

Astrometria - Projeto 1

Determinando a Distância do Aglomerado Aberto NGC 1662 com Inferência Bayesiana

André Almeida Trovello¹
26 de setembro de 2025

Resumo

A determinação de distâncias de aglomerados estelares é crucial para calibrar a escala de distância cósmica, exigindo metodologias que lidem com sistemáticas como a correlação espacial das paralaxes do Gaia DR3. Este trabalho teve como objetivo determinar a distância do aglomerado aberto NGC 1662 utilizando a Inferência Bayesiana hierárquica implementada no código Kalkayotl (OLIVARES et al., 2020), avaliando o desempenho de diferentes priors em amostras de dados variadas.

A aplicação demonstrou a robustez do Kalkayotl, mas revelou a sensibilidade do Prior Uniforme à presença de outliers, que se mostrou estatisticamente incompatível, dentro de um intervalo de confiança de 2σ , com a amostra filtrada (A_{cut}). Em contraste, os priors Gaussiano, EFF e King apresentaram forte estabilidade e compatibilidade entre as amostras, estabelecendo-se como os mais adequados. O prior Gaussiano, especificamente, forneceu a estimativa final de $411,4^{+2.0}_{-2.0}$ pc.

A comparação com a literatura mostrou compatibilidade com o catálogo de Dias et al. (2021), mas uma incompatibilidade estatística significativa com a distância de alta precisão de Hunt et al. (2024), que pode estar atrelada a incertezas subestimadas em seu catálogo. Conclui-se que o Kalkayotl é uma ferramenta rigorosa que quantifica a sistemática não corrigida, garantindo que suas incertezas não são subestimadas.

1 Introdução

A determinação de distâncias é uma questão relevante na astronomia contemporânea. Em especial, a determinação de distâncias de aglomerados estelares se mostra primordial para refinar modelos de formação e evolução estelar, visto que o cálculo dessa grandeza possibilita a conversão de valores aparentes de magnitudes em absolutos, viabilizando a obtenção acurada de parâmetros como idade e massa das estrelas que compõem o aglomerado.

¹ andretrovello@usp.br

Tradicionalmente, a distância destes aglomerados é calculada pela inversão das paralaxes observadas em seus membros, porém, este método se mostra altamente sujeito a erros aleatórios quando são estudados aglomerados mais distantes, já que nestas ocasiões o erro da paralaxe pode apresentar mesma ordem de grandeza que a própria paralaxe em si.

No contexto deste problema, a missão espacial Gaia (Gaia Collaboration et al., 2016) contribuiu significativamente, fornecendo paralaxes de alta precisão de aglomerados e estrelas. Como toda medida experimental, os dados da Gaia possuem um erro associado, sendo este uma combinação de três fatores principais: erros aleatórios (a incerteza estatística individual de cada fonte), erros sistemáticos (oriundos de fatores como posição, cor e magnitude da estrela, que afetam estrelas próximas no céu de maneira semelhante) e o zero point (um offset de medição sistemático associado ao próprio instrumento Gaia).

Em decorrência da propagação não linear das incertezas da paralaxe, técnicas como a Inferência Bayesiana se mostram como boas alternativas para contornar essa questão, possibilitando calcular a distribuição de probabilidade posterior das distâncias de aglomerados, incorporando a verossimilhança dos dados observados e o conhecimento prévio através dos priors.

Baseado nessa técnica, o código Kalkayotl (OLIVARES et al., 2020) foi desenvolvido utilizando um framework bayesiano hierárquico para inferir simultaneamente os parâmetros da população e as distâncias individuais das estrelas. Sua abordagem tem a vantagem de tratar as correlações espaciais das paralaxes, provendo estimativas confiáveis de distância e incertezas não subestimadas.

Este projeto teve como objetivo determinar a distância de um aglomerado aberto por meio do código Kalkayotl 1.0, comparando seus resultados com os publicados na literatura, de forma a visualizar a eficácia do método bayesiano quando confrontado com outras estimativas, e compreender quais priors se adequam melhor ao aglomerado em questão.

1.1 Aquisição de Dados e Seleção do Aglomerado

Os dados de aglomerados foram obtidos a partir do catálogo de Emily L. Hunt (HUNT; REFFERT, 2024), que através das medições do Gaia DR3 (VALLENARI et al., 2023), fez um estudo de 6956 aglomerados classificados por trabalhos prévios e verificou a ligação gravitacional de suas estrelas membros, concluindo que apenas 5647 (79%) deles podem ser considerados abertos, fornecendo também estimativas de distâncias para estes corpos celestes.

Definido o método e o catálogo analisado, fez-se necessária a determinação de um aglomerado para estudo. Para evitar dificuldades no cálculo da distância, utilizou-se como critério de seleção a proximidade do aglomerado ($< 500\text{pc}$) e a quantidade de

estrelas membros (> 200). Dessa forma, foi escolhido o aglomerado NGC 1662 (Figura 1), composto por 384 estrelas e a $(404, 59 \pm 0, 28)$ parsecs de distância, segundo o catálogo de Hunt.



Figura 1 – Aglomerado NGC 1662.

1.2 Revisão da Literatura e Metodologias de Distância

A estimativa de distância do aglomerado NGC 1662 foi contextualizada e comparada com quatro catálogos notáveis (Tabela 1), que ilustram a evolução das metodologias na astrometria galáctica: um catálogo pré-Gaia (DIAS et al., 2002), dois trabalhos do Gaia DR2 com diferentes abordagens (CANTAT-GAUDIN et al., 2020; DIAS et al., 2021) e um catálogo moderno do Gaia DR3 (HUNT; REFFERT, 2024).

Na primeira abordagem, o catálogo DIAS et al., (2002) realizou uma compilação de valores de distância da literatura calculados pelo ajuste da sequência principal fotométrica no Diagrama Cor-Magnitude (CDM) e, no caso de aglomerados próximos, pela inversão da média das paralaxes calculadas pelo satélite Hipparcos (ESA, 1997). Para NGC 1662, foi estimada uma distância de 437 parsecs, utilizando o método fotométrico. Dado que utilizou de dados de baixa precisão de missões antigas, este método não apresentou incerteza em sua medida.

Com a precisão do Gaia DR2 (Gaia Collaboration et al., 2018), surgiram métodos mais robustos de determinação de parâmetros, embora com diferentes estratégias para o tratamento de erros. CANTAT-GAUDIN et al., (2020) utiliza de um modelo de Inferência Bayesiana Hierárquica para inferir a distribuição de probabilidade das paralaxes dos membros de aglomerados, de onde a distância final é obtida por meio da mediana da distribuição de probabilidade *a posteriori*. Embora tenha sido validado, as incertezas finais deste método não foram fornecidas no catálogo, limitando a avaliação de confiabilidade do valor de 428 parsecs obtido para NGC 1662.

Por sua vez, (DIAS et al., 2021) realizou o cálculo de distâncias por meio do ajuste de isócronas (*isochrone fitting*) ao CDM, empregando o algoritmo de entropia cruzada para determinar parâmetros como a distância, idade, extinção e metalicidade. O método incluiu a aplicação de priors e utilizou reamostragem Monte-Carlo (*bootstrapping*) para a determinação das incertezas, obtendo assim um valor de (410 ± 3) parsecs para NGC 1662.

Com o advento do Gaia DR3, o aumento na precisão astrométrica permitiu a HUNT; REFFERT,.(2024) calcular distâncias novamente por ajuste de isócronas ao CDM. Entretanto, o método foi aprimorado com um estudo estatístico que visa o máximo rigor. A identificação de membros do aglomerado é feita pelo algoritmo HDBSCAN (Hierarchical Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise - CAMPELLO; MOULAVI; SANDER 2013), e a distância final é o resultado de um processo de inferência probabilística de parâmetros. Por ser um método estatístico avançado e de natureza bayesiana em seus resultados, o catálogo fornece a distância como a mediana (50º percentil) da distribuição de probabilidade, acompanhada dos limites do intervalo de confiança (16º e 84º percentis), resultando em nosso último valor de comparação para NGC 1662 de $(404,60 \pm 0,28)$ parsecs.

Tabela 1 – Comparativo das estimativas de distância para NGC 1662 e suas incertezas (quando calculadas).

Autor (Ano)	Distância (d) [pc]
Hunt et al. (2024)	$404,60^{+0,28}_{-0,28}$
Dias et al. (2021)	410^{+3}_{-3}
Cantat-Gaudin et al. (2020)	428
Dias et al. (2002)	437

1.3 Seleção da Amostra

O estudo de distância do aglomerado NGC 1662 no Kalkayotl foi feito com duas amostras distintas. A primeira, denominada amostra completa (A_{full}), incluiu todas as

384 estrelas fornecidas inicialmente pelo catálogo de Hunt.

Entretanto, para descartar a presença de *outliers* que pudessem enviesar o resultado, realizou-se uma segunda seleção (A_{cut}), onde foram removidas estrelas que estivessem a uma distância de 2σ da mediana do conjunto de dados (Figura 2). Esta filtragem resultou em uma amostra final de 360 estrelas, que foi então utilizada para o cálculo da distância do aglomerado no Kalkayotl.

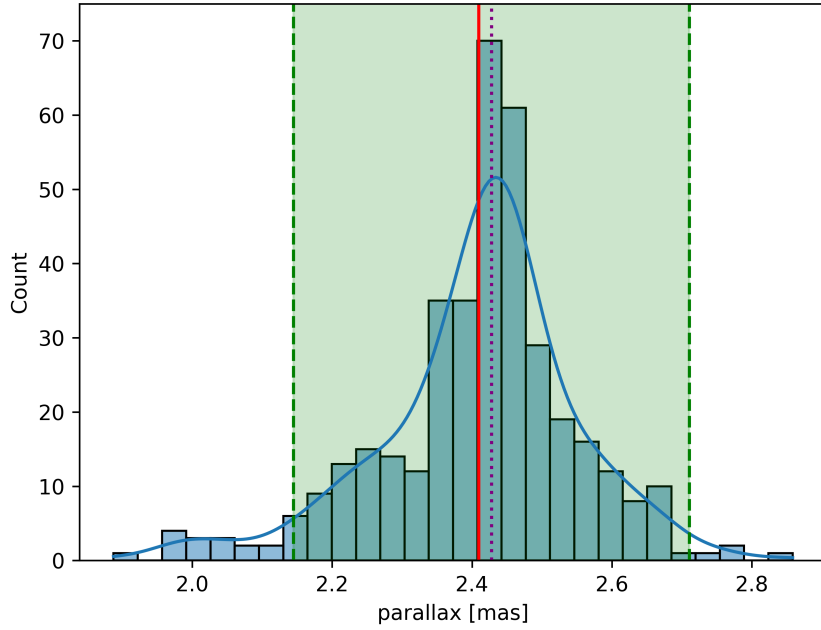


Figura 2 – Distribuição dos valores de paralaxe para o aglomerado NGC 1662, bem como a seleção amostral (área verde clara) para 2σ (95%) da mediana (linha pontilhada roxa). Foi escolhida a mediana em detrimento da média (linha vermelha) devido à primeira se aproximar melhor da Estimativa de Densidade de Kernel (KDE, curva verde escura).

1.4 Priors

A determinação do prior (conhecimento prévio sobre o parâmetro de interesse) é fundamental quando são utilizados métodos de Inferência Bayesiana, visto que garante não apenas a acurácia do modelo, como também a estabilidade da Cadeia MCMC (Markov Chain Monte Carlo), que é o algoritmo central do código Kalkayotl.

A MCMC é uma técnica que permite a obtenção da complexa distribuição de probabilidade posterior dos parâmetros do aglomerado. Ela se baseia na Propriedade de Markov, que estabelece que a probabilidade de a cadeia se mover para o próximo estado depende única e exclusivamente de seu estado atual, e não de sua trajetória anterior. Isso implica

que a distribuição de amostragem converge para um estado estacionário, que é a própria distribuição posterior desejada.

No caso do Kalkayotl, a MCMC utiliza de uma amostragem Hamiltonian Monte Carlo (HMC), que utiliza do gradiente da função de verossimilhança para guiar seus próximos passos. Essa técnica possibilita iterações mais informadas, evitando que a cadeia flutue descontroladamente, garantindo a estabilidade do modelo.

O código Kalkayotl apresenta dois tipos de priors: estatísticos e astrofísicos.

Priors estatísticos são aqueles baseados apenas em distribuições matemáticas simples para a densidade de estrelas do aglomerado. Estes modelos são mais simples, apresentando poucos parâmetros livres, a distância do centro do aglomerado (*loc*) e seu tamanho ao longo da linha de visada (*scl*). Os três priors estatísticos presentes no código estão descritos abaixo.

Uniforme: prior mais simples, que atribui a mesma densidade de probabilidade para todos os valores no intervalo $[loc - scl, loc + scl]$

Gaussian: assume que a distância é uma distribuição normal com média (*loc*) e desvio padrão (*scl*).

Gaussian Mixture Model: GMM é um prior descrito como a combinação linear de k distribuições Gaussianas, sendo $k > 0$. Para os estudos deste projeto, $k = 2$.

Por outro lado, priors astrofísicos são baseados em modelos físicos ou empíricos de estrutura de aglomerados. Apresentam maior complexidade, tendo parâmetros adicionais, além de *loc* e *scl*.

A descrição dos priors astrofísicos presentes no Kalkayotl é feita a seguir.

Elson Fall and Freeman: EFF é um prior que distribui as distâncias da mesma maneira que (ELSON; FALL; FREEMAN, 1987) distribui a densidade de luminosidade superficial em aglomerados da Grande Nuvem de Magalhães. Além da distância e tamanho do aglomerado, também é adicionado um parâmetro γ que descreve o declive da distribuição em raios grandes.

King: descreve a distribuição de distâncias da mesma forma que (KING, 1962) descreve a distribuição espacial de aglomerados globulares. Além de *loc* e *scl*, inclui também a máxima extensão do aglomerado, por meio do raio de maré (r_t)

Exponentially Decreasing Space Density Prior: introduzido por (BAILER-JONES, 2015), o EDSD é um prior galáctico projetado para inferir distâncias a estrelas de campo de toda a Galáxia. Dessa forma, no contexto de um único aglomerado estelar ele não é preciso para inferir distâncias, não sendo portanto utilizado neste projeto. Seu único parâmetro (*scl*) refere-se ao comprimento típico do decaimento exponencial.

1.5 Definição de Parâmetros

Para rodar o código Kalkayotl e fazer a análise de inferência, foram definidos alguns parâmetros que garantem a acurácia e a confiabilidade dos resultados, pensando sempre no funcionamento correto da Inferência Bayesiana.

No modelo, reportou-se a *Moda* (*Mode*) da distribuição de probabilidade posterior como a distância central do aglomerado. Essa escolha é estatisticamente mais correta do que usar a média, pois a relação não-linear entre paralaxe e distância cria uma distribuição assimétrica. Com o uso da Moda, garantimos que o valor reportado seja, de fato, a distância mais provável (o pico da distribuição).

Além disso, *Parametrização Central* foi utilizada no modelo hierárquico. Como o NGC 1662 é um aglomerado próximo (~ 400 pc) e bem populado ($N = 384$), o nosso conjunto de dados é altamente restritivo. Neste caso, a parametrização central é a mais eficiente, pois evita as correlações complexas que a parametrização não-central visa resolver em aglomerados mais distantes e com dados mais limitados.

Por fim, definiu-se incerteza dos parâmetros pelo intervalo de confiança de 68%, o que equivale a aproximadamente 1σ em uma distribuição normal, com o objetivo de obter uma boa estimativa de incerteza. Além disso, foi determinado como $-0,021mas$ o valor de zero point para o Gaia DR3 (GROENEWEGEN, 2021).

Descrito o método, as ferramentas, os dados e o funcionamento do código, seguem, na seção seguinte, os resultados obtidos ao longo deste projeto para o aglomerado aberto NGC 1662.

2 Resultados e Análise

Como saída, o Kalkayotl forneceu a densidade de probabilidade das distâncias de estrelas individuais e do aglomerado em si, bem como as iterações das cadeias de Markov em cada caso, retornando resultados como os apresentados na Figura 3.

Obtidas as curvas apresentadas acima, foi necessária a avaliação dos resultados para estudar a qualidade do prior quando aplicado ao aglomerado em questão. Esse processo foi feito inicialmente pela análise da convergência da Cadeia MCMC. Na maioria dos priors, tanto para A_{full} quanto para A_{cut} , a convergência foi estável, sem apresentar qualquer tendência de subida ou descida e com um comportamento muito semelhante entre as cadeias. Entretanto, foram notadas discrepâncias nos resultados do prior GMM da amostra A_{full} (Figura 4), onde as cadeias convergiram para valores distintos e não houve sobreposição das distribuições de probabilidade.

Essa falha de convergência se dá pela própria definição do prior GMM como sendo uma mistura de distribuições Gaussianas, o que implica que um aglomerado que se adapte bem a este modelo apresenta subestruturas em sua composição ou possui amostra muito

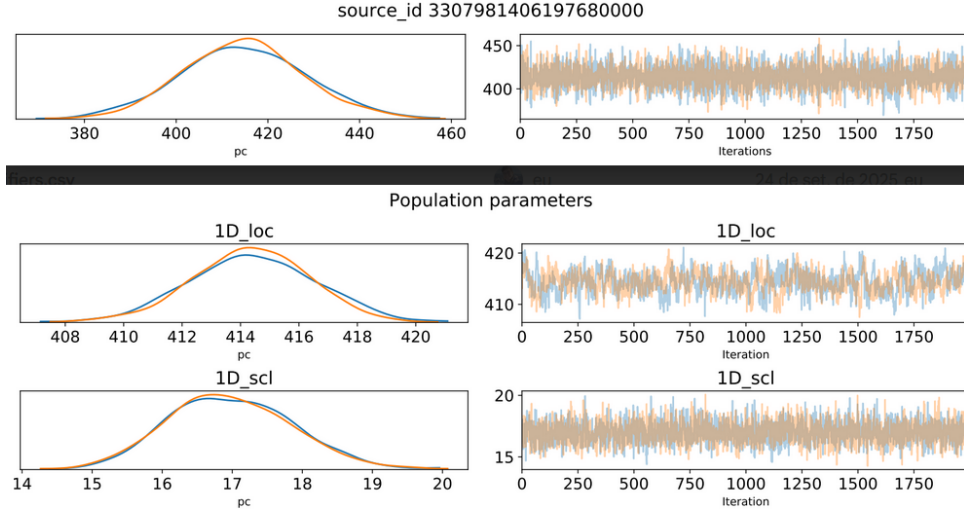


Figura 3 – Resultados da amostra completa (A_{full}) do aglomerado NGC 1662, divididos entre distribuição de probabilidade das distâncias (esquerda) e iterações das cadeias de Markov (direita). A primeira linha apresenta resultados individuais de uma estrela, enquanto as demais referem-se ao aglomerado completo. Prior Gaussiano adotado.

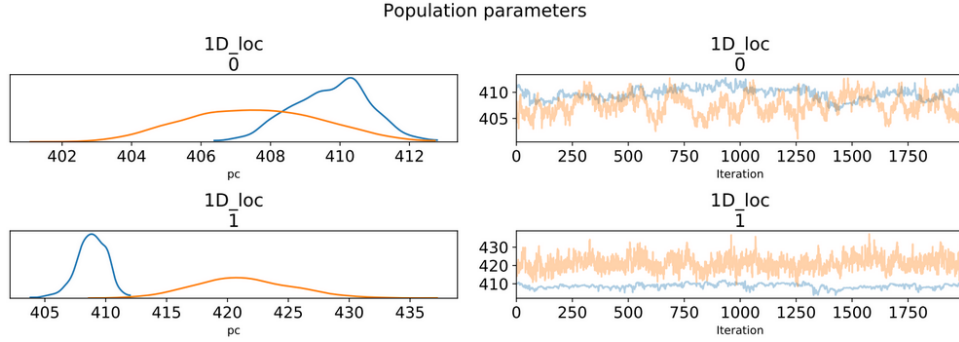


Figura 4 – Resultados dos parâmetros do aglomerado para a amostra A_{full} para o prior GMM

bem definida. O resultado do GMM permite, portanto, inferir uma morfologia simples para o NGC 1662, que não possui as subestruturas necessárias para estabilizar um modelo tão complexo.

Entretanto, um fenômeno interessante é observado quando se aplica o mesmo prior para a amostra selecionada A_{cut} (Figura 5). Neste caso, a divergência da MCMC torna-se inexistente e ambas as cadeias se estabilizam em torno dos mesmos valores, havendo também sobreposição das densidades de probabilidade.

Hipotetizando sobre a possível causa destas observações, concluiu-se que a seleção da amostra promoveu a exclusão de valores considerados ruidosos e de estrelas de cauda, centrando os dados em torno de uma região mais central do aglomerado, forçando a distribuição das paralaxes a ser mais simétrica e próxima de uma Gaussiana pura. Essa remoção dos ruídos facilita que o prior GMM identifique que o aglomerado se encaixe e

uma ou duas subestruturas, estabilizando a convergência.

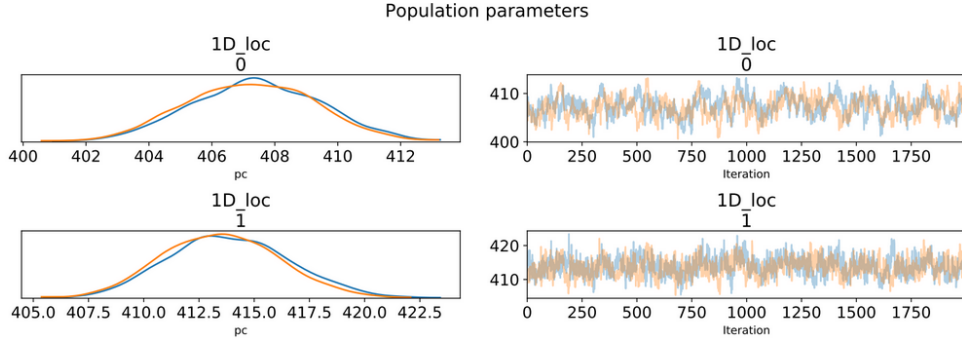


Figura 5 – Resultados dos parâmetros do aglomerado para a amostra A_{cut} para o prior GMM

Outro resultado interessante foi obtido quando avaliado o prior Uniforme (Figura 6). Apesar de apresentar distribuições de probabilidade com pico estreito e bem definido para o aglomerado, este método também provocou uma distribuição ampla e achatada para as estrelas individuais. Esta discrepância é explicada justamente pelo fato deste ser o prior menos informativo de todos, não impondo uma tendência de agrupamento forte no centro. Isso permite que as estrelas se distribuam igualmente ao longo do aglomerado, apresentando uma incerteza individual grande. Por outro lado, esta distribuição não se repete quando estudado o aglomerado como um todo, pois o conjunto de 384 estrelas proporciona uma verossimilhança forte e os erros aleatórios de cada estrela são anulados, proporcionando uma distribuição de pico bem definido.

Comparando-se os resultados da amostra A_{full} , nota-se que houve similaridade considerável entre os resultados, de modo que tanto as distribuições de probabilidade (Figura 7) quanto os valores de distâncias calculadas para cada prior foram semelhantes. Com exceção do caso GMM, também aparentou haver semelhança quando equiparadas as amostras A_{full} e A_{cut} . Para confirmar se os priors destas amostras eram de fato compatíveis, foi realizado um Teste-Z com intervalo de confiança 2σ , de maneira que verificou-se que apenas o prior Uniforme não foi estatisticamente compatível (Tabela 2), evidenciando sua sensibilidade extrema a possíveis outliers.

É importante notar que, embora os Testes-Z calculados assumam a independência entre as amostras, isso é uma simplificação conservadora. Dado que a amostra selecionada é um subconjunto da amostra completa, as distâncias são positivamente correlacionadas. A inclusão do termo de covariância apenas aumentaria o valor de Z para todos os priors, reforçando ainda mais a incompatibilidade estatística do Prior Uniforme, enquanto para os outros esse acréscimo provavelmente não seria tão relevante, devido aos já muito baixos valores de Teste-Z obtidos nestes casos.

Analizada a compatibilidade entre amostras, o último passo foi a comparação entre resultados do Kalkayotl com estimativas de distância da literatura. Dado que três dos

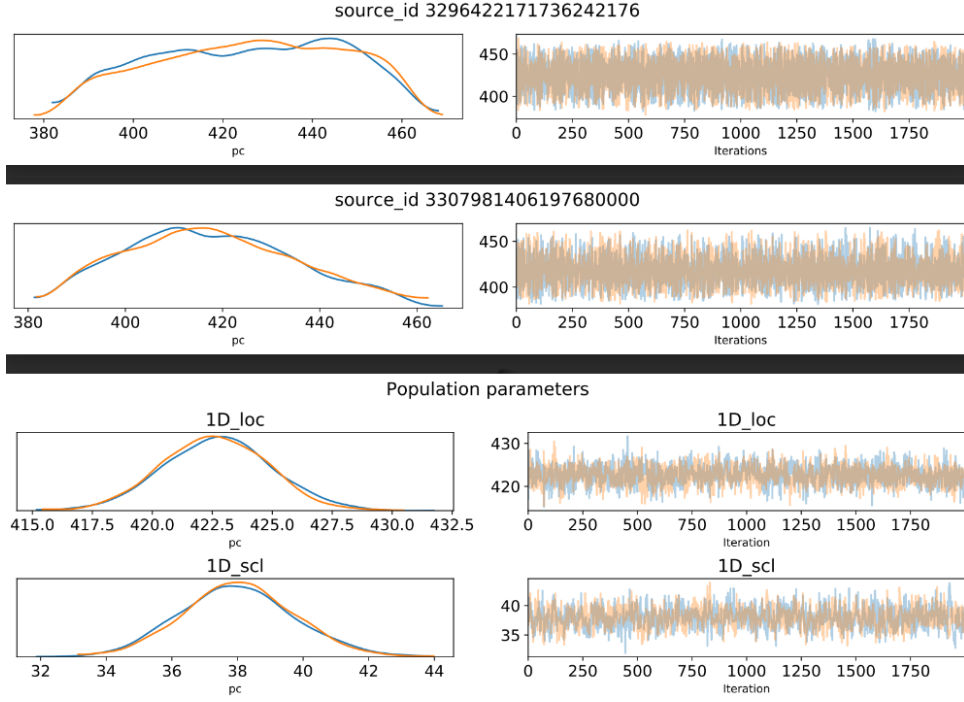


Figura 6 – Resultados da amostra A_{full} para o prior Uniforme

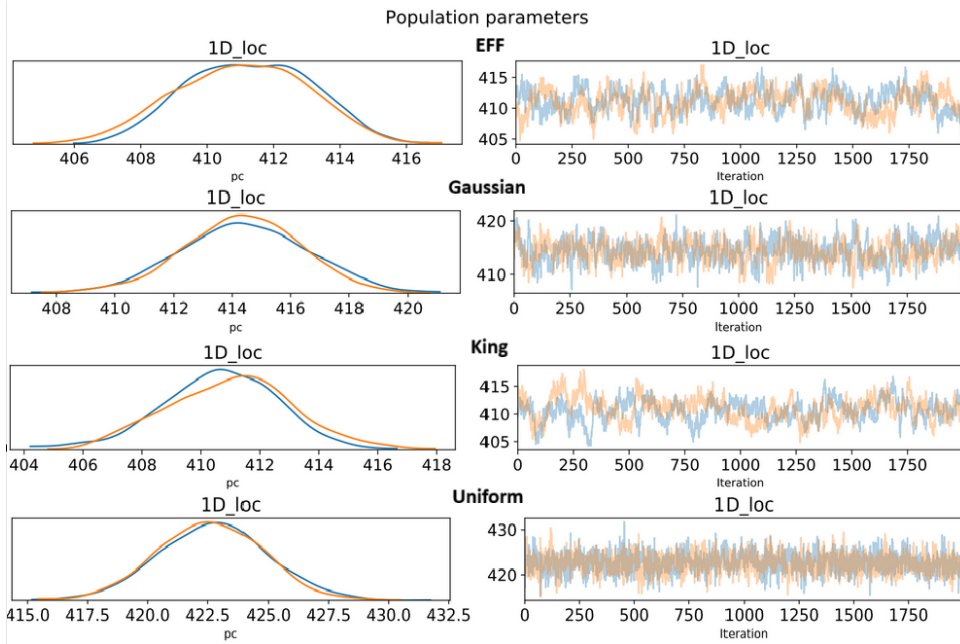


Figura 7 – Resultados da amostra A_{full} para os priors EFF, Gaussiano, King e Uniforme.

quatro priors se mostraram compatíveis amostralmente, utilizou-se apenas a amostra selecionada A_{cut} para esta etapa. Devido à ausência de incertezas nos resultados fornecidos por (CANTAT-GAUDIN et al., 2020) e (DIAS et al., 2002), estes foram comparados apenas de maneira quantitativa aos resultados do Kalkayotl, de modo que o primeiro se mostrou muito próximo do obtido, enquanto o segundo apresentou uma disparidade

Tabela 2 – Análise de Estabilidade (Teste-Z): Compatibilidade das Distâncias entre as Amostras A_{full} e A_{cut} para os 4 diferentes priors analisados.

Prior	$A_{\text{full}}[pc]$	$A_{\text{cut}} [pc]$	Teste-Z	Compatíveis ($Z < 2$)
EFF	$410, 9^{+1,9}_{-1,7}$	$410, 1^{+2,1}_{-2,05}$	0, 28	Sim
Gaussiano	$414, 1^{+2,1}_{-2,0}$	$411, 4^{+2,0}_{-2,0}$	0, 95	Sim
King	$410, 9^{+2,0}_{-2,2}$	$409, 9^{+2,0}_{-2,2}$	0, 34	Sim
Uniforme	$422, 6^{+2,2}_{-2,1}$	$413, 8^{+2,0}_{-1,9}$	3, 06	Não

grande, justificada pela imprecisão das medidas efetuadas pelo Hipparcus quando comparado ao Gaia e à utilização do método da inversão da paralaxe. Com relação às estimativas de (DIAS et al., 2021) e (HUNT; REFFERT, 2024), foi realizado novamente o Teste-Z para um intervalo de confiança de 2σ (Tabela 3).

Tabela 3 – Comparação Final dos Priors com a amostra selecionada (A_{cut}) e Teste-Z (2σ) com os valores da literatura.

Prior	$A_{\text{cut}} [pc]$	$Z_{\text{Dias-A}_{\text{cut}}}$	Comp. Dias	$Z_{\text{Hunt-A}_{\text{cut}}}$	Comp. Hunt
EFF	$410, 10^{+2,05}_{-2,05}$	0, 03	Sim	2, 66	Não
Gaussiano	$411, 40^{+1,95}_{-2,00}$	0, 39	Sim	3, 40	Não
King	$409, 90^{+1,95}_{-2,15}$	0, 03	Sim	2, 56	Não
Uniforme	$413, 80^{+2,00}_{-1,90}$	1, 06	Sim	4, 67	Não

Nota-se que houve compatibilidade de todos os priors com o catálogo de (DIAS et al., 2021), enquanto que (HUNT; REFFERT, 2024) não concordou com nenhum dos valores obtidos. Essa divergência pode estar associada ao valor baixo da incerteza obtida por Hunt, podendo esta estar subestimada.

Conclui-se por meio deste projeto que os priors mais úteis para o estudo da distância do aglomerado NGC 1662 foram EFF, Gaussiano e King, dado que todos apresentaram distribuição de probabilidade bem definida e suas cadeias de Markov convergiram para valores estáveis. Além disso, todos se mostraram compatíveis quando comparadas entre si as amostras A_{full} e A_{cut} , bem como quando equiparados ao catálogo de (DIAS et al., 2021), mostrando resultados sólidos. Portanto, dada a robustez interna, os priors EFF, Gaussiano e King são os mais úteis para a determinação das distâncias de aglomerados próximos ($< 500pc$) e bem populados (> 200 membros). Devido à sua simplicidade e acurácia, o prior Gaussiano e sua estimativa de distância de $411, 4^{+2,0}_{-2,0}$ foram adotados pelo autor deste projeto como os mais úteis para a ocasião. Os resultados obtidos por estas famílias são estatisticamente compatíveis com a estimativa de ajuste de isócronas

de Dias et al. (2021), demonstrando a consistência do método Kalkayotl com a literatura do Gaia DR2.

3 Conclusão

A determinação precisa de distâncias de aglomerados estelares é um dos pilares da Astronomia Galáctica, sendo fundamental para calibrar a Escala de Distância Cósmica. O desafio de obter incertezas robustas, especialmente por conta das sistemáticas como a correlação espacial das paralaxes, foi o ponto central deste projeto. Para superar isso, empregamos o framework inovador de Inferência Bayesiana hierárquica do código Kalkayotl (OLIVARES et al., 2020).

Aplicado a diferentes tipos de priors, Kalkayotl se mostrou preciso para o aglomerado NGC 1662, tanto em sua amostra completa A_{full} quanto na selecionada A_{cut} , proporcionando medidas robustas de distribuição de probabilidade de distâncias e iterações MCMC, de modo que, por meio da análise dos resultados, foi possível determinar a qualidade de cada prior na realização desta tarefa.

Foi evidenciado que, para amostras ruidosas, sem seleção, o prior GMM resulta em estimativas ruins de distância, visto que acaba sendo contaminado por outliers. Entretanto, quando aplicado a amostras filtradas, apresenta bom desempenho, entregando resultados similares a valores da literatura. Dado que este valor não possuía contrapartida na amostra completa, foi decidido não utilizar a estimativa de distância de A_{cut} nas outras análises do projeto.

Notou-se também que o prior Uniforme apresenta uma distribuição muito esparsa dos valores de distância de estrelas individuais, visto que assume uma distribui-se equivalentemente em todos os pontos do aglomerado, porém desempenha bem quando considerada a distância do aglomerado como um todo, visto que as incertezas aleatórias do alto número de membros acabam se cancelando e proporcionando uma distribuição mais bem definida.

Quando estudadas as duas amostras, verificou-se compatibilidade para um intervalo de confiança de 2σ para os priors EFF, Gaussiano e King, mostrando fortes argumentos sobre a estrutura mais simples de NGC 1662, enquanto o Uniforme se mostrou incompatível, enfatizando sua alta sensibilidade a conjuntos de dados ruidosos.

Por fim, na comparação com a literatura, resultados de teste-Z para a amostra A_{cut} mostraram compatibilidade com os resultados catalogados por (DIAS et al., 2021), porém não concordaram com a distância de NGC 1662 fornecida por (HUNT; REFFERT, 2024), divergência que pode estar atrelada a incertezas subestimadas pela autora deste catálogo.

Portanto, os priors estáveis são os mais adequados para o estudo de aglomerados próximos. O resultado final do Kalkayotl, utilizando o prior Gaussiano da amostra sele-

cionada, forneceu a distância de $411,4^{+2.0}_{-2.0}$ parsecs, sendo este o prior considerado o mais útil para os fins deste projeto.

References

- BAILER-JONES, C. A. L. Estimating Distances from Parallaxes. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, v. 127, p. 994, out. 2015. ISSN 0004-6280. ADS Bibcode: 2015PASP..127..994B. Disponível em: <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2015PASP..127..994B>>.
- CAMPELLO, R. J. G. B.; MOULAVI, D.; SANDER, J. Density-Based Clustering Based on Hierarchical Density Estimates. In: PEI, J. et al. (Ed.). *Advances in Knowledge Discovery and Data Mining*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013. p. 160–172. ISBN 978-3-642-37456-2.
- CANTAT-GAUDIN, T. et al. Painting a portrait of the Galactic disc with its stellar clusters. *Astronomy and Astrophysics*, v. 640, p. A1, ago. 2020. ISSN 0004-6361. ADS Bibcode: 2020A&A...640A...1C. Disponível em: <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020A&A...640A...1C>>.
- DIAS, W. S. et al. New catalogue of optically visible open clusters and candidates. *Astronomy and Astrophysics*, v. 389, p. 871–873, jul. 2002. ISSN 0004-6361. ADS Bibcode: 2002A&A...389..871D. Disponível em: <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2002A&A...389..871D>>.
- DIAS, W. S. et al. Updated parameters of 1743 open clusters based on Gaia DR2. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 504, p. 356–371, jun. 2021. ISSN 0035-8711. ADS Bibcode: 2021MNRAS.504..356D. Disponível em: <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2021MNRAS.504..356D>>.
- ELSON, R. A. W.; FALL, S. M.; FREEMAN, K. C. The Structure of Young Star Clusters in the Large Magellanic Cloud. *The Astrophysical Journal*, v. 323, p. 54, dez. 1987. ISSN 0004-637X. Publisher: IOP ADS Bibcode: 1987ApJ...323...54E. Disponível em: <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1987ApJ...323...54E>>.
- ESA. The HIPPARCOS and TYCHO catalogues. Astrometric and photometric star catalogues derived from the ESA HIPPARCOS Space Astrometry Mission. *ESA Special Publication*, v. 1200, jan. 1997. ISSN 1609-042X. ADS Bibcode: 1997ESASP1200.....E. Disponível em: <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1997ESASP1200.....E>>.
- Gaia Collaboration et al. Gaia Data Release 2. Summary of the contents and survey properties. *Astronomy and Astrophysics*, v. 616, p. A1, ago. 2018. ISSN 0004-6361. ADS Bibcode: 2018A&A...616A...1G. Disponível em: <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2018A&A...616A...1G>>.
- Gaia Collaboration et al. The Gaia mission. *Astronomy and Astrophysics*, v. 595, p. A1, nov. 2016. ISSN 0004-6361. ADS Bibcode: 2016A&A...595A...1G. Disponível em: <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2016A&A...595A...1G>>.

GROENEWEGEN, M. a. T. The parallax zero-point offset from Gaia EDR3 data. *A&A*, v. 654, p. A20, out. 2021. ISSN 0004-6361, 1432-0746. Publisher: EDP Sciences. Disponível em: <<https://www.aanda.org/articles/aa/abs/2021/10/aa40862-21/aa40862-21.html>>.

HUNT, E. L.; REFFERT, S. Improving the open cluster census. III. Using cluster masses, radii, and dynamics to create a cleaned open cluster catalogue. *Astronomy and Astrophysics*, v. 686, p. A42, jun. 2024. ISSN 0004-6361. Publisher: EDP ADS Bibcode: 2024A&A...686A..42H. Disponível em: <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2024A&A...686A..42H>>.

KING, I. The structure of star clusters. I. an empirical density law. *The Astronomical Journal*, v. 67, p. 471, out. 1962. ISSN 0004-6256. Publisher: IOP ADS Bibcode: 1962AJ.....67..471K. Disponível em: <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1962AJ.....67..471K>>.

OLIVARES, J. et al. Kalkayotl: A cluster distance inference code. *A&A*, v. 644, p. A7, dez. 2020. ISSN 0004-6361, 1432-0746. ArXiv:2010.00272 [astro-ph]. Disponível em: <<http://arxiv.org/abs/2010.00272>>.

VALLENARI, A. et al. Gaia Data Release 3 - Summary of the content and survey properties. *A&A*, v. 674, p. A1, jun. 2023. ISSN 0004-6361, 1432-0746. Publisher: EDP Sciences. Disponível em: <<https://www.aanda.org/articles/aa/abs/2023/06/aa43940-22/aa43940-22.html>>.