

Dissertação de mestrado em Astronomia

Pipeline Fotométrico e Astrométrico para o Projeto IMPACTON

Mário Nascimento De Prá



**Observatório
Nacional**

Observatório Nacional
Coordenação de Astronomia e Astrofísica

Orientador

Prof. Dr. Jorge Carvano

Banca Examinadora

Prof. Dr. Júlio Camargo

Prof. Dr. Paulo Penteado

Prof. Dr. Fernando Roig (suplente)

Prof. Dr. Alvaro Candal (suplente)

DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação a minha família e amigos, pelo incentivo e apoio em todos esses anos.

“O Tempo achatou!”

Natália Gimenes

"A utopia está lá no horizonte. Me
aproximo dois passos, ela se afasta
dois passos. Caminho dez passos e o
horizonte corre dez passos. Por mais
que eu caminhe, jamais alcançarei.
Para que serve a utopia? Serve para
isso: para que eu não deixe de
caminhar."

Eduardo Galeano

Agradecimentos

Ao meu orientador, Prof Dr. Jorge Márcio Carvano, pela idealização do trabalho, pelo suporte e paciência ao longo destes dois anos.

Ao grupo de Ciências Planetárias do Observatório Nacional: Prof. Dra Daniela Lazzaro, Prof. Dr Fernando Roig, e todos os alunos, pela oportunidade de participar de um grupo qualificado e diversificado onde é feita uma constante discussão de diversos temas científicos e ainda pelas jornadas observacionais no OASI/IMPACTON.

Ao Prof. Dr. Julio Camargo e Prof. Dra. Lynne Jones, pelo apoio ao trabalho, e pelo tempo tomei com duvidas e dificuldades encontradas.

Aos meus colegas do Observatório Nacional, pelas diversas discussões ocorridas nas salas ou na copa, e pela ajuda e apresentação de ferramentas, muitas delas utilizadas nesta dissertação.

A equipe do Gaturamo Observatório Astronômico, por me mostrar e incentivar a seguir a carreira da astronomia profissional.

A todos, que de alguma forma contribuíram para esta dissertação.

Resumo

A determinação da União Astronomia Internacional (IAU) mobilizou a comunidade astronômica observacional em reunir esforços para catalogar 90% dos asteroides próximos a Terra com diâmetro maior a 140m até 2020.

Com este proposito alguns programas de busca sistemática foram desenvolvidos. O IMPACTON, no Brasil, e o J-PAS/JPLUS, na Espanha, estabelecido através de uma parceria Brasil/Espanha, estão entre os surveys que podem auxiliar na completude demandada pela IAU.

O primeiro tem como objetivo primário o seguimento de asteroides recém-descobertos para a obtenção de uma orbita mais precisa, de forma que o objeto não seja mais perdido. O segundo irá atingir uma profundidade de $V \sim 22$ e apesar de não ser o objetivo primário do survey, irá observar muitos asteroides, dentre estes, asteroides não catalogados.

Ambos surveys irão produzir um grande volume de dados. O objetivo do trabalho desenvolvido e descrito nesta dissertação é de incorporar nos pipelines de redução de dados dos mesmos uma rotina capaz de identificar asteroides conhecidos e criar relatórios com a astrometria destes corpos para o envio ao MPC e ainda de detectar objetos moveis e verificar a possibilidade do calculo de uma orbita que os caracterizam como novos asteroides.

Abstract

The determination of the International Astronomical Union mobilized the observational astronomic community in an effort to catalogue 90% of the Near Earth Asteroids with a diameter larger than 140m until 2020.

For this purpose some systematic search programs have been developed. The IMPACTON, in Brazil, and the J-PAS/JPLUS, in Spain, established in partnership between Brasil and Spain, are among the surveys that will assist in attaining the completeness demanded by IAU.

The primary objective of the first one is to make followup observations of the asteroids that have been recently discovered, so that the object is not lost. The second one will reach $V \sim 22$ and despite this not being the main purpose of the survey, it will observe many asteroids, among these, uncatalogued asteroids.

Both surveys will produce a big amount of data. The objective of the work described in this dissertation is to incorporate in the respective pipelines a routine capable of identifying known asteroids and report their astrometry to MPC and detect moving objects and check if an orbit can be fitted so it can be characterized as a newfound asteroid.

Lista de Figuras

1.1.	Representação das orbitas das classes de NEO comparada com a orbita da Terra	2
1.2.	O Modelo de distribuição orbital e de tamanhos de asteroides é representado pela linha tracejada, e os objetos conhecidos pela linha continua. [TG11]	3
2.1.	Fluxograma de dados do Pan-Starrs. OTIS é o nome dado ao programa controlador do <i>survey</i> . As informações do OTIS e da câmera CCD são passadas para o pipeline de redução (IPP) e então passado para o que foi chamado de Clientes Científicos. Estes são responsáveis pelas análises de Ciência, como o MOPS, que faz o reconhecimento de asteroides entre os dados. Os resultados das análises científicas são armazenadas no banco de dados científicos chamado PSPS. Estes então são disponibilizados para a comunidade científica.[RJC06]	15
2.2.	Representação da região do céu que será coberta pelo LSST. O numero de visitas está quantificado apenas para a banda 'r'. Para todos os filtros o numero de visitas chegará a marca de 1000 visitas por campo.[ZI08]	16
2.3.	Foto retirada do site do IMPACTON (www.impacton.on.br) mostrando o CCD acoplado ao telescópio.	18
3.1.	O fluxograma acima representa o funcionamento geral do Pipeline. A imagem obtida pelo CCD é submetida a uma rotina de redução, onde é feito a Astrometria e Fotometria de cada fonte. A astrometria de cada fonte em imagens próximas temporalmente é comparada e as fontes estáticas são então extraídas. Uma rotina paralela realiza o calculo das posições de todos os asteroides conhecidos. Estas posições são comparadas com a astrometria das fontes moveis. Então os objetos conhecidos são identificados e tem sua astrometria enviada ao MPC. As fontes moveis não conhecidas são enviadas ao MOPS. Onde são armazenadas e com observações futuras, se tenta traçar uma orbita e identificar um novo asteroide. Neste caso uma notificação também é enviada ao MPC.	19
3.2.	O fluxograma acima mostra o funcionamento geral da fase de pré-processamento da imagem. Inicialmente a leitura do header da imagem é feita e as informações são armazenadas no banco de dados. Se a imagem for de calibração elas são combinadas e armazenadas. No caso da imagem da calibração ser um "Flat Field" então estas são corrigidas de "Dark Frame" e "Bias Frame" antes de serem combinadas. No caso da imagem ser de ciência então ela é corrigida com as imagens de calibração combinadas e depois armazenadas.	20

3.3. A figura acima exemplifica o sistema de busca por objetos moveis. Os pontos pretos que possuem algum ponto cinza próximo são considerados estáticos. Os pontos que estão fora da área de intersecção são descartados, por exemplo P₇ faz um angulo >90° com a aresta V₁₄V₁₃, assim como P₉ com a aresta V₂₃V₂₄. Pontos como P₁,P₂,P₃,P₄ e P₅ são considerados móveis e passados adiante. Note que os pontos P₁ e P₂, assim como P₄ e P₅ estão próximos e podem pertencer a um mesmo objeto. Caso não sejam asteroides registrados poderão ser ligados pelo código MOPS(Capitulo 4). 22

3.4. Os elementos orbitais dos asteroides do Astorb são propagados por dois corpos até o instante da observação, produzindo efemérides com uma alta imprecisão. Os asteroides proximos do campo da imagem são filtrados e então passados para o integrador, produzindo efemérides mais precisas. 24

4.1. Ilustração geral das etapas do MOPS. Cada fase é responsável por filtrar os dados para a próxima. 30

4.2. Uma velocidade máxima para o movimento aparente de asteroide é utilizado como um filtro da região onde é possível a formação de tracklets.[JK07] 31

4.3. Em *i* estão as detecções de cada noite. Em *ii* é passado o algoritmo *findTracklets*. Em *iii*, os tracklets da noite 2 que potencialmente são do mesmo objeto são unificados pelo *collapseTracklets* e *purifyTracklets*. E em *iv* uma track é formada. [JM09] 31

4.4. A ilustração mostra a formação de tracks. A cada passo é feita uma busca partindo da arvore formada pela primeira imagem (Model Tree 1), buscando por regiões acessíveis na imagem posterior (Model Tree 2). A validação da track é feita quando se acha alguma tracklet suporte em uma imagem intermediaria (Suport Tree 1 e/ou 2). [JK07] 33

5.1. Numero de observações por asteroide reportados ao MPC 37

5.2. A figura (a) apresenta uma imagem típica obtida pelo IMPACTON. Após contrastada com outra imagem de um campo que a intersecta(b) é possível detectar os objetos que não estão em ambas imagens (moveis). Na figura (c) os pontos em lilas são os objetos moveis da imagem 1 e os pontos dourados são os objetos moveis da imagem 2. 39

Lista de Tabelas

2.1. Comparação entre os equipamentos utilizados pelos programas de busca de asteroides existentes até 2002.[HS02]	12
2.2. Comparação do número de descobertas feitas até fevereiro de 2002. [HS02]	13
3.1. Coeficientes Cash-Karp pra integrador Runge-Kutta	26

Sumário

1. Introdução	1
1.1. Histórico: De Ceres a Eros.	4
1.2. Propriedades físicas e dinâmicas dos NEOs	7
1.3. O papel do Minor Planet Center	8
1.4. Listas Críticas	9
2. Revisão: surveys de detecção de asteroides	11
2.1. Introdução aos métodos de busca	11
2.2. Os Programas de busca	12
2.3. Pan-STARRS	13
2.4. LSST	14
2.5. J-PAS	16
2.6. IMPACTON	17
3. Pipeline	19
3.1. Pré-Processamento	20
3.2. Astrometria	21
3.3. Detecção de objetos moveis	21
3.4. Calculo de Efemérides	23
4. MOPS	29
4.1. Introdução	29
4.2. Formação de Tracklets	30
4.3. Formação de Tracks	32
4.4. Determinação de orbita	34
5. Resultados	37
5.1. Astrometria	37
5.2. Detecção de Objetos Moveis	38
5.3. Calculo de Efemérides	40
5.4. MOPS	40
6. Conclusões	43
A. Relatando Observações ao MPC	45
B. Arvores KD	47

Referências Bibliográficas

49

1. Introdução

O número de crateras observadas no sistema Terra-Lua mostra que um alto número de impactos com corpos celestes ocorreu no passado. O efeito de um evento deste tipo na Terra pode ser devastador para a humanidade. Embora seja pouco provável que um fenômeno de proporções globais venha a acontecer nos próximos anos [Cha04], o fato é que apenas uma parcela de asteroides é conhecida, e dentre estes, grande parte possui uma órbita mal determinada. Para que uma análise do real risco de colisão com o Planeta seja feita, é necessária uma catalogação, e um melhor conhecimento da órbita, da maioria de asteroides próximos da Terra.

A estes corpos capazes de colidir, ou passar perto da Terra, é dado o nome de NEOs¹. Tipicamente NEOs são objetos com distância do periélio $q \leq 1.3 \text{UA}$ [DR94]. Os objetos que de fato passam próximo à Terra são chamados de PHOs² e estes são definidos como corpos que podem chegar a uma distância $d < 0.05 \text{UA}$. Os NEOs podem também ser divididos entre asteroides próximos da Terra, NEAs, e cometas próximos a Terra, NECs

Existem 4 grupos dinâmicos dentre os NEAs (Fig. 1.1) [AM02]. A primeira em ordem de distância ao Sol são os Atiras, que possuem órbita interior a da Terra ($Q < 0.983 \text{UA}$), também conhecidos como IEOs³. Posteriormente estão os asteroides Aten, cruzadores da órbita da Terra com semi-eixo maior $a < 1.0 \text{UA}$ e $Q > 0.983 \text{UA}$. Apollo, também são cruzadores da órbita da Terra com $a > 1.0 \text{AU}$ e $q < 1.017 \text{AU}$. Por último a classe Amor, com órbitas externas à Terra, com $1.017 \text{AU} < q < 1.3 \text{AU}$.

Até o final de 2012, o site JPL/HORIZONS listava 9.825 NEAs conhecidos, dentre estes apenas 1.544 numerados. Sendo então divididos de forma que: 37.84% são Amor; 54.18% são Apollo; 7.855 são Aten; e apenas 0.13% são Atiras. Esta última classe possui um número pequeno de objetos pois é de difícil observação devido a possuírem órbitas internas à Terra, não podendo ser observados a longas elongações solares.

Acredita-se que os NEOs não foram formados na região que se encontram, mas que, em sua maioria, são objetos oriundos do Cinturão Principal de asteroides [AM02].

¹do inglês, Near Earth Objects

²do inglês, Potentially Hazardous Objects

³do inglês, Inner Earth Object

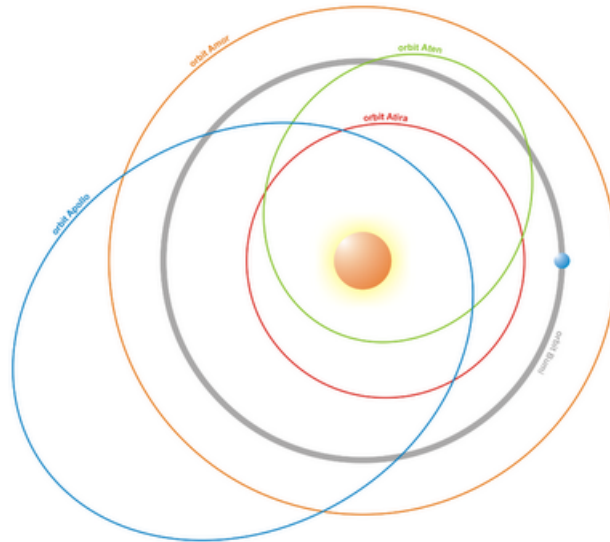


Figura 1.1.: Representação das orbitas das classes de NEO comparada com a orbita da Terra

Objetos provenientes de colisões ocorridas no Cinturão Principal podem ser injetados em regiões de ressonâncias (de movimentos médios ou secular) e ter sua excentricidade aumentada, assim se tornando cruzadores da orbita de Marte. A partir de encontros próximos com Marte, os objetos podem sofrer variações em semieixo maior, e assim serem inseridos na região de NEOs.

Em 2002, Bottke et. al [Bot02], apresentaram um modelo para a distribuição orbital de NEOs consistente com as observações da época, o que permite estimar o número de objetos com magnitudes maiores que os limites observacionais de então. A partir daí é possível inferir o número esperado de objetos em cada população. A distribuição orbital encontrada indica que 32% dos NEOs está na região dos Amor, 62% para Apollo, 6% para Aten e apenas 2% para Atiras.

O trabalho de Bottke pode ser considerado valido para objetos com $H < 22$. Uma continuação foi feita apenas extrapolando os resultados para o limite de $H < 25$ [TG11] (Fig. 1.2).

A Fig. 1.2 mostra que, pelo modelo, hoje já se acredita que a completude de objetos com $H < 18$ foi atingida [Bot02]. Entretanto ainda existe um bias observacional para objetos com $H > 22$. Isto torna evidente que podem existir asteroides em rota de colisão com a Terra que ainda não foram descobertos. O reconhecimento de um asteroide deste tipo deve ser feito o quanto antes, para assim aumentar as chances de sucesso para uma resposta a ameaça.

Desta forma, um esforço internacional tem sido feito no sentido de catalogar e refinar a orbita de 90% da população de NEOs com diâmetro maior do que 140m, de acordo

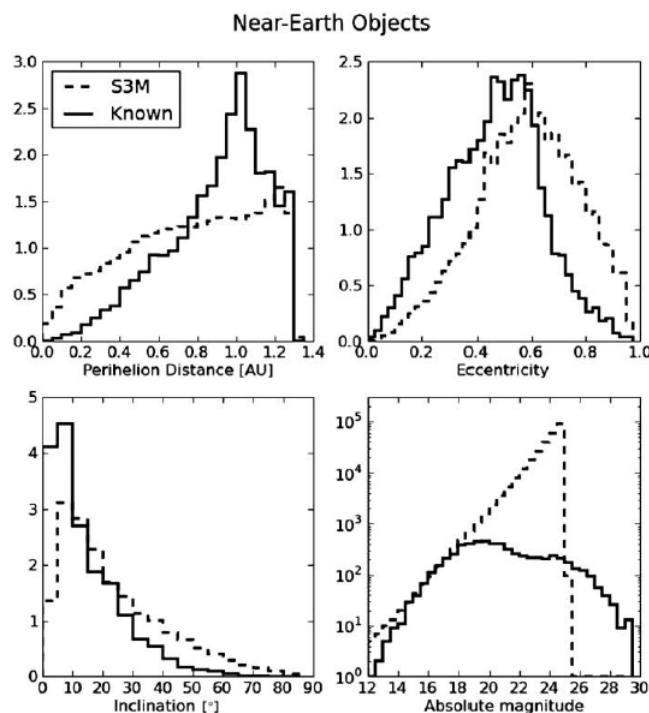


Figura 1.2.: O Modelo de distribuição orbital e de tamanhos de asteroides é representado pela linha tracejada, e os objetos conhecidos pela linha continua. [TG11]

com a determinação da União Astronômica Internacional (IAU). Este trabalho se enquadra neste esforço.

Com o advento do CCD e dos grandes *surveys* que virão para a próxima década será possível atingir a completude exigida pela IAU. Entretanto o volume de dados produzidos será imenso, e impossível de ser analisado manualmente. Se torna necessário ferramentas automáticas de redução e análise dos dados de telescópios para a obtenção de um mecanismo eficiente de busca por asteroides. No capítulo 2 será discutido os métodos, históricos e atuais, de detecção de asteroides e o papel dos grandes *surveys* nesse contexto.

Assim, neste trabalho, procuramos incorporar melhorias ao pipeline de redução de dados desenvolvido para o projeto IMPACTON, de forma a torná-lo capaz de detectar pequenos corpos previamente desconhecidos. A partir de dados de CCD, a rotina deve reconhecer os objetos móveis em imagens de uma mesma noite, através da astrometria e fotometria das fontes luminosas. Após classificado como móvel, é então realizada a tentativa de reconhecimento como um asteroide já catalogado pelo MPC (*Minor Planet Center*, órgão responsável por manter os dados orbitais de pequenos corpos). No caso de identificação, a astrometria é enviada ao MPC, por um relatório criado automaticamente. Esta etapa é descrita no capítulo 3. Caso o objeto móvel não seja um asteroide conhecido, ele é então passado para o código MOPS (*Moving Object Processing System*) [JK07], que armazenará em um banco

de dados a informação e tentará realizar o link com objetos moveis da mesma noite e de outras noites na tentativa de determinar uma orbita nominal que caracterize o objeto como um novo asteroide. Os aspectos gerais do código são expostos no capítulo 4. O código foi originalmente escrito pela equipe do *survey* Pan-STARRS(sessão 2.2), e posteriormente disponibilizado a nós pela equipe do LSST(sessão 2.4).

Os resultados obtidos e outras considerações são apresentados no Capítulo 5. Nos próximos tópicos do presente capítulo ainda é apresentado como a busca por asteroides teve inicio, assim como as propriedades dinâmicas e físicas deste objetos e ainda os principais órgãos envolvidos em manter um catalogo com os dados orbitais e de efemérides de corpos menores do Sistema Solar.

1.1. Histórico: De Ceres a Eros.

A origem da busca por asteroides se deve ao surgimento do modelo planetário de Kepler, responsável por colocar em ordem a escala de distancia entre os planetas. Nesta época ficou evidenciado que havia um salto em distancia nas orbitas de Marte e Júpiter. Kepler, em 1596, propôs que havia um pequeno planeta entre os dois, que seria invisível por suas dimensões [PA93].

No seculo XVI vários pensadores tentaram dar uma explicação para o “vazio” entre Marte e Júpiter. Entre eles Newton, Kant, Lambert chegaram a sugerir que a explicação estava na dinâmica de Júpiter, que não permitiria que um planeta fosse formado na região. Thomas Wright ainda propôs que poderia ter existido algum planeta nesta região que foi destruído por um evento colisional com um cometa [PA93].

Em 1766, Titius von Wittenburg formulou a lei das distancias planetárias, popularmente conhecida como lei de Titius-Bode. Johann Elert Bode foi um grande popularizador da lei, por isso a lei recebe seu nome também. Nela estava salientado que deveria haver algum planeta na região entre Marte e Júpiter. Existem varias formulações para a lei, uma delas:

$$r = 0.4 + 0.3 * 2^n$$

Onde “r” seria o raio da orbita circular do Planeta, e “n” o numero do corpo, começando por Mercúrio, com n=0.

A hipótese de que havia outros planetas ainda a serem descobertos no Sistema Solar estava, entretanto, concentrada para planetas de orbita além da de Saturno [PA93]. Contudo, com a descoberta de Urano, por Herschel em 1781, na região prevista pela Lei de Titius-Bode, a crença na veracidade da lei aumentou. Assim, a ideia de que realmente poderia existir um planeta na região interna de Júpiter também ganhou força. Paralelamente, em 1794 Chladni inferiu a origem extraterrestre de meteoritos.

Barão Francis Xaver von Zach, convencido da existência de tal astro, organizou uma cooperativa durante uma conferencia astronômica, em 1796, na cidade de Gotha, para realizar uma busca sistemática do Planeta. Nesta cooperativa vários astrônomos de regiões distintas da Europa ficaram responsáveis para observar uma partes do Céu. A iniciativa, todavia, não produziu resultados.

O responsável pela descoberta do objeto foi o italiano Giuseppe Piazzi, que não participava da cooperativa proposta por Zach. Piazzi possuía, no observatório de Palermo, um dos telescópios mais modernos da época [Pea01]. O equipamento era considerado uma obra-prima da tecnologia do seculo XVII e era capaz de realizar repedidas medições nas posições das estrelas para obter uma acurácia de alguns segundos de arco nas coordenadas finais das estrelas. O objetivo do trabalho de Piazzi era produzir o catalogo de estrelas com a maior precisão para a época.

No Começo de 1801, Piazzi escreveu [PA93]:

"...on the evening of the 1st of January of the current year, together with several other stars, I sought for the 87th of the Catalogue of the Zodiacal stars of Mr la Caille. I then found it was preceded by another, which, according to my custom, I observed likewise, as it did not impede the principal observation. The light was a little faint, and of the colour of Jupiter, but similar to many others which generally are reckoned of the eighth magnitude. Therefore I had no doubt of its being any other than a fixed star. In the evening of the 2d I repeated my observations, and having found that it did not correspond either in time or in distance from the zenith with the former observation, I began to entertain some doubts of its accuracy. I conceived afterwards a great suspicion that it might be a new star. The evening of the third, my suspicion was converted into certainty, being assured it was not a fixed star. Nevertheless before I made it known, I waited 'till the evening of the 4th, when I had the satisfaction to see it had moved at the same rate as on the preceding days. From the fourth to the tenth the sky was cloudy. In the evening of the 10th it appeared to me in the Telescope, accompanied by four others, nearly of the same magnitude. In the uncertainty which was the new one, I observed them all, as exactly as possible, and having compared these observations with the others which I made in the evening of the 11th, by its motion I easily distinguished my star from the others. Mean while however I greatly wished to see it out of the meridian, to examine and to contemplate it more at leisure. But with all my labour, and that of my assistant D. Niccola Cacciatore and [of] D. Niccola Carioti belonging to this Royal Chapel both enjoying a sharp sight, and very expert in the knowledge of the heavens, neither with the night Telescope, nor with another achromatic one of 4 inches aperture, was it possible to distinguish it from many others among which it was moving. I was therefore obliged to content myself with seeing it on the meridian, and for the short time of two minutes, that is to say the time it employed in traversing the field of

the Telescope; other observations, which were making at the same time, not permitting the instrument to be moved from its position."

Em 24 de Janeiro do mesmo ano, Piazzi anunciou o seu descobrimento para a sociedade astronômica. Nas cartas de comunicação ele classificava o objeto como um cometa, mas salientava o fato de não ter observado nebulosidade e de que o objeto se movia de maneira lenta e uniforme. Ao traçar uma órbita circular ao astro, Piazzi obteve duas soluções para o raio, ambas próximas a 2.7u.a., o que era condizente com a lei de Titius-Bode. A sociedade astronômica da época passou a acreditar que se tratava do planeta perdido. Após um período de 41 dias de observações a sua visualização havia sido impossibilitada, pela passagem por traz do Sol. O desenvolvimento de um método matemático que solucionasse o problema de determinação da órbita para que pudessem ser realizadas previsões capazes de recuperar o astro se tornou urgente. Gauss solucionou o problema no mesmo ano e em dezembro de 1801 o objeto foi recuperado. A ele foi dado o nome de Ceres Ferdinandea, batizado pelo próprio Piazzi. Contudo, o sobrenome foi retirado posteriormente, deixando apenas o nome Ceres

Ceres possuía uma magnitude muito alta, se comparado com os vizinhos Marte e Júpiter, logo suas dimensões deveriam ser realmente muito pequenas. Em março de 1802 outros planetas menores foram encontrados. Ceres manteve o status de Planeta por meio século, depois foi rebaixado para Planeta Menor. O nome asteroide, ainda muito utilizado, veio de Herschel:

"From this, their asteroidal appearance, if I may use that expression, therefore, I shall take my name, and call them Asteroids; reserving for myself, however, the liberty of changing that name, if another, more expressive of their nature should occur."

O maior diâmetro angular observado de um asteroide é 0.7 arcsec, logo, diferente dos planetas, é difícil um instrumento terrestre resolver um disco, e a aparência destes objetos é então parecida com a de uma estrela, origem do termo.

A partir de 1845 a taxa de descobrimento de asteroides atingiu ~4 objetos/ano [Geh79a], e em 1891 aumentou para ~20 objetos/ano, devido as novas técnicas fotográficas aplicadas à Astronomia [Geh79b]. Com a criação de catálogos de posições das estrelas melhores e com telescópios cada vez mais modernos, esta taxa só foi aumentando.

Enfim, na noite do dia 13 de agosto 1898, o primeiro NEA foi descoberto paralelamente por Gustav Witt em Berlin e Auguste Charlois em Nice. O nome Eros foi dado a este asteroide. Algumas décadas depois, em 1932, o NEA Apollo foi observado, o primeiro a cruzar a órbita da Terra.

Em 1940 já existiam 3 asteroides conhecidos cruzadores da órbita da Terra. Entretanto ainda não havia algum alarde sobre a possibilidade de uma colisão com a Terra. Com as missões espaciais Apollo, que levaram o homem a Lua nas décadas de 60 e 70, ficou evidente que as crateras observadas no satélite eram provenientes

de impactos com asteroides, e não de vulcanismos, uma das hipóteses na época. Alvarez e colaboradores, em 1980 propuseram que a Extinção K-T teria sido causada pela colisão com um asteroide [AM80]. Estes fatores somado a diversos outros foram suficientes para convencer os cientistas da época de que a Terra realmente já havia sido fortemente bombardeada por estes objetos [Cha04].

O marco para o alerta do perigo de colisão com NEOs, entretanto, foi a observação de objetos a distancias similares à da Lua, em 1980. É valido lembrar que atualmente todos os asteroides conhecidos apresentam um risco zero de colisão com a Terra, apenas os que ainda não foram descobertos podem oferecer algum perigo.

1.2. Propriedades físicas e dinâmicas dos NEOs

Os NEOs são objetos dinamicamente instáveis. Devido à região em que se encontram, as perturbações planetárias dos planetas internos são mais fortes. A vida dinâmica destes objetos é da ordem de 10^7 anos [PF94], isto é, muito menor do que a idade do Sistema Solar. Todavia, os registros de crateras na Lua indicam que a população se manteve aproximadamente estática após o bombardeamento tardio (Late Heavy Bombardment). Desta forma, deve existir um mecanismo que reabastece os asteroides nesta região.

No intuito de entender a origem destes objetos Bottke et al.[Bot02] realizou uma simulação, citada no inicio do Capitulo, onde ele identificou como populações possivelmente originadoras de NEOs: o cinturão principal, os asteroides Hungarias, os Troianos, a região transnetuniana e a nuvem de Oort. E em seguida as regiões intermediarias, onde ressonâncias e/ou encontros planetárias podem ser fortes o suficiente para empurrar objetos para a região de NEOs. Entre estas listamos as consideradas principais pelo trabalho:

- A ressonância 3:1 com Júpiter, que intersecta o cinturão principal ~ 2.5 u.a. Há tempos já é conhecida como um manancial de NEAs e meteoritos.
- A ressonância secular ν_6 , definida na borda do cinturão interno de asteroides. A simulação apresentou que 70% dos NEAs produzidos por esta ressonância evoluem para órbitas com $a < 2$ u.a. Então, sendo este processo considerado o principal formador de NEAs na região interna do Sistema Solar.
- A região interna dos cruzadores de Marte(IMC), onde várias ressonâncias mais fracas existem. Na simulação, 53% dos NEAs originados do IMC evoluem para orbitas com $a < 2$ u.a.
- O cinturão principal externo é responsável por gerar uma parcela de NEAs. Objetos são jogados para essa região através da ação de varias ressonâncias fracas, como as 5:2, 7:3, 9:4 e 2:1 ressonâncias em movimento médio com Júpiter.

- Núcleos de cometas extintos da região do cometas da família de Júpiter podem evoluir para regiões próximas da Terra. Objetos que evoluem desta região são classificados como NECs (do inglês, cometas próximos da Terra).

O estudo concluiu que ~61% da população de NEOs tem origem no cinturão principal interno, ~24% no cinturão principal central, e 8% no cinturão principal externo e ainda ~6% se originam de cometas da família de Júpiter.

Um asteroide é um corpo sem fontes de energia e conseqüentemente não emite luz própria. A luz que observamos é de fato o reflexo da luz solar, cujo espectro de emissão é bem conhecido. A mineralogia de um asteroide é então obtida a partir da observação das bandas de absorção na região do espectro visível e infravermelho próximo.

Taxonomias de asteroides tem sido feitas a partir de medidas da reflectância (no visível ou no visível + infravermelho próximo), sendo que alguns sistemas taxonômicos também se baseiam em albedos geométricos. As classes geradas tem uma correspondência com a composição do corpo, e associações com classes de meteoritos. No entanto, essas correspondências não são unívocas, em geral.

A maioria de NEAs está dividida entre os tipos de baixo albedo, inferindo uma semelhança com meteoritos condritos carbonáceos, e nos tipos de albedo médio, inferindo uma semelhança com meteoritos condritos ordinários. Existem outras classes que formam classes taxonômicas como meteoritos de Ferro-Níquel e acondritos basálticos, entretanto estas são mais incomuns entre os NEAs [Cha04].

1.3. O papel do Minor Planet Center

O numero de asteroides conhecidos teve um grande aumento no inicio do seculo passado, e até hoje a taxa de descobrimento é crescente. Apesar disto, o trabalho de acompanhamento, calculo de orbitas e efemérides precisas, para que um asteroide não seja mais perdido, é um trabalho árduo, que a maioria dos observatórios não estava disposto a fazer. Em 1931, 398 asteroides foram descobertos, e apenas 159 destes não foram perdidos novamente[Geh79a].

O Instituto de Calculo Astronomico em Berlim (Herschen Institut) era o maior centro de estudos de asteroides da época e um dos principais mantedores de dados orbitais de pequenos corpos do Sistema Solar [Mar79]. Contudo, o final da II Guerra Mundial a equipe foi dividida pela parte Ocidental e Oriental. Em 1947, a União Astronômica Internacional (IAU) agiu e escolheu Paul Herget para dirigir o Minor Planet Center(MPC), no próprio Observatório de Cincinnati, onde Herget era um dos diretores. Este órgão da IAU até hoje é o responsável por manter os dados orbitais e de efemérides de asteroides e cometas.

Em 1952 foi acordado de que um catalogo anual com os elementos orbitais e efemérides de todos os asteroides seria publicado pelo instituto de Astronomia de Leninegrado

em cooperação com o Minor Planet Center. O circular nomeado de EMP (do russo Efemeridy Malykh Planet) continha efemérides com 1 minuto de arco em precisão para oito datas próximas da oposição para cada asteroide numerado. Ainda existia um outro circular, o Minor Planet Circulars que continha notificações quanto a objetos recém-descobertos e suas efemérides e elementos orbitais, isto era feito até que o asteroide fosse numerado e incorporado ao EMP. Este podia ser considerado o início da Lista Crítica, discutida na sessão 1.4.

Além das circulares, o MPC é o responsável por coletar e armazenar todas as observações de planetas menores feitas por qualquer observatório no mundo[Mar79]. E ainda de computar as orbitas e efemérides com estes dados. A principal tarefa do MPC é aumentar e manter o número de dados orbitais confiáveis.

Herget foi diretor do MPC até seu afastamento em 1978, quando o órgão foi transferido para o Smithsonian Astrophysical Observatory, em Cambridge, Massachusetts. Nesta época esforços teóricos e observacionais foram feitos e muitos asteroides foram recuperados. Aproximadamente 100 asteroides eram numerados por ano[Mar79]. Com isto, o interesse na área ressurgiu.

Hoje, com a era da informatização e da internet, os serviços do MPC passaram a ser online. Além do serviço de efemérides, no qual a precisão em posição chega a ser menor do que segundos de arcos, para boa parte dos objetos catalogados. O MPC ainda mantém a lista crítica (sessão 1.4) entre outros serviços citados em seu sítio na internet.

A lista atual de objetos é de ~550.000, sendo ~250.000 com orbitas precisas o suficiente para serem numerados. Este número tende a ter um aumento exponencial nas próximas décadas, devido, principalmente, aos grandes Surveys sendo construídos (Capítulo 2) e aos esforços computacionais para construir um algoritmo de busca automática eficiente (capítulo 3 e 4).

1.4. Listas Críticas

Atualmente existem duas organizações que mantêm os dados orbitais e de efemérides de asteroides, o já discutido MPC, e o Observatório Lowell. Ambos são responsáveis por criar uma lista com os asteroides que devem ser priorizados na observação para que o cálculo de sua órbita seja refinado e orbitas precisas o suficiente sejam encontradas a fim de que o mesmo possa ser numerado. Um asteroide só é numerado quando possui uma órbita suficiente precisa para que ele não seja mais perdido. Estas listas são conhecidas como Listas Críticas. Há divergências em nas formulações feitas por cada instituto.

A primeira, do MPC, é atualizada mensalmente e os objetos contidos nela são basicamente asteroides que possuem um pequeno número de observações no cálculo de sua órbita, ou que não foram observados nos últimos dez anos. O critério de

numeração do MPC pode variar mas geralmente um asteroide é numerado quando possui quatro ou mais observações na oposição. Para NEAs isso pode variar e duas ou três observações na oposição podem ser suficientes.

Já o Lowell mantêm duas listas, uma para objetos em geral que precisam de observações independente da posição do céu, e outra para objetos próximos a oposição na luação corrente. Em contra partida a lista do MPC, a lista do Lowell é atualizada quase diariamente e é baseada em incertezas nas efemérides.

Para o Observatório Lowell a incerteza nas efemérides de um asteroide numerado não pode exceder dois arcos de segundo para os próximos 10 anos e não pode degradar significativamente quando se omite um observação temporalmente isolada no calculo da orbita. Os parâmetros para a construção da lista do Lowell são o $|CEU|$ (do inglês, incerteza corrente na efeméride) e o OQP (do inglês, parâmetro de qualidade de orbita), descrito como $\log \lambda$ onde λ é uma das métricas descrita por Muinonen, et al[Mui93]. O critério de numerabilidade deve satisfazer $OQP > 5.47$. Para $OQP < 5.25$, o asteroide certamente não é numerado. Existem as sub-classes de cada lista do Lowell, por ordem de prioridade:

- Asteroides perdidos.
- Asteroides numerados com $|CEU| > 2.0$ arcsec na luação corrente.
- Asteroides numerados com $OQP < 5.25$.
- Asteroides numerados com $5.25 < OQP < 5.47$.
- Asteroides numerados em que a ultima observação incluída na computação da orbita foi feita a mais de 10 anos.
- Asteroides não numerados, que podem ser numerados com uma ou duas observações adicionais.

É valido lembrar que apesar das restrições impostas pelo observatório Lowell, o órgão responsável por numerar asteroides é o MPC.

2. Revisão: surveys de detecção de asteroides

2.1. Introdução aos métodos de busca

Apesar do descobrimento do primeiro asteroide ter sido em 1801, a técnica de descobrimento de asteroides, baseada na diferenciação de seu movimento com as estrelas de fundo, ainda é essencialmente a mesma. Entretanto, novas tecnologias tem sido aplicadas para aumentar a eficiência da mesma.

As primeiras centenas de objetos foram descobertos através de observações diretas ao telescópio, assim como a descoberta de Ceres, por Piazzi. A partir da década de 1890 a fotografia, utilizando placas fotográficas, foi introduzida na Astronomia. Esta trouxe uma série de vantagens. Primeiramente, um registro permanente das observações é gerado, ao contrario da técnica anterior. A fotografia ainda evita a fadiga do Observador, e com ela, áreas maiores do céu podem ser cobertas. Em 1891, Max Wolf descobriu (323) Brucia, primeiro asteroide descoberto desta maneira [HS02].

Com a fotografia, dois métodos de busca por asteroides podiam ser usadas, ambas ainda baseadas na distinção do movimento próprio do asteroide. Na primeira poderia ser feita uma foto com longa exposição, e a análise posterior buscaria por traços formados por objetos se movendo com velocidade não sideral durante a exposição (Fig 2.1a). A segunda opção é obter varias imagens sequencialmente, com um tempo exposição menor, e verificar se alguma fonte luminosa se moveu, comparando as fotografias (Fig 2.1b).

Na década de 1980 o CCD¹ foi introduzido a Astronomia. A grande vantagem destes detectores está na digitalização da imagem que permite a analise da mesma pelo computador. Com o surgimento de computadores cada vez mais rápidos e mais acessíveis, as campanhas sistemáticas de observações (*surveys*) foram automatizadas. Estas, responsáveis pelo descobrimento da maior parte dos asteroides hoje conhecidos já independem de participação humana na identificação de um asteroide.

¹do inglês, Charged Coupled Device. Os detectores CCD foram criados Willard Boyle e George E. Smith, em 1969. O funcionamento do dispositivo é baseado no efeito fotoelétrico, responsável por transformar infrações luminosas em corrente elétrica

2.2. Os Programas de busca

O *Spacewatch Survey* foi o primeiro programa de busca a utilizar os CCDs [Geh79b]. Proposto em 1980 pelo Laboratório Planetário e Lunar da Universidade do Arizona, o programa, de início, tinha acesso a um telescópio com abertura de 0,9 metros, localizado no pico Kitt, também em Arizona. Posteriormente o *survey* recebeu um segundo telescópio, de 1,8m de abertura; este recebeu primeira luz em 2000.

O tempo de leitura do CCD utilizado era muito lento, e a capacidade computacional da época limitada. Para solucionar o problema, o programa usava um *drift-scanning*, no qual o telescópio se mantinha estático, enquanto a leitura do CCD era feita de acordo com a velocidade de rotação sideral. Deste modo, usando integrações de 143s, em 30 min era possível cobrir uma área do céu de 0.5° em declinação e 7° em ascensão reta em 30min. Objetos de magnitude de $V \sim 21.7$ eram observados, duas ordens de grandeza maior do que a obtida com os filmes fotográficos.

As observações de asteroides e cometas tiveram início em 1984. Em 1985 foi feita a primeira descoberta de um asteroide por um sistema de detecção automática [RM86]. *Spacewatch* é o *survey* existente com maior tempo de funcionamento e é um grande contribuidor para o conhecimento hoje obtido sobre objetos da região de NEOs.

Muitos outros *surveys* seguiram e aprimoraram as técnicas de busca. Na tabela 2.1 é mostrada a estrutura física dos surveys mais importantes, e na tabela 2 o total de descobertas feitas por cada um até o ano de 2002.

Program	Spacewatch	Spacewatch	NEAT	NEAT	LONEOS	LINEAR*	CSS	Bisei
Aperture (m)	0.9	1.8	1.2	1.2	0.6	1	0.4	0.5
f Number	5.3	2.7	1.9	2.5	1.9	2.2	3.0	1.9
Telescope Type	Newt.	folded	prime	Schmidt	Schmidt	folded	Schmidt	Cass.
Array Dimensions	2048 × 2048	2048 × 2048	4080 × 4080	4080 × 4080 × 3	2048 × 4096 × 2	1960 × 2560	4080 × 4080	2048 × 4096 × 2
Pixel Size (mm)	0.024	0.024	0.015	0.015	0.0135	0.024	0.015	0.015
Pixel Size (arcsec)	1	1	1.4	1	2.5	2.25	2.5	3.2
FOV (deg ²)	0.3	0.3	2.5	3.8	8.3	2	8.1	3.1
Cooling (°C)	-90	-90	-20	-40	-130	-50	-30	-100
Readout Mode	drift scan	ds/stare	stare	stare	stare	stare	stare	stare
CCD Type	thin	thin	thick	thick	thin	thin	thick	thin
Exposure (sec)	150	150	20	60	45	5	60	23
Magnitude Limit	21.7V	22.6V	19.5V	21V	19.3V	19.2V	19.3R	19
Coverage (deg ² /h)	7.4	7.4	174	174	400	1050	194	—
Number of Visits	3	3	3	3	4	5	4	—
Effective Coverage	2.5	2.5	58	58	100	210	48	—

*Two identical telescopes.

Table 2.1.: Comparação entre os equipamentos utilizados pelos programas de busca de asteroides existentes até 2002.[HS02]

	Spacewatch	NEAT	LONEOS	LINEAR	CSS	Bisei
Total Discoveries	48,054	12,803	12,713	157,346	4309	141
NEA Discoveries	254	158	106	925	46	1
Months of Operation	135	70	45	75	15	—
Discovery Rate	356	183	282	2098	287	—
NEA Discovery Rate	1.88	2.26	2.36	12.33	3.07	—

Table 2.2.: Comparação do número de descobertas feitas até fevereiro de 2002. [HS02]

Um dos primeiros a seguir o Spacewatch foi o NEAT (Near-Earth Asteroid Tracking) mantido pelo JPL (Jet Propulsion Lab - NASA), com início em 1995. Existem dois observatórios operados pelo NEAT, o U.S. Air Force Maui Optical Station no Hawai'i (NEAT/ MSSL), outro no Palomar Observatory na California (NEAT/Palomar).

NEAT também foi um dos pioneiros nos sistemas de busca com CCD_[HS02]. A maior parte de suas imagens foram arquivadas no Skymorph, integrado ao JPL Horizons, para que no futuro pudessem ser identificadas imagens potencialmente úteis na realização do problema de precovery (seção 4.4).

O Lowell Near-Earth Object Survey (LONEOS), coordenado pelo Observatório Lowell, foi um dos primeiros a utilizar um sistema que fosse completamente automático. O algoritmo, por eles desenvolvido, era capaz de fazer a detecção automática de objetos móveis com 4 visitas no mesmo campo. As operações do LONEOS iniciaram em 1993, e duraram até 2008_[HS02].

Já o algoritmo de detecção do Lincoln Near-Earth Asteroid Research (LINEAR), mantido pelo MIT Lincoln Laboratory, utiliza 5 visitas separadas temporalmente por ~30min e é capaz de fazer a detecção com apenas três aparições do objeto. Este método se mostrou mais eficiente, capaz de realizar detecções até em campos próximos do plano galáctico, onde a densidade de estrelas é alta. Através da velocidade do objeto móvel era feita a identificação de um possível NEA, que posteriormente deveria ser verificado manualmente. O LINEAR, que iniciou em 1998, é um dos maiores descobridores de asteroides até a presente data.

Existem outros surveys menores que contribuíram largamente para a descoberta e catalogação de asteroides. Entretanto, nos próximos tópicos discutiremos os que de certa forma tem uma contribuição mais próxima a este trabalho.

2.3. Pan-STARRS

O *Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System* (Pan-STARRS), em desenvolvimento pelo Instituto de Astronomia da Universidade do Hawaii, será composto por quatro telescópios de 1,8m de abertura, com o intento de realizar uma cobertura rápida e profunda do céu [RJC06].

Cada telescópio possui uma câmera com resolução de um gigapixel e um campo visual de 3 graus quadrados, resultando em uma escala de placa de 0.3" por pixels.

A câmera utiliza uma nova tecnologia de leitura rápida em CCD desenvolvida por Tonry et. al[JT02], conhecida como transferência ortogonal de matriz. Esta tecnologia permite que cargas movimentem-se em ambas direções espaciais em tempo real. Além de uma leitura mais rápida, desta forma podem ser compensados efeitos de atmosfera e incertezas no acompanhamento telescópico. Em geral, a tecnologia de matriz ortogonal de transferência fornece uma correção fina na eletrônica, permitindo, teoricamente, um *seeing* de sub-segundos de arco. Diferente dos métodos anteriores, que utilizam a manipulação do espelho secundário.

Um dos objetivos primários do *survey* é identificar aproximadamente 90% dos NEOs maiores que 300m de diâmetro e 80% de todas outras populações de pequenos objetos do Sistema Solar de maneira completamente automatizada.

Aproximadamente 60% do tempo do *survey* será dedicado para cobrir o céu com filtros *griz* (Sloan) e um filtro *y*, próximo ao infra-vermelho. O *survey* irá cobrir 10.000 graus² por semana. A cadência das observações foi projetada para otimizar a descoberta de pequenos corpos do Sistema Solar.

Cada imagem obtida pelo CCD requer ~2 Gbytes para o armazenamento. O tempo de exposição será de aproximadamente 30 segundos, assim, o survey deverá acumular cerca de 1 Tbyte de dados por noite. Com este dado tempo de exposição é possível se obter uma profundidade de $R \sim 23.5$. Desta forma, espera-se obter uma densidade de asteroides de cerca de 250/deg² na eclíptica.

Se torna evidente a necessidade de um pipeline que utilize técnicas modernas de computação no sentido de criar um algoritmo eficiente que seja capaz de tratar as imagens e realizar a detecção de asteroides, tarefa que a este ponto se torna impossível de ser feita manualmente. Um esquema do fluxo de dados do Pan-STARRS é apresentado na Fig 2.2. Neste diagrama O IPP (*Image Processing Pipeline*) é responsável por realizar as reduções usuais, como BIAS, FLAT, etc. E ainda de separar as fontes estáticas e móveis. As ultimas são passadas para o algoritmo MOPS, onde é então feita a análise para discernir se de fato tais fontes são um asteroide. O MOPS será detalhado posteriormente, no capítulo 4.

2.4. LSST

O *Large synoptic Survey Telescope* (LSST) será instalado no Cerro Pachón no Norte do Chile a 2.682 metros de altitude. Será um dos maiores das próximas gerações de *surveys*, com um espelho primário com abertura de 8.4m (6.7m efetivo), um CCD de 3.2 Gigapixel e um campo visual de 9.6 deg²[ZI08].

Um ponto forte do LSST é a maneira como seu design foi feito para atender os quatro principais objetivos científicos propostos. Cada ciência impõe restrições nos

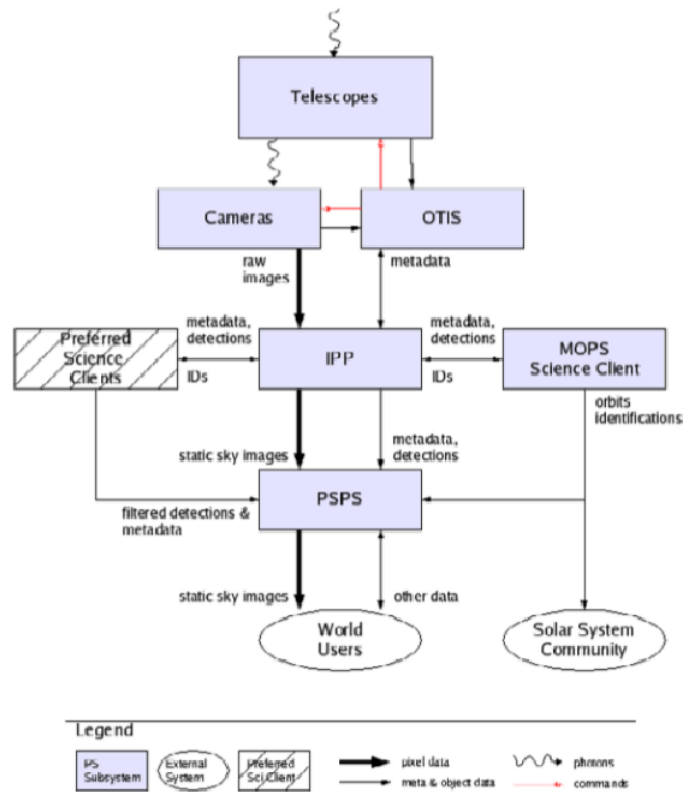


Figure 2.1.: Fluxograma de dados do Pan-Starrs. OTIS é o nome dado ao programa controlador do *survey*. As informações do OTIS e da câmera CCD são passadas para o pipeline de redução (IPP) e então passado para o que foi chamado de Clientes Científicos. Estes são responsáveis pelas análises de Ciência, como o MOPS, que faz o reconhecimento de asteroides entre os dados. Os resultados das análises científicas são armazenadas no banco de dados científicos chamado PPS. Estes então são disponibilizados para a comunidade científica. [RJC06]

parâmetros observacionais. Um exemplo é para atingir a completude de NEOs requerida pela IAU é necessário que se atinja um $V \sim 24$ com exposições curtas, não maior do que 30s, minimizando os efeitos de rastro. Os quatro principais casos científicos escolhidos são:

- Cosmologia - Estudar Distribuição espacial de galaxias através da medição de redshifts fotométricos de alta precisão. Medir efeitos de Lentes Gravitacionais. Descobrir Supernovas e Quasares.
- Sistema Solar - Fazer um inventário do Sistema Solar. Attingir a completude exigida pela IAU.
- Eventos transientes no céu - Observar fenômenos transientes, como explosões cósmicas, e estrelas variáveis.
- Mapear a Via-Lactea - Estudar a dinâmica, metalicidade, numero, de estrelas no limite do halo.

A análise das restrições impostas por cada caso científico foi feita de modo a otimizar

a estratégia do *survey*. Desta forma, foi definido que o tempo de exposição para cada imagem será de 30s. Cada campo será visitado 2 vezes na mesma noite. O Intervalo de tempo entre estas visitas deve estar entre 15-60min. A mesma região do céu deve ser revisitada, posteriormente, num intervalo curto de tempo (2 ou 3 vezes por luação). No período total do survey, 10 anos, cada campo terá sido revisitado ~1000 vezes (Fig.2.3, mostra o numero de visitas para o filtro 'r'). Desta forma, será possível alcançar $r \sim 24.5$ com uma exposição. A magnitude somada deve alcançar $r \sim 27.5$.

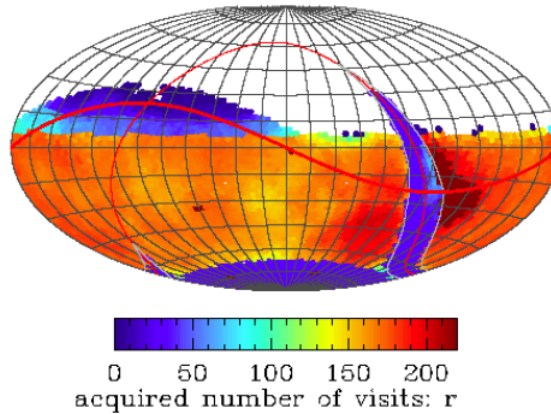


Figure 2.2.: Representação da região do céu que será coberta pelo LSST. O numero de visitas está quantificado apenas para a banda 'r'. Para todos os filtros o numero de visitas chegará a marca de 1000 visitas por campo.[ZI08]

Serão utilizados filtros do sistema Sloan(*ugrizy*), com a extensão do filtro *y*.

O volume de dados atingirá a marca de 100PB de dados de imagem em 10 anos de *survey*. Um dos maiores desafios do LSST é criar um sistema eficiente para gerenciar este volume de dados. No caso de objetos moveis será utilizado o código MOPS, desenvolvido pelo Pan-STARRS, com algumas pequenas alterações, discutidas no capítulo 4.

Aproximadamente 90% do tempo do telescópio será dedicado à estratégia principal do *survey*. O tempo restante será dedicado para surveys menores, a fim de dar suporte para que cada objetivo primário seja alcançado.

2.5. J-PAS

O projeto *Javalambre Physics of the Accelerating Universe Survey Astrophysical Survey* (J-PAS) é um empreendimento conjunto Brasil-Espanha, cujo objetivo é

realizar um *survey* para cobrir um região de 8000deg^2 do céu em 56 filtros de banda estreita, cobrindo o intervalo de 0.32 a 1 micrón.

O survey contará com um telescópio principal de 2.5 m de abertura em uma montagem azimutal, ligado a uma câmara com 14 CCDs, que juntos fornecem um campo visual de 3 deg^2 .

Existe ainda um telescópio de calibração, com 0,8m de abertura. Este, além da calibração, também realizará um *survey*, menor, com 12 filtros e um campo visual de aproximadamente $1,7\text{ deg}^2$. A este *survey* foi dado o nome de J-Plus.

O objetivo primário do projeto é a determinação de *redshifts* fotométricos precisos para fontes de magnitude $V < 23$. Entretanto, durante a execução do *survey* um número considerável de asteroides será observado. Muitos, possivelmente não catalogados. Isto torna necessário que processos de detecção de objetos moveis e calculo de orbitas sejam incorporados as rotinas de redução e dados do *survey*.

Além da capacidade de descobrir asteroides, o projeto ainda contribuirá para classificação taxonômica de asteroides. Certas classes não podem ser caracterizadas de forma confiável a partir dos dados de outros grandes surveys fotométricos. O grande numero de filtros no qual cada objeto será observado irá gerar uma especie de espectro de baixa resolução, entretanto, suficiente para este tipo de caracterização.

O J-Plus tem o inicio de operações previsto para 2013. Enquanto o J-PAS deve iniciar apenas em 2014. Um telescópio adicional ao survey será instalado no hemisferio sul, ainda sem data definida para inicio de operações.

2.6. IMPACTON

O grupo de Ciências Planetárias do Observatório Nacional (ON) é reconhecido internacionalmente pelo trabalho desenvolvido na pesquisa de caracterização física de pequenos corpos do Sistema Solar. O IMPACTON (Iniciativa de Mapeamento e Pesquisa de Asteroides nas Cercanias da Terra no Observatório Nacional) é um projeto estruturante do ON que prevê a instalação de um observatório astronômico dedicado ao acompanhamento e caracterização desses objetos. Desta forma, inserindo o ON e o Brasil nos esforços feitos a fim de atingir a determinação da IAU, de catalogar 90% dos asteroides próximos a Terra com o diâmetro superior a 300m.

O município de Itacuruba, localizado no sertão de Pernambuco, foi escolhido para a construção Observatório Astronômico, nomeado OASI (Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica), por atender as necessidades climáticas e de infra-estrutura para o bom funcionamento de um sitio astronômico.

No sitio está instalado um telescópio de 1 m de abertura com montagem alto-azimutal (Fig 2.4) acoplado a um CCD APOGEE com um *array* de 1024×1024 pixels, produzindo um campo visual de 5.9×5.9 arcos de minuto e uma escala no plano focal de $0.343''/\text{pixel}$.

O intuito do projeto é de que as operações sejam feitas de maneira remota, comandadas da sede do ON, no Rio de Janeiro. Para isto também foi instalada uma Estação meteorologia que monitora e transmite as condições climáticas do local. Em breve será instalada uma câmera de todo-céu, afim de auxiliar a visualização de nuvens na hora da observação. As operações iniciaram, ainda localmente, em 2011.



Figure 2.3.: Foto retirada do site do IMPACTON (www.impacton.on.br) mostrando o CCD acoplado ao telescópio.

Um dos principais objetivos do IMPACTON é realizar o seguimento de asteroides da lista crítica (sessão 1.4), para assim realizar o refinamento da orbita destes. O ponto forte do OASI é que a maior parte dos observatórios com programas de busca estão concentrados no hemisfério Norte, fazendo com que $\sim 25\%$ da esfera celeste não sejam explorados. A instalação no hemisfério Sul fará com que estes objetos possam ser propriamente seguidos, impedindo com que os recém descobertos sejam perdidos.

Este projeto de mestrado está principalmente inserido no escopo IMPACTON, com a complementação do pipeline de redução de dados a fim de que o mesmo seja capaz de reportar as observações de pequenos corpos do Sistema Solar automaticamente, assim como realizar a detecção de novos objetos.

3. Pipeline

Uma noite de operação o IMPACTON é capaz de gerar 2GB de dados crus. No J-PAS o volume pode atingir a marca de terabytes por noite. Neste capítulo descrevemos o pipeline astrométrico e fotométrico responsável pela análise dos dados assim como a detecção de objetos moveis (Fig 3.1). O pipeline foi originalmente desenvolvido para uso do IMPACTON, entretanto a detecção de objetos moveis também será utilizada no J-PAS/J-Plus.

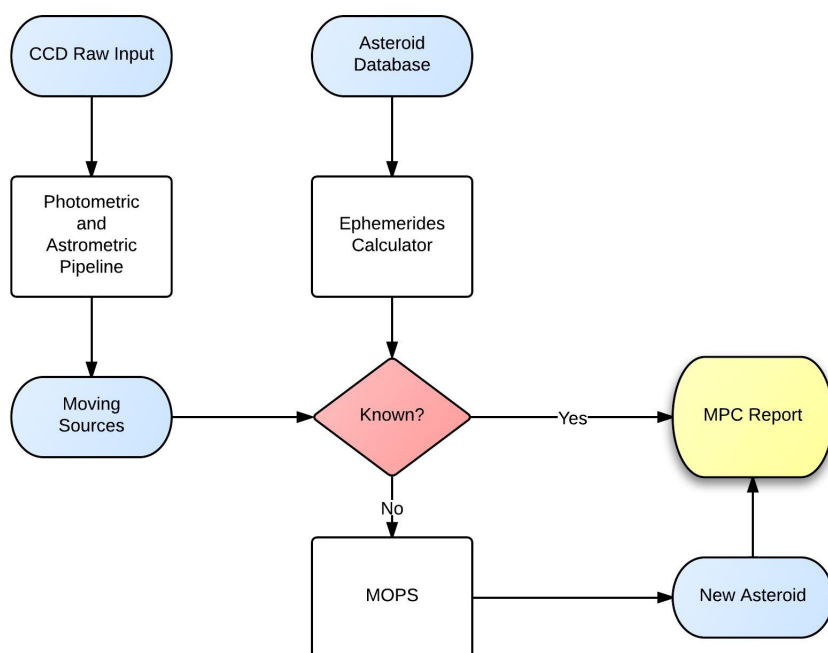


Figure 3.1.: O fluxograma acima representa o funcionamento geral do Pipeline. A imagem obtida pelo CCD é submetida a uma rotina de redução, onde é feita a Astrometria e Fotometria de cada fonte. A astrometria de cada fonte em imagens próximas temporalmente é comparada e as fontes estáticas são então extraídas. Uma rotina paralela realiza o calculo das posições de todos os asteroides conhecidos. Estas posições são comparadas com a astrometria das fontes moveis. Então os objetos conhecidos são identificados e tem sua astrometria enviada ao MPC. As fontes moveis não conhecidas são enviadas ao MOPS. Onde são armazenadas e com observações futuras, se tenta traçar uma orbita e identificar um novo asteroide. Neste caso uma notificação também é enviada ao MPC.

3.1. Pré-Processamento

Uma imagem obtida por um CCD possui uma serie de efeitos sistemáticos que devem ser retirados para uma melhor análise dos dados. Estes efeitos são provenientes de diversos fatores, desde a construção do CCD até a influencia atmosférica na hora em que a imagem foi tirada.

Existem três tipos de imagens de calibração que são utilizadas para corrigir estes efeitos: O “Bias Frame”, o qual é obtido com tempo de exposição zero e com o obturador fechado, com o proposito de obter as variações do sinal de fundo elétrico do detector; O “Dark Frame”, obtido com o mesmo tempo de exposição da imagem de ciência, ; O “Flat Field”, que pode ser obtido de varias formas (Com uma superfície plana iluminada homogeneamente, ou com uma imagem do céu na hora do crepúsculo, etc), o objetivo é corrigir o fato da sensibilidade do CCD poder variar pixel a pixel.

Em todos os casos mais de uma imagem de cada tipo de calibração devem ser obtidas e combinadas para assim gerar imagens “mestras” de calibração para então serem aplicadas as imagens de ciência. Um fluxograma deste processo é mostrado na Fig 3.2 .

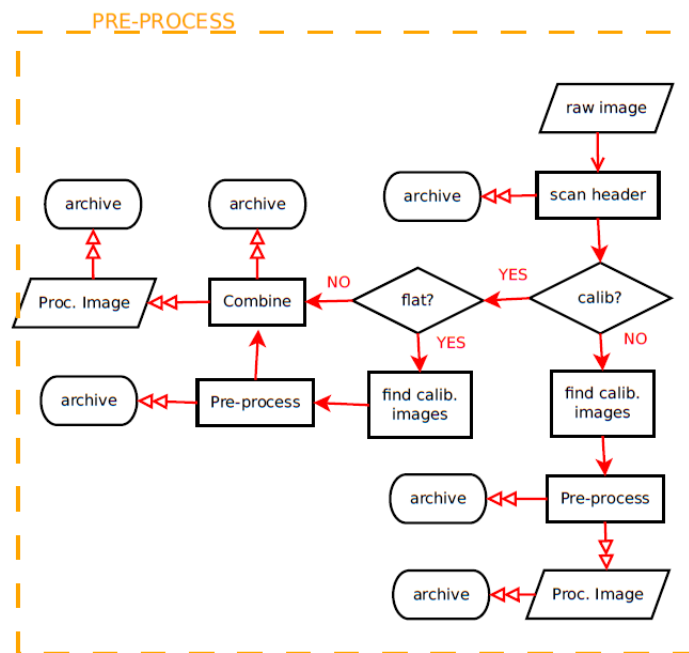


Figure 3.2.: O fluxograma acima mostra o funcionamento geral da fase de pré-processamento da imagem.

Inicialmente a leitura do header da imagem é feita e as informações são armazenadas no banco de dados. Se a imagem for de calibração elas são combinadas e armazenadas. No caso da imagem da calibração ser um “Flat Field” então estas são corrigidas de “Dark Frame” e “Bias Frame” antes de serem combinadas. No caso da imagem ser de ciência então ela é corrigida com as imagens de calibração combinadas e depois armazenadas.

3.2. Astrometria

Astrometria é uma técnica da Astronomia de Posição relacionada com a obtenção de medidas de posição e velocidade de corpos celestes. Estas medições são úteis para fornecer informações da dinâmica e cinemática destes corpos. A origem da astrometria está ligada com a criação de catálogos estelares, no sentido de criar um sistema de referências e um referencial no céu. Sendo um dos ramos mais antigos da Astronomia, o primeiro catálogo de estrelas foi construído por Hipparcos, na Grécia antiga com cerca de 850 estrelas (Hog, E., 2008).

O número de estrelas e a precisão das medições evoluíram muito desde Hipparcos. Neste trabalho utilizamos o catálogo 2MASS (The Two Micron All Sky Survey), que faz uma cobertura do céu inteiro contendo posições de ~500 milhões de estrelas em três filtros fotométricos, as bandas J (1.25 microns), H (1.65 microns), and K (2.17 microns). As posições no catálogo estão referenciadas no ICRS (International Celestial Reference System) e possuem uma acurácia da ordem de 100 mas.

A primeira etapa da redução fotométrica é a obtenção das coordenadas RA e Dec do centro da imagem a partir de informações no cabeçalho. Então uma busca é feita no catálogo e estrelas próximas do campo são projetadas no plano do CCD, utilizando a projeção gnomônica, fornecendo coordenadas (X,Y), em graus. Posteriormente se obtêm as coordenadas (x,y), em pixels, dos centroides das fontes contidas na imagem utilizando uma interface Python do software SExtractor. Uma rotina desenvolvida na linguagem C pelo Dr. Carvano faz a comparação das coordenadas projetadas (X,Y) das fontes do catálogo com as coordenadas (x,y) das fontes na imagem, e a partir da formação e comparação de triângulos com as mesmas e identifica quais fontes são correspondentes. Como o restante do código está em Python, desenvolvemos uma API para o mesmo.

Então utilizando um modelo de primeiro grau são calculados os coeficientes (a,b) de transformação:

$$X = a_{00} + a_{10}x + a_{01}y$$

$$Y = b_{00} + b_{10}x + b_{01}y$$

A partir destes coeficientes é feita então a transformação de coordenadas em pixels, para coordenadas de RA e DEC projetadas para todas as fontes e em seguida é aplicada a projeção gnomônica inversa, obtendo uma lista final de coordenadas RA e DEC referenciadas no topocentro, e no J2000.0.

3.3. Detecção de objetos moveis

A rotina astrométrica tem como saída uma lista contendo as posições de todos os objetos em uma imagem de CCD, seja o objeto uma estrela, asteroide, ou etc. Neste

trabalho estamos interessados em separar apenas os pequenos corpos do Sistema Solar dos demais tipos de objetos.

Uma maneira diferenciar os possíveis asteroides é, como dito nos capítulos introdutórios, a partir do movimento próprio. A comparação entre as posições das fontes obtidas em duas imagens de um mesmo campo, espaçadas em intervalo de tempo pequeno é capaz de fornecer quais destas fontes são estáticas; removendo-as, obtêm-se os objetos moveis. Todavia, é comum que parte deste objetos seja apenas ruído e não um asteroide de fato.

Primeiro é necessário verificar quais fontes estão na área de intersecção entre as imagens. Mesmo que a direção de apontamento de cada imagem seja a mesma, um telescópio está sujeito a erros de apontamento e acompanhamento, e ainda o CCD pode ter sofrer uma rotação, comum em telescópios com montagem azimutal.

O conceito do algoritmo que reconhece as fontes que intersectam ambas imagens está ilustrado na Fig 3.3. Primeiro se calcula as posições RA e Dec dos vértices de cada imagem, este processo é feito mesma forma como se obtêm a astrometria da demais fontes. No caso do IMPACTON, as coordenadas em pixels dos vertices são: $(0,0);(0,1028);(1028,0);(1028,1028)$.

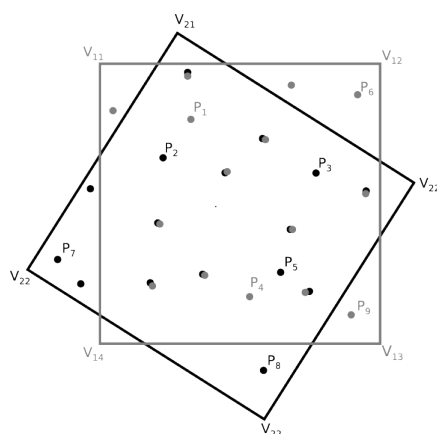


Figure 3.3.: A figura acima exemplifica o sistema de busca por objetos moveis. Os pontos pretos que possuem algum ponto cinza próximo são considerados estáticos. Os pontos que estão fora da área de intersecção são descartados, por exemplo P_7 faz um ângulo $>90^\circ$ com a aresta $V_{14}V_{13}$, assim como P_9 com a aresta $V_{23}V_{24}$. Pontos como P_1, P_2, P_3, P_4 e P_5 são considerados móveis e passados adiante. Note que os pontos P_1 e P_2 , assim como P_4 e P_5 estão próximos e podem pertencer a um mesmo objeto. Caso não sejam asteroides registrados poderão ser ligados pelo código MOPS(Capitulo 4).

Então os ângulos, centrados em um dos vértices, entre arestas da imagem 1 e fontes da imagem 2 são calculados, se algum destes ângulos for maior que 90° , então o

ponto é descartado. O processo é repetido para arestas da imagem 2 e fontes da imagem 1.

Os pontos remanentes de ambas imagens são então comparados através de uma busca binária onde se procura um par para os pontos de uma imagem na outra imagem, estabelecendo um limite de distancia. Os pontos que não foram capazes de serem associados a pontos de outra imagem são considerados móveis e passados a diante.

3.4. Calculo de Efemérides

Parte das fontes detectadas como moveis são observações de asteroides já catalogados. Enquanto a outra pode ser proveniente de um novo asteroide, ou então ser apenas ruído. A análise posterior, feita pelo Código MOPS (Capítulo 4), procura identificar novos asteroides entre esta segunda parte. Entretanto primeiro é necessário extrair os asteroides conhecidos desta lista.

Atualmente existem ~550 mil asteroides catalogados. Determinar a posição de todos estes asteroides no instante de tempo de cada observação requer um certo esforço computacional, principalmente quando o numero de imagens obtidas em uma noite é da ordem de centenas. Existe mais de uma maneira de obter estas posições, um exemplo seria a partir de interpolações usando os kernels do SPICE, desenvolvido pelo JPL. Todavia, desta forma seria necessário instalar praticamente todo o sistema do Spice, ocupando um grande espaço na memoria, e as interpolações para todos os asteroides requerem um grande processamento.

Uma alternativa foi desenvolver uma rotina (fig.3.4), escrita basicamente na linguagem Python, com apenas uma etapa em Fortran95, para a integração da orbita de asteroides para o instante de observação. Para isso, utilizamos os elementos osculadores a partir da base de dados Astorb, mantida pelo Observatório Lowell. O Astorb é um arquivo do tipo ASCII, o qual contem dados de todos asteroides. Entretanto parte dos dados não são relevantes para esta análise, por motivos de eficiência computacional apenas os dados relevantes (elementos osculadores, data de osculação, magnitude absoluta e parâmetro Slope) foram mantidos e uma rotina foi criada para conversão do arquivo ASCII para o formato binário da biblioteca de vetorização Numpy, da linguagem Python. Este processo diminui consideravelmente o tempo de leitura do arquivo. O Astorb é atualizado mensalmente, com isso, esta rotina deve fazer uma atualização do catalogo binário no mesmo intervalo de tempo.

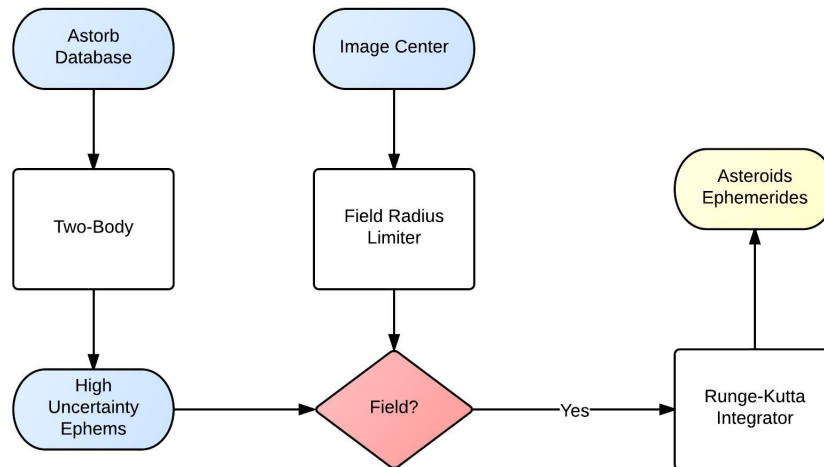


Figure 3.4.: Os elementos orbitais dos asteroides do Astorb são propagados por dois corpos até o instante da observação, produzindo efemérides com uma alta imprecisão. Os asteroides próximos do campo da imagem são filtrados e então passados para o integrador, produzindo efemérides mais precisas.

Primeiramente a órbita de todos os asteroides é propagada apenas por dois corpos, sem levar em consideração as perturbações planetárias, e de outro tipo. Para esta etapa o código foi paralelizado utilizando as bibliotecas Numexpr e Multiprocessing, do Python. As posições RA e Dec de todos os asteroides são obtidas, todavia com um alto nível de imprecisão, a incerteza neste caso varia por asteroide, mas geralmente é da ordem de 7min^2 . Existe uma biblioteca python (Pyephem), que é capaz de fazer este tipo de propagação, entretanto no caso alguns asteroides o erro de posição é demasiado grande. Aparentemente este erro, que ocorre em asteroides com alta excentricidade, é proveniente do método de resolução da equação de Kepler:

$$M = E - \varepsilon \sin E \quad (3.1)$$

Como esta biblioteca é de código fechado, ela foi descartada, e uma nova rotina desenvolvida. No caso da rotina desenvolvida a equação de Kepler é resolvida utilizando o método numérico de Newton.

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (3.2)$$

A partir das coordenadas do centro da imagem, é feita uma busca por asteroides no raio de 1° . É válido lembrar que o campo visual do IMPACTON é $\sim 6\text{min}^2$.

A busca também foi otimizada utilizando um algoritmo arvore KD (apêndice B), implementado pela biblioteca Scipy, também do python, neste caso foi o aumento de desempenho foi o mais notável.

Todos os asteroides no raio determinado são então passados para uma rotina de integração Runge-Kutta. Considere uma equação diferencial com condições iniciais:

$$\begin{aligned} y(x_0) &= y_0 \\ y'(x, y) &= f(x, y) \end{aligned} \tag{3.3}$$

Deseja-se obter a solução para um $x_0 + \Delta x$. Uma maneira de obter uma aproximação é a partir do método de Euler:

$$y_{n+1} = y_n + hf(x_n, y_n) \tag{3.4}$$

Todavia o método acima considera informação derivativa apenas no começo do intervalo. O método Runge-Kutta propõe dividir o intervalo em passos e obter informações derivativas nestes pontos intermediários. Um exemplo do método Runge-Kutta de segunda ordem é ilustrado abaixo:

$$\begin{aligned} k_1 &= hf(x_n, y_n) \\ k_2 &= hf(x_n + \frac{1}{2}h, y_n + \frac{1}{2}k_1) \\ y_{n+1} &= y_n + k_2 \end{aligned} \tag{3.5}$$

Para o caso da propagação da orbita estamos utilizando um integrador de quinta ordem com coeficientes Cash-Karp (Tab. 3.1), devido a utilização de passo adaptativo.

$$\begin{aligned} k_{x'_1} &= dt * v_0 \\ k_{v'_1} &= dt * a(x_0, t + dt) \\ x'_1 &= x_0 + k_{x'_1} \\ v'_1 &= v_0 + k_{v'_1} \\ \\ k_{x'_2} &= dt * v_1 \\ k_{v'_2} &= dt * a(x_1, t + a_2dt) \\ x'_2 &= x_0 + b_{21}k_{x'_2} \\ v'_2 &= v_0 + b_{21}k_{v'_2} \\ &\dots \\ x_{n+1} &= y_n + c_1k_{x'_1} + c_2k_{x'_2} + c_3k_{x'_3} + c_4k_{x'_4} + c_5k_{x'_5} + c_6k_{x'_6} \\ v_{n+1} &= y_n + c_1k_{v'_1} + c_2k_{v'_2} + c_3k_{v'_3} + c_4k_{v'_4} + c_5k_{v'_5} + c_6k_{v'_6} \end{aligned} \tag{3.6}$$

Onde x_0 e v_0 são os vetores posição e velocidade para a época de osculação do Astorb. Neste caso as perturbações planetárias são consideradas. As posições dos oito planetas do Sistema Solar, são obtidas utilizando uma rotina em Fortran, também com uma API para Python, que faz uma interpolação com kernels obtidos pelo SPICE. A função $a(x,t)$, na eq. 3.6, é a aceleração, é dada pela equação :

$$\mathbf{a} = -GM_{\odot} \frac{\mathbf{r}}{r^3} - \sum_{i=1}^8 GM_i \left(\frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}_i}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_i|^3} + \frac{\mathbf{r}_i}{|r_i|^3} \right) \quad (3.7)$$

Para a construção do passo adaptativo temos:

$$\begin{aligned} x_{n+1}^* &= y_n + c_1^* k_{x_1}' + c_2^* k_{x_2}' + c_3^* k_{x_3}' + c_4^* k_{x_4}' + c_5^* k_{x_5}' + c_6^* k_{x_6}' \\ v_{n+1}^* &= y_n + c_1^* k_{v_1}' + c_2^* k_{v_2}' + c_3^* k_{v_3}' + c_4^* k_{v_4}' + c_5^* k_{v_5}' + c_6^* k_{v_6}' \end{aligned} \quad (3.8)$$

A estimativa do erro é:

$$\Delta = \max((x_{n+1} - x_{n+1}^*), (y_{n+1} - y_{n+1}^*)) \quad (3.9)$$

e o novo passo:

$$h_0 = h_1 \left| \frac{\Delta_0}{\Delta_1} \right|^{0.2} \quad (3.10)$$

Coeficientes Cash Karp para Método Runge-Kutta							
i	a _i	b _{ij}				c _i	c _i *
1						37/378	2825/27648
2	1/5	1/5				0	0
3	3/10	3/40	9/40			250/621	18575/55296
4	3/5	3/10	-9/10	6/5		125/594	13525/55296
5	1	-11/54	5/2	-70/27	35/27	0	277/14336
6	7/8	1631/55296	175/512	575/13824	44275/110592	253/4096	512/1771
J =		1	2	3	4	5	

Table 3.1.: Coeficientes Cash-Karp pra integrador Runge-Kutta

O passo inicial é estabelecido como 1 dia. As iterações do integrados são então feitas resultando no vetor de estado dos asteroides próximos do campo. Estes são então passados para coordenadas equatoriais e comparadas com a astrometria dos objetos moveis. Um limite de erro é estabelecido, os asteroides que possuem uma fonte correspondente dentro deste limite são então identificados e passados a uma rotina que gera o relatório ao MPC (apêndice B). Os demais objetos moveis são armazenados e enviados ao MOPS (capitulo 4).

4. MOPS

4.1. Introdução

A equipe do Pan-STARRS desenvolveu um sistema de identificação de asteroides que torna possível a busca destes corpos em volume massivo de dados. A este sistema foi dado o nome de MOPS (Moving Object Processing System)[JK07].

A entrada de dados do MOPS é uma lista de fontes luminosas identificadas como moveis (seção 3.3), provenientes de diversas noites de observação. Estas fontes podem ser associadas a pequenos corpos do Sistema Solar, como asteroides ou cometas. Entretanto uma parte considerável delas pode ser apenas ruído do CCD, como raios cósmicos incidentes, ruído elétrico, etc. O trabalho do MOPS consiste em ligar fontes espaçadas temporalmente de maneira que seja possível traçar uma órbita compatível com um corpo do Sistema Solar.

A densidade de fontes moveis em uma imagem, a exemplo do Pan-STARRS, é da ordem de 500 pontos na eclíptica (~250 asteroides + ~250 de ruído)[JK07]. O valor da densidade de objetos reais e ruído varia de acordo com as especificações dos instrumentos de cada survey. Espera-se um valor menor para o IMPACTON e J-Pas. Para o caso do LSST, todavia, a densidade será ainda maior, devido a um campo visual maior e a magnitude mais profunda obtida em cada exposição.

Por noite cada survey irá gerar centenas de imagens. Com isso, a tarefa de identificação de asteroides se torna um árduo trabalho computacional, mesmo para a atual geração de computadores. Para tornar este sistema realmente eficiente o algoritmo do MOPS foi escrito utilizando técnicas modernas de computação, como a implementação de algoritmos de árvores variáveis e árvores KD (O apêndice C fornece uma introdução a árvores KD, é recomendado a leitura deste apêndice antes de prosseguir com este capítulo) .

Um fluxograma geral do MOPS é apresentado na Fig.4.1. Nos estágios intermediários são apresentados dois novos conceitos, estes são os temas dos dois próximos tópicos.

É importante notificar que o MOPS ainda é um código em desenvolvimento. Ainda não existe atualmente um estado da arte para o mesmo.

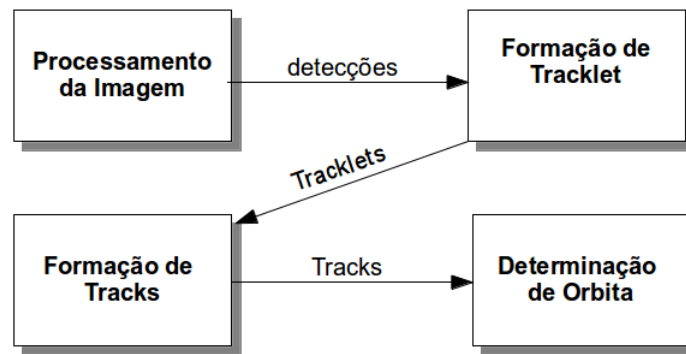


Figure 4.1.: Ilustração geral das etapas do MOPS. Cada fase é responsável por filtrar os dados para a próxima.

4.2. Formação de Tracklets

O primeiro estágio do MOPS é realizar a associação de fontes obtidas na mesma noite. O produto das associações estabelecidas desta forma recebem o nome de *tracklets*.

Para a formação de *tracklets*, a priori, se assume que o movimento aparente de um asteroide durante uma noite segue um regime linear. Isto significa que uma *tracklet* possui apenas posição e velocidade, mas não possui aceleração. A partir desta consideração é estabelecido um limite de velocidade aparente e uma projeção da região de busca de um par de fonte é feita em uma imagem subsequente (Fig.4.2). Uma fonte todavia pode ser associada a mais de um ponto, assim cada fonte pode pertencer a mais de uma *tracklet*.

Alguns NEOs podem possuir aceleração no percurso de uma noite, induzindo um erro na formação de *tracklets*. Para evitar este tipo de problema, a formação de *tracklets* é feita apenas para imagens espaçadas em até 90 min. Esta restrição é baseada também em parâmetros computacionais, se este limite for muito estendido, um numero muito grande de *tracklets* poderia ser formado, levando a um tempo muito grande para a execução do código.

O primeiro algoritmo desta etapa, responsável apenas por associar fontes em duas imagens espaçadas em até 90min, é o findTracklets. Para uma maior eficiência a busca por pares de pontos compatíveis com o limite de velocidade estabelecido é feita utilizando arvores KD.

Um campo, contudo, pode ser revisitado mais de duas vezes em uma noite. Isto faz com que o numero de tracklets provenientes de um mesmo asteroide seja potencialmente maior, aumentando desnecessariamente a entrada de dados para a próxima etapa, que realiza associações de *tracklets*.

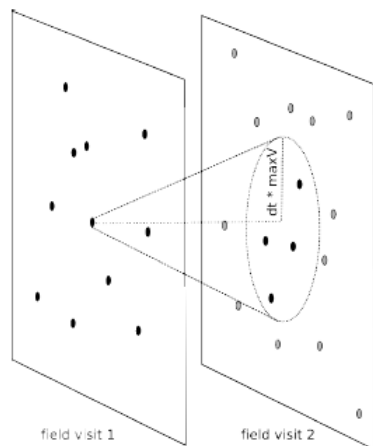


Figure 4.2.: Uma velocidade máxima para o movimento aparente de asteroide é utilizado como um filtro da região onde é possível a formação de tracklets. [JK07]

O algoritmo `collapseTracklets` (Fig.4.2) analisa as tracklets formadas em uma mesma noite e faz a junção de tracklets colineares, formando tracklets com 3 ou mais pontos. Posteriormente o algoritmo `purifyTracklets` analisa as tracklets que foram formadas por este método e exclui as que possuem um resíduo grande na formação da linha.

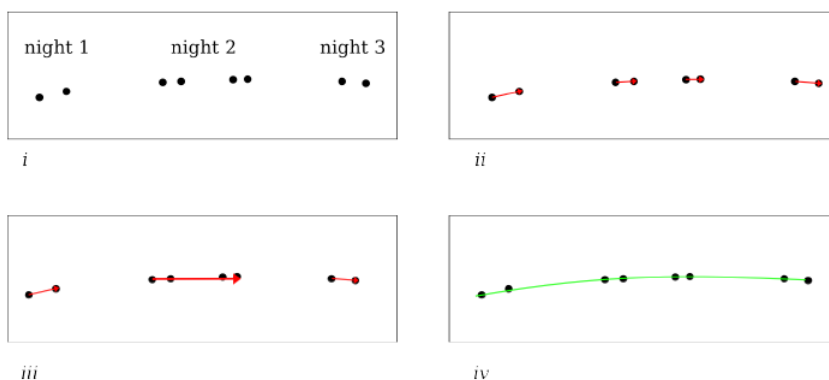


Figure 4.3.: Em *i* estão as detecções de cada noite. Em *ii* é passado o algoritmo `findTracklets`. Em *iii*, os tracklets da noite 2 que potencialmente são do mesmo objeto são unificados pelo `collapseTracklets` e `purifyTracklets`. E em *iv* uma track é formada. [JM09]

Nesta etapa um numero grande de tracklets falsas devem ser geradas, principalmente pelo volume de ruído. Entretanto com a formação de tracks e a determinação de orbita, estas devem ser filtradas.

4.3. Formação de Tracks

A formação de tracks recebe como entrada as *tracklets* de diferentes noites e tenta realizar uma associação entre as mesmas. Esta é a tarefa com maior demanda computacional, dados de varias noites devem ser analisados para que uma *track* seja gerada.

Tipicamente se utiliza 3 noites com um intervalo de tempo total de 15 dias para esta etapa. Para o movimento aparente de um asteroide neste intervalo de tempo é feita uma aproximação por movimento quadrático. Isto significa que diferente das *tracklets*, as *tracks* possuem aceleração.

Para aumentar a eficiência do programa também se utiliza uma estrutura que forma arvores KD, desta vez de 4 dimensões (posição RA, posição Dec, velocidade RA, velocidade Dec). Assim em cada imagem é construída uma arvore e calcula-se a aceleração necessária para que um nodo de uma arvore alcance o nodo de outra arvore, subsequente (Fig 4.4). Esta aceleração deve estar entre o limite ($\geq 0.02^\circ/\text{dia}^2$ e $\leq -0.02^\circ/\text{dia}^2$). Os nodos que não se enquadram nesta busca são abandonados. Isso reduz consideravelmente o tempo computacional desta etapa. Para os nodos que se adequam ao limite é repetido o processo usando os nodos “filhos”, até que se atinja um nodo folha e então é feito a associação de *tracklets*.

O método descrito no paragrafo anterior verifica a possibilidade de formação de uma *track* com apenas duas *tracklets*, com duas noites. Entretanto para que a *track* seja validada e possa ser passada para a determinação inicial da orbita é necessário que, ao menos uma *tracklet* que de suporte a *track* proposta, esta obtida em uma noite intermediaria as duas *tracklets* primárias. O método de busca de *tracklets* suportes utiliza um método inteligente com arvores variáveis (Fig4.4), desenvolvido por Kubica, em sua tese de doutorado.

Uma vez que as *tracklets* de 3 ou mais noites são consideradas validas para gerar uma *track*, é então calculado um ajuste quadrático que passe pelos 3 conjuntos de pontos. Pelo algoritmo original do Pan-STARRS uma vez obtida uma *track* com um resíduo razoável, então é feito o processo de determinação inicial da orbita. Todavia, como o LSST será capaz de atingir magnitudes mais profundas, assim aumentando a densidade de objetos no campo, e aumentando o numero de *tracks* falsas geradas, um novo filtro foi adicionado, baseado em uma probabilidade chi-squared, aumentando a restrição do ajuste quadrático [JM09].

4.3 Formação de Tracks

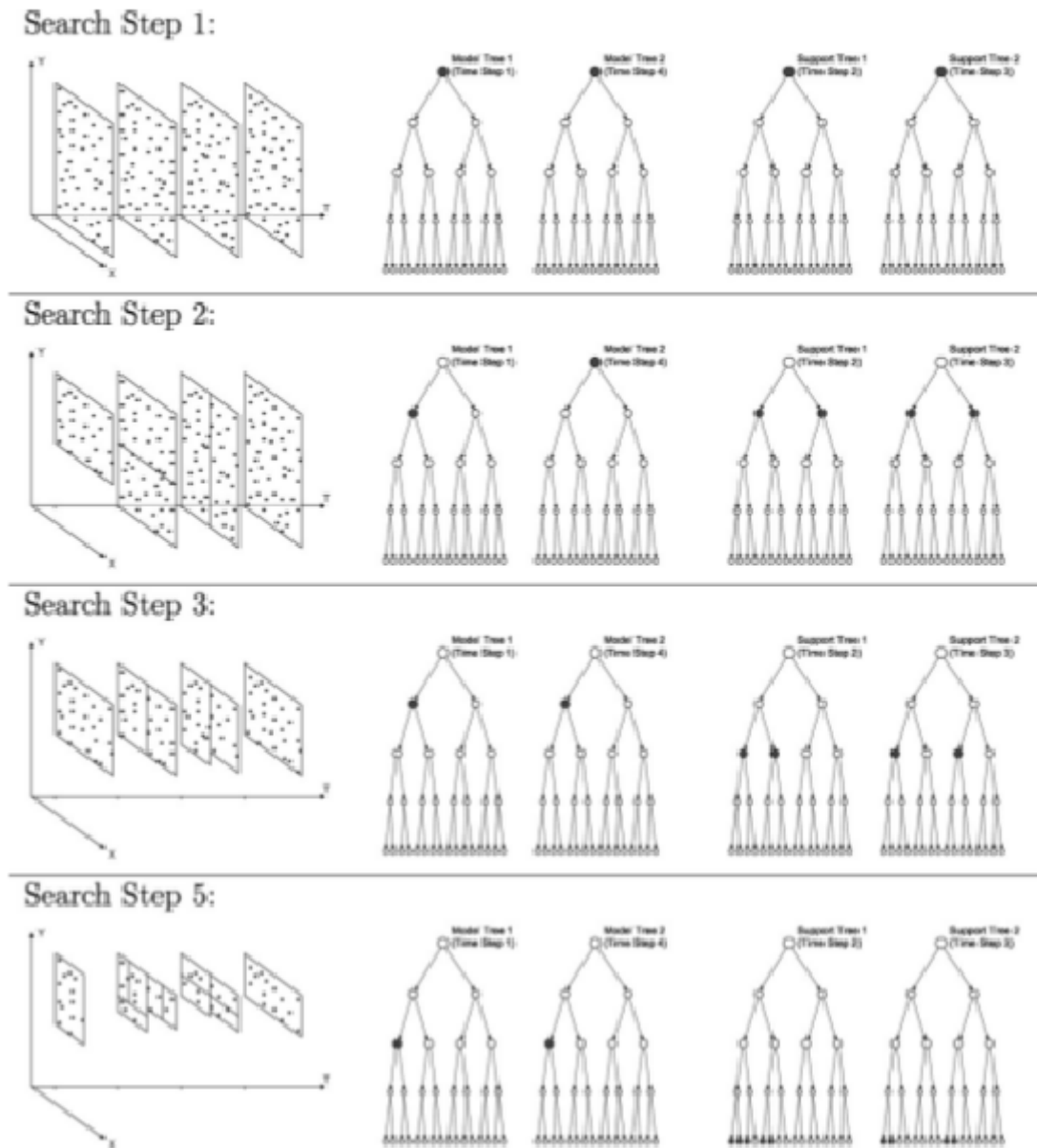


Figure 4.4.: A ilustração mostra a formação de tracks. A cada passo é feita uma busca partindo da árvore formada pela primeira imagem (Model Tree 1), buscando por regiões acessíveis na imagem posterior (Model Tree 2). A validação da track é feita quando se acha alguma tracklet suporte em uma imagem intermediária (Suport Tree 1 e/ou 2). [JK07]

4.4. Determinação de orbita

O problema de determinação da orbita de um asteroide não é trivial[Mil99]. Uma orbita é solução da equação[Mil09]:

$$\frac{d\vec{y}}{dt} = f(\vec{y}, t, \vec{\mu}) \quad (4.1)$$

Onde \vec{y} é o vetor de estado, t o tempo e $\vec{\mu}$ um vetor de parâmetros dinâmicos. Os parâmetros dinâmicos determinam a configuração de forças do problema. A observação de um corpo em um dado instante de tempo (t_0) fornece uma condição inicial:

$$\vec{y}(t_0) = \vec{y}_0 \quad (4.2)$$

Uma solução geral pode ser dada da forma:

$$\vec{y} = \vec{y}(t, \vec{y}_0, \vec{\mu}) \quad (4.3)$$

Através de uma função observação $R(\vec{y}, t, \vec{\nu})$, onde $\vec{\nu}$ é um vetor de parâmetros cinemáticos (velocidades e acelerações aparentes), é possível definir uma função previsão, relacionando a função observação com a solução geral da orbita:

$$r(t) = R(\vec{y}(t), t, \vec{\nu}) \quad (4.4)$$

É esperado que o resultado da previsão e a observação não sejam iguais. A diferença entre ambos é chamado de resíduo:

$$\xi_i = r_i(t) - R(\vec{y}(t_i), t_i, \vec{\nu}) \quad (4.5)$$

Os resíduos podem ser combinados em um vetor de resíduos:

$$\vec{\xi} = \sum_{i=1}^m \xi_i \quad (4.6)$$

Uma orbita é obtida através de correções diferenciais nos parâmetros \vec{x} que devem ser ajustados aos dados. As componentes de \vec{x} podem ser uma das componentes

dos parâmetros cinemáticos, dinâmicos ou das condições iniciais. Para esta análise é definido uma função $Q(\xi)$. Em sua forma mais usual:

$$Q(\vec{\xi}) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \xi_i^2 \quad (4.7)$$

A órbita nominal é então estabelecida para um \vec{x}^* que minimize o valor de $Q(\vec{x})$. Onde:

$$Q(\vec{x}) = Q(\vec{\xi}(\vec{x})) \quad (4.8)$$

Esta análise permite uma interpretação na qual \vec{x}^* é o ponto de mínimo, todavia, as soluções próximas também são possíveis. A região de órbitas possíveis (região de confiança, Z) é determinada através de um parâmetro de confiança $\sigma > 0$:

$$Z(\sigma) = \left\{ \vec{x} \in \mathbb{R}^N \mid Q(\vec{x}) \leq Q^* + \frac{\sigma^2}{m} \right\} \quad (4.9)$$

Contudo o problema maior é que antes de fazer correções diferenciais é necessário estabelecer um palpite inicial para a órbita. Este processo é chamado de determinação inicial da órbita (IOD). Existem diferentes abordagens para este problema.

O software livre OrbFit, escrito por Andrea Milani, originalmente em fortran95, utiliza o método de Gauss (1809). Esta aproximação necessita de três observações topocêntricas para que uma órbita preliminar seja determinada. É essencial neste caso, que a linha traçada pelas três observações apresente uma curvatura.

O formalismo de Gauss considera que a dinâmica do corpo é regida pelo problema de dois corpos. Com isso os vetores posição heliocêntricos do objeto são coplanares. O método de Gauss utiliza então um argumento geométrico para obter a elipse que caracteriza a órbita. Para uma descrição completa deste método recomenda-se a leitura do livro Teoria de Determinação de Órbita, Milani A[Mil09].

Com as tracks obtidas anteriormente é feita a determinação inicial da órbita. Posteriormente quando o objeto recebe mais observações é então feito o processo de determinação diferencial da órbita (DOD). Se uma órbita nominal for bem ajustada nesta etapa, a descoberta é relatado ao MPC.

Atualmente o Pan-STARRS utiliza uma versão do OrbFit, atualizada pelo Andrea Milani para aumentar o desempenho. Enquanto no LSST se utiliza o software livre OpenOrb, testes indicam que possivelmente haverá uma troca, por motivos de desempenho no processamento. O OpenOrb demora até 4 ordens de grandeza a mais na realização do cálculo da órbita de uma track [JM09].

No caso OpenOrb, escrito por Mikael Granvik em fortran95 com interfaces para python, o problema de determinação da órbita é resolvido utilizando teoria de inversão Bayesiana[MG09]. Este método é eficiente em criar um bom ajuste, porém requer um grande tempo computacional, como descrito.

Após a órbita ser determinada, ainda existem procedimentos a serem feitos para que o asteroide não seja mais perdido ou erroneamente re-catalogado. Em um artigo de Milani, de 1999, o autor propõe as etapas de identificação de asteroide que evitam o problema descrito[Mil99].

Dentre elas, para o caso de uma órbita já computada, pode ser realizado os problemas de Atribuição e Precovery. A atribuição consiste em adicionar observações posteriores no cálculo da órbita, assim obtendo um arco observacional maior, e um refinamento da mesma. Para realizar este processo basta calcular a efeméride do objeto para a data da nova observação e analisar se está de acordo com a astrometria de alguma fonte na imagem, assim como é feito no capítulo 3, quando falamos de reconhecimento de objetos catalogados. Precovery é o oposto do caso de Atribuição, aqui se propaga a órbita para o passado e verifica-se se o objeto já foi observado em alguma imagem já obtida, armazenada em um banco de dados.

5. Resultados

5.1. Astrometria

A rotina de redução astrométrica foi executada para um subconjunto de imagens obtidas pelo projeto IMPACTON nas quais a rotina de pré-redução já havia sido executada. No total foram passadas para o algoritmo um total de 6052 imagens obtidas em 23 noites, em missões observacionais no período de 2011-2012.

A figura 5.1 mostra o numero de observações por asteroide. São 4717 observações de 20 asteroides.

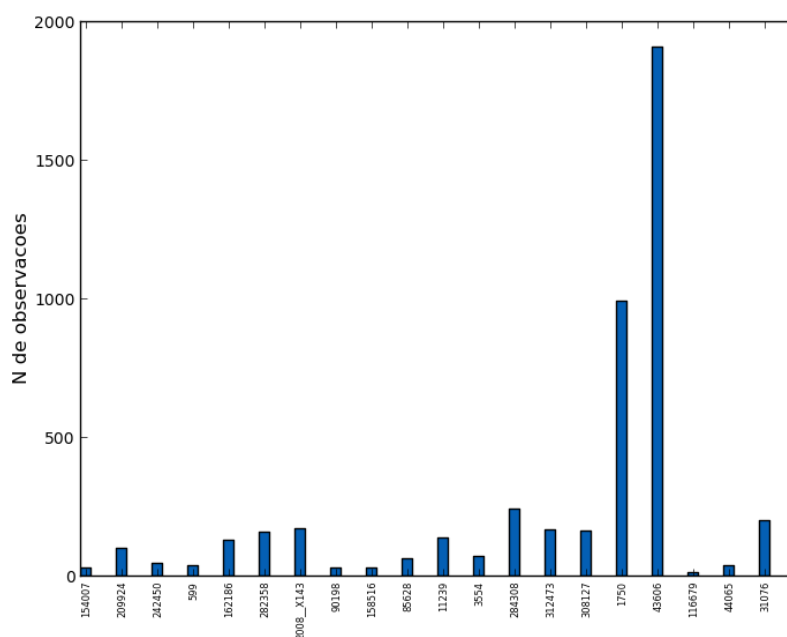


Figura 5.1.: Numero de observações por asteroide reportados ao MPC

A diferença entre o numero de imagens e o numero de asteroides observados se deve ao fato de que toda imagem obtida em uma noite é passada ao pipeline, entretanto a mesma pode não ter uma boa qualidade e não se tratar de fato de uma observação

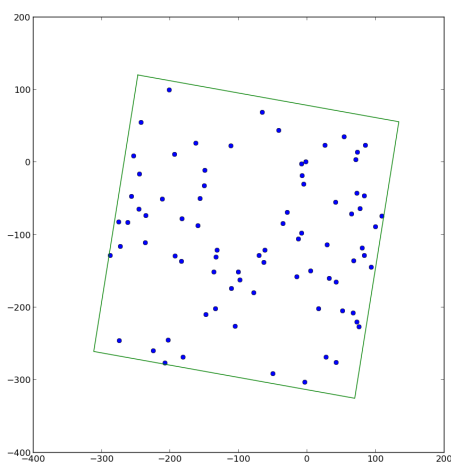
real de algum asteroide. No gráfico são apresentadas apenas as observações que foram aceitas pelo MPC. Diversas outras observações foram recusadas pelo MPC, principalmente pelo fato do asteroide estar passando próximo de uma estrela.

5.2. Detecção de Objetos Moveis

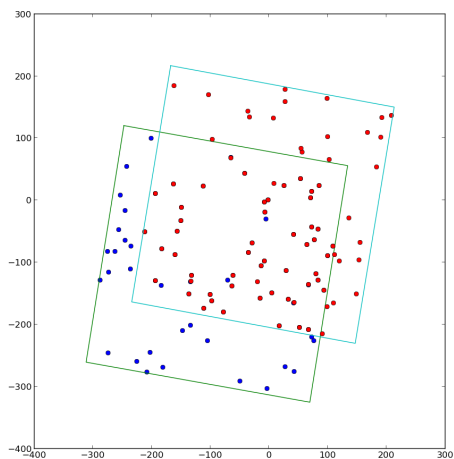
A eficiência do algoritmo de detecção de objetos moveis está intimamente ligada à qualidade das posições astrométricas calculadas. Atualmente a rotina está sendo usada apenas com dados do IMPACTON, onde na maioria dos casos, o campo é menos populoso do que imagens do J-PAS.

O teste foi realizado com imagens que seguiam um asteroide conhecido. Em todos os casos o algoritmo foi capaz de encontrar o asteroide conhecido como um objeto móvel. Uma quantia adicional de pontos proveniente destas imagens também foram selecionados como moveis; acredita-se que a maior parte destes seja apenas ruído e não devem pertencer a objetos moveis reais. Todavia esta análise posterior é do escopo do MOPS.

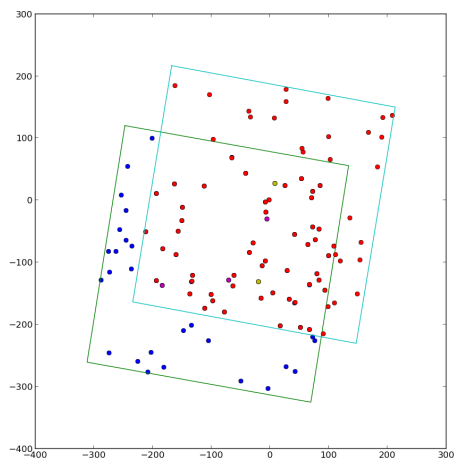
Um exemplo obtido com dados reais é apresentado na figura 5.2



(a)



(b)



(c)

Figura 5.2.: A figura (a) apresenta uma imagem típica obtida pelo IMPACTON. Após contrastada com outra imagem de um campo que a intersecta (b) é possível detectar os objetos que não estão em ambas imagens (moveis). Na figura (c) os pontos em lilas são os objetos moveis da imagem 1 e os pontos dourados são os objetos moveis da imagem 2.

5.3. Calculo de Efemérides

Esta rotina foi desenvolvida com o principal propósito de identificar asteroides conhecidos em imagens de CCD. As efemérides calculadas são comparadas com as posições astrométricas das fontes em cada imagem. Através de um limite estabelecido para o erro astrométrico e a precisão da efeméride, o asteroide e a fonte luminosa da imagem são associados, e o asteroide é reconhecido. Para este processo é necessário uma efeméride precisa, de modo que o asteroide não seja erroneamente associado com uma outra fonte.

Após passar pelo integrador, as efemérides calculadas para um mês após a data de osculação possuem um erro da ordem de 10 segundos de arco. Este intervalo de tempo é o que proporciona o maior erro, visto que a data de osculação do Astorb é atualizada mensalmente.

O tempo de execução para a rotina que propaga todos os asteroides do Astorb por dois corpos, seleciona os que estão próximos ao campo da imagem, e então realiza a integração destes para a data da imagem é de aproximadamente 25s em computador i5. Para o servidor onde seria realmente instalado o programa, o tempo de processamento certamente seria reduzido.

Todavia o erro é considerado muito grande para a análise em questão. Está sendo analisado maneiras de um calculo mais preciso. Uma alternativa a esta aproximação foi desenvolvida utilizando um serviço online PyMPCChecker. Este, baseado no original MPCChecker, mantido pelo MPC, foi desenvolvido para auxiliar astrônomos nesta função, de reconhecer asteroides no campo de suas imagens. O PyMPCChecker fornece uma busca que utiliza o método “GET” do php para realizar a busca de asteroides em um raio discriminado do centro do campo. Através de uma rotina desenvolvida na linguagem python, esta alternativa foi implementada com sucesso ao pipeline.

5.4. MOPS

O código MOPS foi obtido somente num estágio tardio a esta dissertação. A versão instalada é a fornecida pela equipe do LSST. Esta versão foi desenvolvida para se adequar aos dados e ao pipeline do survey descrito. A mesma não possui uma boa documentação quanto a instalação e uso. Por esse motivo ainda não foi possível obter uma implementação completa do código

O MOPS foi desenvolvido na linguagem de programação C++ e utiliza a biblioteca de astronomia posicional SLALIB, em C. Esta já foi descontinuada e não possui mais distribuição nesta linguagem. Entretanto ainda é distribuída em Fortran. Foi possível a aquisição de uma biblioteca que utiliza uma API das funções em Fortran, para assim obter a biblioteca na linguagem desejada. Na mesma, contudo, não havia

sido feita uma API para todas as funções do SLALIB, algumas destas tiveram que ser programadas.

Com isto foi possível a instalação do código. Após esta etapa foi realizado alguns testes com os algoritmos `findTracklets` e `collapseTracklets`.

O primeiro destes testes foi com um input contendo apenas posições reais de um asteroide, extraídas do JPL/Horizons, para uma noite. Posteriormente foram adicionadas posições aleatórias, correspondentes a objetos falsos (ruídos). Em ambos os casos o algoritmo foi capaz em associar objetos e formar tracklets. Nesta etapa era esperado que tracklets falsas fossem formadas, provenientes de associações de objetos reais com objetos falsos. O importante é que todas as tracklets reais foram formadas.

Um teste secundário foi realizado com dados reais de uma noite de dados do IMPACTON, o arquivo de entrada para MOPS continha 686 detecções, de 108 imagens, entre estas objetos reais e ruídos. Nesta etapa os asteroides conhecidos foram mantidos entre os dados para verificação da eficiência do código. Após passar pelo algoritmo `findTracklets`, 8270 tracklets foram formadas. É válido lembrar que este algoritmo forma tracklets apenas com pares de detecções. Com o uso do `collapseTracklets` o número de tracklets foi reduzido para 739. Entretanto a maior parte das tracklets possui mais de dois pontos. Esta grande redução no número de tracklets é esperada, visto que as imagens desta noite foram obtidas com o intuito de um estudo de fotometria de um asteroide, ou seja, o telescópio estava acompanhando o asteroide, logo todas as 108 imagens pertencem a campos que se intersectam, ou estão próximos, e muitas das detecções são de fato de um mesmo corpo.

A versão fornecida pelo LSST contem scripts na linguagem python e bash para a interface com os códigos do MOPS. Isto é, a partir destas rotinas é possível realizar a organização de inputs e outputs. Tais scripts foram alterados para a devida integração com o pipeline do IMPACTON.

A implementação do algoritmo `linkTracklets`, responsável por ligar as tracklets de diferentes noites em tracks, é etapa a qual ainda não foi vencida. A execução do código não foi capaz de criar tracks corretas. A próxima etapa seria a determinação de orbita. Para isto o programa `orffit` foi instalado, todavia ainda não foi testado com uma entrada de dados proveniente do MOPS.

6. Conclusões

Conclui-se que a astrometria que está sendo realizada é satisfatória para os objetivos do pipeline. Assim como a detecção de objetos móveis. Esta ainda deve ser testada futuramente com dados do J-Pas/J-Plus.

O calculo de efemérides através da integração Runge-Kutta não produziu o resultado esperado. A rotina que utiliza o serviço online PyMPChecker foi capaz de substituir o integrador e produzir efemérides com a precisão desejada. Entretanto é valido lembrar que o pipeline se torna dependente neste ponto da estabilidade do servidor do provedor do serviço, assim como da instituição onde o pipeline será executado.

O MOPS já foi testado sucessivamente pelo Pan-STARRS e LSST e já se mostrou eficiente na identificação de objetos móveis como asteroides. A este ponto é possível concluir que o código se mostrou eficiente na associações de objetos em uma mesma noite. Entretanto para a associações em noites diferentes ainda nenhuma analise pode ser feita. A equipe do LSST está em cooperação com a equipe do IMPACTON para verificação se o problema se trata de algum erro de implementação/operação, o que é mais provável, ou se de fato existe algum erro interno no código.

O numero de detecções e de tracklets em uma noite de dados é suficientes para demonstrar que é necessária a construção de um banco de dados que armazene adequadamente a entrada e saída do MOPS.

Por fim, conclui-se que o pipeline desenvolvido é capaz de tratar os dados provenientes de surveys fotométricos, como o IMPACTON e o J-Pas/J-Plus, no sentido de enviar relatórios com informações astrométricas de asteroides ao MPC e de detectar novos asteroides. Entretanto ainda não se obteve um estado da arte do mesmo, e o segundo objetivo ainda não foi atingido.

As próximas etapas do trabalho envolvem a construção do banco de dados para o MOPS, e a implementação da interface de saída do MOPS com o software OrbFit, para o calculo de orbitas. Também é uma perspectiva futura a implementação das rotinas de detecção de objetos moveis no J-Pas/J-Plus.

A. Relatando Observações ao MPC

O produto do pipeline desenvolvido sempre resulta em observações astrométricas a serem reportadas ao MPC. Para isso, é necessário que os dados sejam formatados de uma maneira específica. Cada linha do arquivo enviado ao MPC deve possuir, no máximo, 80 colunas de caracteres. Sendo, para asteroides, cada coluna é reservada da seguinte maneira:

Coluna	Uso
1-5	Numero do Objeto
6-12	Designação Provisoria
13	Asterisco(Caso de Descoberta)
14	Nota 1
15	Nota2
16-32	Data da Observação
33-44	RA(J2000.0)
45-56	Dec(J2000.0)
57-65	em branco
66-71	Banda e Magnitude
72-77	em branco
78-80	Código do Observatório

Tab.B.1 - Tabela com as especificações do conteúdo das colunas de caracteres para envio de dados astrométricos de asteroides para o MPC.

Para cometas a as colunas 1-13 devem ser preenchidas da seguinte forma:

Coluna	Uso
1-4	Numero do Cometa
5	Tipo de Orbita
6-12	Designação Provisoria
13	em branco

Tab.B.2 - Alterações na Tab.B.1; para o caso de cometas.

A numeração do asteroide devem conter 5 dígitos, isto é, para o caso do asteroide 1, as colunas 1-5 devem estar da forma 00001. Asteroides com numeração de seis dígitos devem ser colocados na forma compacta, ou seja, os dois primeiros dígitos, devem ser trocados para a letra correspondente. O dígito “10” corresponde a letra “A”, “11” para a letra “B”, e assim sucessivamente para todo alfabeto, sendo primeiro maiúsculas, depois minúsculas.

A nota 1 serve para especificar as condições de observação, por exemplo, se o seeing ou guiagem estavam ruins, ou se o campo estava estrelado, etc. Uma lista completa destes códigos pode ser encontrada no site do MPC. A nota 2 serve para indicar como a observação foi feita, no caso deste pipeline, o código é sempre “C”, indicando que as observações foram feitas com um CCD.

As datas devem ser no formato UTC, e devem ser relativas ao ponto médio da observação. O formato deve ser “AAAA MM DD.dddddd”, isto é, a precisão da data deve ser de 0.00001 dias.

As coordenadas de Dec e RA são referenciadas no J2000.0. Sendo a precisão de cada 0.1” e 0.01”, respectivamente. A magnitude deve ter precisão de 0.1. Precisoões maiores podem ser passadas, mas devem ser justificadas.

As ultimas colunas são dedicadas ao código do observatório. Caso o observatório não possua código, como ainda é o caso do IMPACTON e J-PAS, isto deve ser especificado no cabeçalho de envio. A aquisição de um código do MPC é dada a partir da aceitação dos reports enviados.

Para facilitar os reports ao MPC, desenvolvemos uma rotina que faz a conversão dos dados para a forma requerida.

B. Árvores KD

Nos capítulos 3 e 4 foram apresentadas algumas rotinas que utilizam algoritmos árvores KD em sua estrutura. Em todos os casos, a implementação é dada devido à necessidade de identificar um grupo de dados baseado em sua localização espacial, em um dado sistema de coordenadas.

As árvores KD fornecem uma estrutura hierárquica de organização de dados, de forma que otimiza os mecanismos de busca.. O conceito é herdado das árvores binárias, onde cada nodo pode ser particionado em no máximo dois nodos filhos. Os nodos que não possuem ramificações são chamados de nodos folha.

Uma árvore KD é gerada particionando recursivamente o espaço (Fig C.1). A cada etapa é calculada a menor “caixa” que contém os pontos de um nodo; a esta caixa é dado o nome de bounding box. Os nodos filhos são gerados particionando na mediana de maior dimensão do bounding box. O processo é interrompido quando cada nodo possui um numero de pontos pré-estabelecido

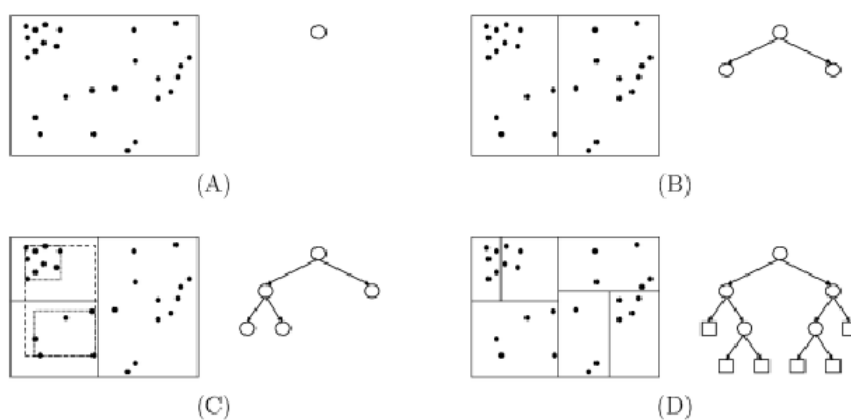


Fig.C.1 - Exemplo da construção de uma árvore KD de duas dimensões. Em (A) é mostrado o que é chamado de nodo raiz. Em (B) a separação é feita, dividindo em dois nodos filhos. O processo continua em (C), onde é mostrado o que é um *bounding box*, e em (D).

A grande vantagem deste método é, como dito, o aumento da eficiência em buscas espaciais. Um exemplo é mostrado na Fig C.1 Considere uma busca espacial onde se procura os pontos que estão dentro de um região de raio r , de centro em um ponto q . A busca com a árvores KD é feita utilizando a hierarquia apresentada. Se a distancia entre o ponto que q e o bounding box de um nodo é maior que r , então o

nodo, e todos o pontos dentro dele, é desprezado. A busca continua recursivamente até que se obtêm apenas os nodos folha que contem pontos que podem estar nesta região. Assim reduzindo exponencialmente o numero de cálculos de distancia entre os pontos.

Recursive kd-tree range search
Input: Current tree node **T**, query point **q**, radius r
Output: A list of matching points **Z**

1. IF **q** is within r of node **T**'s bounding box:
2. IF **T** is a leaf node:
3. FOR each data point **x** owned by node **T**:
4. IF **q** is within r of **x**:
5. Add **x** to **Z**.
6. ELSE:
7. Recursively search using each **T**'s children nodes in place of **T**.
8. Return **Z**.

Fig.C.2 - Algoritmo mostrando uma busca espacial recursiva utilizando arvores KD.

O exemplo mostrado acima é de uma arvore bidimensional, como é o caso utilizado na formação de tracklets, no capítulo 4, e no fieldLim, no capítulo 3. Entretanto a estrutura pode ser estendida para k dimensões, como é o caso da formação de tracks, de 4 dimenções, também no capítulo 4.

Referências Bibliográficas

- [AM80] W. Alvarez F. Asaro Alvarez, L.W. and H.V. Michel. Extraterrestrial cause for the cretaceous-tertiary boundary extinction. *Science*, 208: 1095–1108, 1980.
- [AM02] Ch. Froeschlé P. Michel A. Morbidelli, W. Bottke. Origin and evolution of near-earth objects. *Asteroids III*, pages 409–422, 2002.
- [Bot02] et al Bottke. Debaised orbital and magnitude distribution of the near-earth objects. *Icarus*, 156: 399–433, 2002.
- [Cha04] C. Chapman. The hazard of near-earth asteroid impacts on earth. *Earth and Planetary Science Letters*, 222: 1–15, 2004.
- [DR94] E. Shoemaker K. Muinonen D. Rabinowitz, E. Bowell. The population of earth-crossing asteroids. *Hazards due to comets and asteroids*, page 285, 1994.
- [Geh79a] T. Gehrels. The asteroids: History, surveys, techniques, and future work. *Asteroids*, pages 3–24, 1979.
- [Geh79b] T. Gehrels. The asteroids: history, surveys, techniques and future work. *Asteroids*, pages 3–25, 1979.
- [HS02] Jenifer B H. Stokes. Near-earth asteroid search programs. *Asteroids III*, pages 45–54, 2002.
- [JK07] T. Grav J. Heasley R. Jedicke J. Masiero A. Milani A. Moore D. Tholen R. Wainscoat J. Kubica, L. Denneau. Efficient intra- and inter-night linking of asteroid detections using kd-trees. *Icarus*, 189: 151–168, 2007.
- [JM09] T. Axelrod J. Myers, L. Jones. Moving object pipeline system design. 2009.
- [JT02] N. Kaiser B. Burke G. Jacoby J. Tonry, G. Luppino. *Experimental Astronomy*, pages 14–17, 2002.
- [Mar79] B. Marsden. The work of the minor planet center. *Asteroids*, pages 77–83, 1979.
- [MG09] D. Oszkiewicz K. Muinonen M. Granvik, J. Virtanen J. Openorb: Open-source asteroid orbit computation software including statistical ranging. *Meteoritics and Planetary Science*, 44: 1853–1861, 2009.

- [Mil99] A. Milani. The asteroid identification problem. i. recovery of lost asteroids. *Icarus*, 137: 269–292, 1999.
- [Mil09] A. Milani. *Theory of Orbit Determination*. 2009.
- [Mui93] Bowell Muinonen. Asteroid orbit determination using bayesian probabilities. *Icarus*, 104: 255–279, 1993.
- [PA93] et. al P. Abgrall. Bode’s law and the discovery of ceres. 183, 1993.
- [Pea01] W. Pearson. *Introduction to Practical Astronomy*, 2: 413–417, 2001.
- [PF94] et. al P. Farinella. 1994.
- [RJC06] N. Kaiser R. Jedike, E.A Magnier and K. C. Chambers. The next decade of solar system discovery with pan-starrs. *Proceedings IAU Symposium*, 236, 2006.
- [RM86] J. Frecker T. Gehrels M. Perry R. McMillan, J. Scotti. Use of a scanning ccd to discriminate asteroid images moving in a field of stars. *Instrumentation in astronomy*, pages 141–157, 1986.
- [TG11] et. al T. Grav. The pan-starrs synthetic solar system model: A tool for testing and efficiency determination of the moving object processing system. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 123(902): 423–447, 2011.
- [ZI08] et al. Z. Ivezi, J.A. Tyson. Lsst: from science drivers to reference design and anticipated data products. *ARXIV*, 2008.