitude from the DES. If no magnitude from the DES is available, V magnitude given by JPL—Horizons System—is used.

^b As provided by JPL, Horizons System.

Table 6
Statistics from the Reduction of TNOs and Centaurs: Extension Sources

Object Id.	App. Mag. ^a	R.A.- 3σ (mas) ^b	Decl.- 3σ (mas)	$\sigma_{\alpha}\cos\delta$ (mas)	σ_{δ} (mas)	Exposure min. (s) max.	Positions (8)	Detections (9)	Images (10)	Filters (11)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
TNO										
(160091) 2000 OL67	23.2 (0.2)	15828	7732	42	61	90 90	6	6	16	2r2i1z
2013 RP98	23.58 (0.08)	20450	5490	57	62	90 90	7	7	15	2g1r3i1z
2013 RQ98	23.0 (0.2)	27691	13113	80	115	90 90	7	11	29	3r2i
(160256) 2002 PD149	23.6 (0.2)	17727	8159	150	90	90 90	7	7	14	1g2r1i1z
2003 QX111	23.0 (0.2)	9090	3775	98	106	90 90	9	11	19	2r4i3z
2014 SR350	23.1 (0.1)	20122	7973	97	88	90 90	9	12	26	4r3i
2015 PL312	23.94 (0.08)	30292	15722	112	169	90 400	9	23	199	3r
2014 UY224	23.53 (0.06)	9915	9898	103	126	90 90	12	12	19	2g4r3i1z
2014 UC225	23.39 (0.09)	11304	6057	128	97	90 90	13	13	21	3g5r3i2z
2014 UN225	23.1 (0.1)	32391	24659	43	49	90 90	14	16	17	4g3r4i2z
2014 VW37	23.3 (0.1)	3657	7506	120	93	90 90	18	18	21	4g3r5i4z
2013 RF98	24.1 (0.1)	6582	6114	87	109	200 400	30	55	301	5r7i1z
Centaur										
2013 PQ37	19.93 (0.06)	31300	12480	0.053	0.016	90 90	7	7	7	2r2i3z

Note. Same as that for Table 5.

Table 7
Statistics from the Reduction of TNOs and Centaurs—Doubtful Sources












































Object Id. (1)	App. Mag. ^a (2)	R.A.- 3σ (mas) ^b (3)	Decl.- 3σ (4)	$\sigma_{\alpha}\cos\delta$ (mas) (5)	σ_{δ} (6)	Exposure min. (s) max. (7)	Positions (8)	Detections (9)	Images (10)	Filters (11)
TNO										
1996 RR20	22.802 (0.006)	7994	3676	221	177	90 90	4	4	15	2i1z
1999 RG215	23.7 (0.2)	2919	1919			90 90	1	1	9	1r
1999 RK215	24.23	2590	2135			90 90	1	1	15	
2000 PC30	23.8 (0.2)	47499	19797	174	74	200 200	4	4	6	3r
2000 PY29	23.9 (0.2)	9129	4247	97	97	200 200	4	4	6	1r
2000 QD226	23.65	>10 ⁶	>10 ⁶			90 90	1	1	21	
2001 QH298	22.88 (0.09)	1824	1851			90 90	1	1	16	1g
2001 QO297	23.6 (0.2)	22524	9941	154	148	90 90	3	3	19	1g1r1i
2002 PD155	23.53	20548	11298			90 90	1	1	22	
2002 PG150	21.61 (0.07)	>10 ⁶	>10 ⁶			90 90	1	1	13	1z
2002 PK149	22.48 (0.09)	>10 ⁶	>10 ⁶			90 90	1	1	12	1g
2003 QB91	23.1 (0.1)	11356	5215	493	51	90 90	4	4	22	1r1i
2005 PE23	26.93	>10 ⁶	>10 ⁶			90 90	1	1	21	
2005 PP21	22.88	>10 ⁶	>10 ⁶			90 90	1	1	11	
2005 SE278	22.19 (0.07)	1897	1498	47	30	90 90	2	2	3	1i1z
2006 QC181	22.00 (0.05)	>10 ⁶	>10 ⁶			90 90	1	1	15	1g
2006 QD181	22.88	>10 ⁶	>10 ⁶			90 90	1	1	13	
2006 QZ180	23.59	>10 ⁶	>10 ⁶			90 90	1	1	23	
2008 UA332	23.03 (0.08)	>10 ⁶	>10 ⁶			90 90	1	1	17	1g
2010 JH124	23.2 (0.1)	20165	1810	798	1.050	90 150	3	3	43	1r1i
2013 KZ18	21.65	136	104			90 90	1	1	4	1z
2013 RO98	22.74 (0.08)	>10 ⁶	>10 ⁶	44	72	90 90	16	16	18	4g4r4i4z
2013 UP15	24.06	370	260			90 90	1	1	7	
2013 VD24	24.6 (0.2)	107390	54984	113	172	330 400	5	9	408	1r
2013 VJ24	23.90	>10 ⁶	>10 ⁶			90 90	1	1	15	
2014 NB66	22.86 (0.02)	217	115	50	69	90 90	2	2	4	2g
2014 PR70	22.98 (0.07)	226	136	175	190	90 90	2	2	2	1g1z
2014 RS63	22.62 (0.06)	85434	52414	61	131	90 90	6	6	13	3i1z
2014 SN350	22.87 (0.09)	28123	37105	169	147	90 90	6	6	21	3r1i
2014 SO350	24.0 (0.2)	91741	33931	229	67	90 90	7	8	23	1g2r3i
2014 TB86	23.2 (0.1)	165206	42723	68	69	90 90	9	11	23	1g3r2i2z
2014 TE86	23.2 (0.3)	23334	38078	190	140	90 90	9	9	19	2g3r1i
2014 TF86	23.5 (0.2)	47829	27854	150	119	90 90	12	12	26	1g5r2i2z
2014 TU85	23.38 (0.02)	860527	132551	256	95	90 200	4	4	46	2r1i
2014 UA225	23.37 (0.06)	441418	196089	66	89	90 90	11	11	22	3g2r3i3z
2014 UB225	22.74 (0.05)	>10 ⁶	>10 ⁶	57	41	90 90	7	7	10	3r1i2z
2014 VT37	24.06 (0.09)	196302	93079	106	123	150 200	11	11	74	2g3r1i
2014 YL50	23.4 (0.1)	43878	78972	129	178	90 90	12	12	14	4g3r3i1z
2014 XZ40	23.53 (0.02)	72326	56308	52	128	90 90	5	5	18	2g2r1i
2015 PK312	25.01	>10 ⁶	224438	330	1.328	90 330	3	3	133	
2015 QT11	24.3 (0.2)	465277	218826	188	179	150 400	9	11	239	1g2i
2015 RS245	24.05	46613	5685	833	929	90 200	4	4	87	
2015 RX245	24.35	1320	1461	161	446	90 90	2	2	28	
2015 SV20	22.56	>10 ⁶	>10 ⁶			90 90	1	1	13	
2015 TN178	21.4 (0.5)	175	641	267	371	90 90	2	2	2	2i
2016 QP85	23.6 (0.2)	>10 ⁶	306619	660	236	90 90	3	3	13	1r
(148112) 1999 RA216	22.7 (0.1)	2402	1746	190	216	90 90	2	2	12	1i
(307982) 2004 PG115	20.63 (0.01)	132	77			90 90	1	1	1	1r
(474640) 2004 VN112	23.42	748	816			90 90	1	1	1	
(501581) 2014 OB394	21.42 (0.03)	136	97	37	37	90 90	2	2	2	1i1z
(506121) 2016 BP81	23.2 (0.1)	397	276	74	137	90 90	2	2	3	1gli
Centaur										
2007 VL305	22.7 (0.1)	11377	2924	266	245	90 90	3	3	7	1r
2011 OF45	21.12 (0.04)	565	334			90 90	1	1	1	1z
2013 RN30	22.6 (0.2)	7971879	5872040	516	1.049	90 90	3	3	22	2g1z
2013 SV99	24.1 (0.1)	2145099	1273035	192	151	90 400	16	20	55	4g2r5i
2013 TS20	21.83 (0.03)	36400409	14095067			90 90	1	1	6	1g
2014 SW223	21.83 (0.05)	762	545			90 90	1	1	1	1i
2014 TK34	21.14 (0.03)	310	197			90 90	1	1	1	1i

Table 7
(Continued)

Object Id.	App. Mag. a	R.A.-3 σ (mas) ^b	Decl.-3 σ	$\sigma_{\alpha}\cos\delta$ (mas)	σ_{δ}	Exposure min. (s) max.	Positions	Detections	Images	Filters
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
2015 VT152	23.5 (0.1)	1501899	1234480	112	41	90 90	6	9	16	1g2r3i
2016 VF1	21.71 (0.04)	53403030	272552177	644	1.161	90 90	3	3	20	1i
(471339) 2011 ON45	21.04 (0.07)	115	74			90 90	1	1	1	1z

Note. Same as that for Table 5.

ORCID iDs

M. V. Banda-Huarca  <https://orcid.org/0000-0002-2085-9467>
 J. I. B. Camargo  <https://orcid.org/0000-0002-1642-4065>
 J. Desmars  <https://orcid.org/0000-0002-2193-8204>
 R. L. C. Ogando  <https://orcid.org/0000-0003-2120-1154>
 R. Vieira-Martins  <https://orcid.org/0000-0003-1690-5704>
 M. Assafin  <https://orcid.org/0000-0002-8211-0777>
 G. M. Bernstein  <https://orcid.org/0000-0002-7555-2956>
 M. Carrasco Kind  <https://orcid.org/0000-0002-4802-3194>
 A. Drlica-Wagner  <https://orcid.org/0000-0001-8251-933X>
 R. Gomes  <https://orcid.org/0000-0001-5712-3042>
 F. Braga-Ribas  <https://orcid.org/0000-0003-2311-2438>
 M. A. G. Maia  <https://orcid.org/0000-0001-9856-9307>
 D. W. Gerdes  <https://orcid.org/0000-0001-6942-2736>
 S. Hamilton  <https://orcid.org/0000-0002-6126-8487>
 F. B. Abdalla  <https://orcid.org/0000-0003-2063-4345>
 S. Allam  <https://orcid.org/0000-0002-7069-7857>
 D. Brooks  <https://orcid.org/0000-0002-8458-5047>
 D. L. Burke  <https://orcid.org/0000-0003-1866-1950>
 A. Carnero Rosell  <https://orcid.org/0000-0003-3044-5150>
 J. Carretero  <https://orcid.org/0000-0002-3130-0204>
 J. De Vicente  <https://orcid.org/0000-0001-8318-6813>
 H. T. Diehl  <https://orcid.org/0000-0002-8357-7467>
 J. Frieman  <https://orcid.org/0000-0003-4079-3263>
 J. García-Bellido  <https://orcid.org/0000-0002-9370-8360>
 D. Gruen  <https://orcid.org/0000-0003-3270-7644>
 R. A. Gruendl  <https://orcid.org/0000-0002-4588-6517>
 J. Gschwend  <https://orcid.org/0000-0003-3023-8362>
 G. Gutierrez  <https://orcid.org/0000-0003-0825-0517>
 D. L. Hollowood  <https://orcid.org/0000-0002-9369-4157>
 D. J. James  <https://orcid.org/0000-0001-5160-4486>
 K. Kuehn  <https://orcid.org/0000-0003-0120-0808>
 N. Kuropatkin  <https://orcid.org/0000-0003-2511-0946>
 F. Menanteau  <https://orcid.org/0000-0002-1372-2534>
 R. Miquel  <https://orcid.org/0000-0002-6610-4836>
 A. A. Plazas  <https://orcid.org/0000-0002-2598-0514>
 A. K. Romer  <https://orcid.org/0000-0002-9328-879X>
 E. Sanchez  <https://orcid.org/0000-0002-9646-8198>
 M. Smith  <https://orcid.org/0000-0002-3321-1432>
 M. Soares-Santos  <https://orcid.org/0000-0001-6082-8529>
 F. Sobreira  <https://orcid.org/0000-0002-7822-0658>
 E. Suchyta  <https://orcid.org/0000-0002-7047-9358>
 M. E. C. Swanson  <https://orcid.org/0000-0002-1488-8552>
 G. Tarle  <https://orcid.org/0000-0003-1704-0781>

References

Acton, C., Bachman, N., Semenov, B., & Wright, E. 2018, *P&SS*, **150**, 9
 Acton, C. H. 1996, *P&SS*, **44**, 65
 Assafin, M., Camargo, J. I. B., Vieira Martins, R., et al. 2010, *A&A*, **515**, A32
 Assafin, M., Vieira-Martins, R., Andrei, A. H., Camargo, J. I. B., & da Silva Neto, D. N. 2013, *MNRAS*, **430**, 2797
 Assafin, M., Vieira Martins, R., Camargo, J. I. B., et al. 2011, in Gaia Follow-up Network for the Solar System Objects: Gaia FUN-SSO Workshop Proc., ed. P. Tanga & W. Thuillot (Paris: Paris Observatory), 85
 Barucci, M. A., Boehnhardt, H., Cruikshank, D. P., Morbidelli, A., & Dotson, R. 2008, *The Solar System Beyond Neptune* (Tucson, AZ: Univ. Arizona Press)
 Bernstein, G. M., Armstrong, R., Plazas, A. A., et al. 2017, *PASP*, **129**, 074503
 Berthier, J., Vachier, F., Thuillot, W., et al. 2006, in ASP Conf. Ser. 351, *Astronomical Data Analysis Software and Systems XV*, ed. C. Gabriel et al. (San Francisco, CA: ASP), 367
 Braga-Ribas, F., Sicardy, B., Ortiz, J. L., et al. 2013, *ApJ*, **773**, 26
 Braga-Ribas, F., Sicardy, B., Ortiz, J. L., et al. 2014, *Natur*, **508**, 72
 Carrasco Kind, M., Drlica-Wagner, A., & Koziol, A. 2018, easyaccess: SQL Command Line Interpreter for Astronomical Surveys, Astrophysics Source Code Library, ascl:1812.008
 Cowperthwaite, P. S., Berger, E., Soares-Santos, M., et al. 2016, *ApJL*, **826**, L29
 Dark Energy Survey Collaboration, Abbott, T., Abdalla, F. B., et al. 2016, *MNRAS*, **460**, 1270
 Desmars, J., Camargo, J. I. B., Braga-Ribas, F., et al. 2015, *A&A*, **584**, A96
 Dias-Oliveira, A., Sicardy, B., Ortiz, J. L., et al. 2017, *AJ*, **154**, 22
 Elliot, J. L., Person, M. J., Zuluaga, C. A., et al. 2010, *Natur*, **465**, 897
 Fernández, Y. R., Jewitt, D. C., & Sheppard, S. S. 2002, *AJ*, **123**, 1050
 Flaugher, B. 2005, *IJMPA*, **20**, 3121
 Flaugher, B., Diehl, H. T., Honscheid, K., et al. 2015, *AJ*, **150**, 150
 Gaia Collaboration, Brown, A. G. A., Vallenari, A., et al. 2018, *A&A*, **616**, A1
 Gerdes, D. W., Sako, M., Hamilton, S., et al. 2017, *ApJL*, **839**, L15
 Gomes, R. S. 2011, *Icar*, **215**, 661
 Gomes-Júnior, A. R., Assafin, M., Beauvalet, L., et al. 2016, *MNRAS*, **462**, 1351
 Gomes-Júnior, A. R., Giacchini, B. L., Braga-Ribas, F., et al. 2015, *MNRAS*, **451**, 2295
 Iorio, L. 2007, *MNRAS*, **375**, 1311
 Le Fèvre, O., Vettolani, G., Garilli, B., et al. 2005, *A&A*, **439**, 845
 Lindegren, L., Hernandez, J., Bombrun, A., et al. 2018, *A&A*, **616**, A2
 Lindegren, L., Lammers, U., Bastian, U., et al. 2016, *A&A*, **595**, A4
 LSST Science Collaboration, Abell, P. A., Allison, J., et al. 2009, arXiv:0912.0201
 Ma, C., Arias, E. F., Eubanks, T. M., et al. 1998, *AJ*, **116**, 516
 Morganson, E., Gruendl, R. A., Menanteau, F., et al. 2018, *PASP*, **130**, 074501
 Neilsen, E., Bernstein, G., Gruendl, R., & Kent, S. 2015, Limiting Magnitude, τ , teff, and Image Quality, FERMLAB-TM-2610-AE-CD
 Ortiz, J. L., Santos-Sanz, P., Sicardy, B., et al. 2017, *Natur*, **550**, 219
 Ortiz, J. L., Sicardy, B., Braga-Ribas, F., et al. 2012, *Natur*, **491**, 566
 Peebles, P. J., & Ratra, B. 2003, *RvMP*, **75**, 559
 Perlmutter, S., Aldering, G., della Valle, M., et al. 1998, *Natur*, **391**, 51
 Riess, A. G., Filippenko, A. V., Challis, P., et al. 1998, *AJ*, **116**, 1009
 Sicardy, B., Ortiz, J. L., Assafin, M., et al. 2011, *Natur*, **478**, 493
 Sicardy, B., Talbot, J., Meza, E., et al. 2016, *ApJL*, **819**, L38
 Thuillot, W., Bancelin, D., Ivantsov, A., et al. 2015, *A&A*, **583**, A59
 Widemann, T., Sicardy, B., Dusser, R., et al. 2009, *Icar*, **199**, 458