

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ABC**

**Projeto Dirigido**

Sérgio Enzo Matsuda Sampa

**Algoritmo de Determinação de Parâmetros Fractais  
Estruturais em Aglomerados de Estrelas Jovens**

Santo André

2018

Sérgio Enzo Matsuda Sampa

**Algoritmo de Determinação de Parâmetros  
Fractais Estruturais em Aglomerados de  
Estrelas Jovens**

Pesquisa de iniciação científica apresentada  
como projeto final da disciplina Projeto  
Dirigido da Universidade Federal do ABC.

Orientador: prof. Annibal Hetem Junior - CECS

Santo André

2018

## RESUMO

A primeira fase deste projeto foi focada na exploração do tema, estudo sobre os parâmetros envolvidos em nossa análise e o desenvolvimento das rotinas numéricas para o tratamento e estudo dos dados. Com o uso de algoritmos consolidados como quicksort e algoritmo de Elzinga-Hearn, desenvolvemos uma série de rotinas em C++ que organizaram e plotaram graficamente os dados de cada cluster para enfim obter o parâmetro fractal  $Q$  para cada um. Com o parâmetro  $Q$  em mãos, buscamos comparar os valores deles entre si e com os parâmetros do modelo de King obtidos em outro projeto. Esta parte do projeto teve sua conclusão na XLI Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Astronomia, onde foi apresentado um banner sobre os trabalhos desenvolvidos até então.

Até então havia alguns erros e melhorias a serem realizadas, apesar dos bons algoritmos. A continuação do projeto se deu com um novo método para atribuir pertinências às estrelas dos clusters e assim descobrir a massa e a idade dos clusters com algoritmos e métodos numéricos. Com o Data Release 2 do GAIA, pode-se obter mais informações e dados mais precisos dos clusters estudados, quando comparado aos dados do 2MASS, o que foi essencial para os resultados finais do presente trabalho.

Ao fim, obteve-se um software capaz de analisar os dados com precisão e exatidão, atingindo resultados coerentes com o esperado, validando assim os métodos utilizados. Pretende-se, posteriormente, redigir um artigo científico para ser publicado em uma revista nacional.

## SUMÁRIO

<b>Resumo.....</b>	<b>i</b>
<b>1-Introdução.....</b>	<b>5</b>
<b>1.1-Estatística fractal – o parâmetro Q.....</b>	<b>6</b>
<b>1.2- Fonte de Dados.....</b>	<b>9</b>
<b>1.2.1- GAIA.....</b>	<b>9</b>
<b>1.2.2- 2MASS.....</b>	<b>10</b>
<b>1.3- Presente Trabalho.....</b>	<b>10</b>
<b>1.3.1- Raio do core versus idade dos clusters.....</b>	<b>10</b>
<b>1.3.2- Crossing time.....</b>	<b>11</b>
<b>1.3.3- Evolução do cluster.....</b>	<b>11</b>
<b>2- Objetivos.....</b>	<b>12</b>
<b>3- Metodologia.....</b>	<b>13</b>
<b>4- Resultados e discussão.....</b>	<b>14</b>
<b>5- Conclusão.....</b>	<b>17</b>
<b>7- Referências.....</b>	<b>18</b>

## 1- Introdução

Quando se faz um levantamento das características e dimensões dos grupos de formação estelar, observa-se um amplo espectro de valores e qualidades (Lada & Lada 2003). Os agrupamentos de estrelas jovens podem ser encontrados tanto na forma de grandes agregados de estrelas jovens como concentrações compactas de protoestrelas embebidas em regiões de formação estelar. Levando-se em conta os modelos em voga e os processos de formação estelar (Elmegreen 2011), evidencia-se a necessidade de investigação sobre a natural conexão entre estas várias escalas de grupos e aglomerados. Muito provavelmente, todos os processos de formação estelar devem estar conectados, apesar das escalas envolvidas.

Em trabalhos anteriores (Gregorio-Hetem et al 2015, Fernandes et al. 2012), foi feita uma análise de uma grande amostra de aglomerados de estrelas jovens com o intuito de investigar as propriedades inerentes ao agrupamento e evolução dinâmica das componentes estelares. Nestes estudos, foi dada especial atenção ao parâmetro estatístico  $Q$  (Cartwright & Whitworth 2004), medido para os clusters, e suas eventuais correlações com a dimensão fractal estimada para as nuvens projetadas (Hetem & Lépine 1993). As conclusões destes trabalhos demonstram que mais de 50% das amostras apresentam subestruturas (ou subagrupamentos) que, uma vez analisados sob o ponto de vista estatístico e geométrico, apresentam a tendência de reproduzir simulações artificiais de distribuições de estrelas (Lomax, Whitworth & Cartwright 2011).

Um número crescente de publicações nos anos recentes vem demonstrar que este tema tem um grande interesse, tanto nos estudos de clusters na Galáxia como nas galáxias próximas (Davidge 2017). Como consequência, as ferramentas de análise fractal-estatísticas têm evoluído e permitindo novas interpretações e construção de modelos (Parker & Dale 2015, Alfaro et al. 2016, Jaffa et al. 2017).

A geometria fractal (ou caótica – não simplesmente aleatória) das relações das distribuições de tamanho e massa no gás interestelar tem sido avaliada por vários estudos (Hetem & Lépine 1993; Elmegreen & Falgarone 1996) e têm sido determinadas por levantamentos de imageamento de nuvens presentes na literatura. A busca por conexões entre a física e a geometria das nuvens também têm sido alvo de estudos mais aprofundados, como simulações hidrodinâmicas da formação de filamentos e protoestrelas apresentados por Girichidis et al. (2012). Estes autores levaram em conta

diferentes configurações iniciais visando avaliar as propriedades estatísticas dos aglomerados presentes nas fases iniciais de formação das estrelas. Contrariamente ao esperado, seus resultados demonstraram que um número maior de subestruturas é formado em perfis de densidade plana e modos compressivos, em desfavorecimento aos perfis centralmente concentrados.

### 1.1- Estatística fractal – o parâmetro Q

Técnicas de estatística fractal foram utilizadas na comparação dos parâmetros estruturais entre membros das amostras, o que resultou em uma significativa fração de clusters apresentando um perfil de densidade radial associado a uma correlação com índice positivo entre o parâmetro  $s$  (Gregorio-Hetem et al 2015) e a densidade estelar superficial média. Um comportamento semelhante ficou evidenciado na relação entre o raio do núcleo da amostra como função da idade do cluster, o que se encaixa numa distribuição semelhante em várias escalas, indo até aos valores observados em grupos estelares da Via Láctea e em galáxias próximas (Portegies Zwart 2010).

Nos estudos citados, foi utilizado o parâmetro  $Q$  como uma das principais medidas da geometria fractal. Trata-se de uma grandeza adimensional definida como  $Q = \bar{m}/\bar{s}$  (Cartwright & Whitworth 2004).

O parâmetro  $\bar{m}$  traz informações sobre comprimento da do segmento médio normalizado da *minimal spanning tree* (ou árvore de expansão mínima), relacionado à posição projetada da densidade superficial dos membros do conjunto, sendo definido como

$$\bar{m} = \frac{1}{(A_N N)^{1/2}} \sum_{i=1}^{N-1} m_i$$

onde  $N$  é o número de estrelas consideradas,  $m_i$  é o comprimento do segmento  $i$  da árvore de expansão mínima, e  $A_N$  é a área do menor círculo que contém os pontos projetados no plano do cluster. A árvore de expansão mínima é definida como a única rede de linhas retas que pode conectar um conjunto de pontos sem ciclos fechados, de tal forma que a soma de todos os comprimentos dessas linhas (ou arestas) é a menor possível. Um exemplo de uma árvore de abrangência mínima é apresentado na Figura 1. Para a

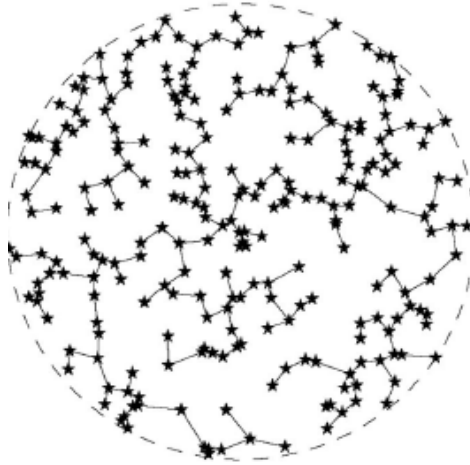
construção da árvore e obtenção do menor círculo, foram seguidos os algoritmos apresentados por Gower & Ross (1969).

O parâmetro  $\bar{s}$  representa a separação média dos pontos, sendo dado por

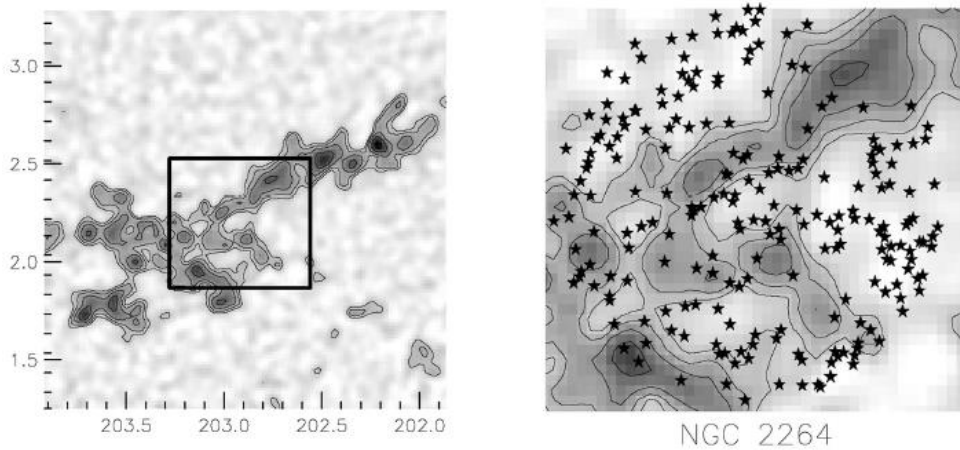
$$\bar{s} = \frac{2}{N(N-1)R_N} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=1+1}^N |\vec{r}_i - \vec{r}_j|$$

onde  $N$  é o número de estrelas contidas no cluster,  $R_N$  é o raio do menor círculo que contém as estrelas; e  $\vec{r}_i$  é a posição da estrela  $i$ .

**Figura 1** - Árvore de abrangência mínima e menor círculo calculados para o cluster NGC 2244 (Gregorio-Hetem et al. 2015). O resultado consiste na “árvore” cuja soma dos segmentos que ligam as estrelas é a menor possível.



**Figura 2** - À esquerda: Mapas de extinção visual ( $A_V$ ) (em coordenadas galácticas) da nuvem próxima de aglomerado NGC 2264. Os contornos representam níveis de  $A_V$  com  $S/N > 10$ . O retângulo central indica a posição do aglomerado. À direita: uma ampliação do mapa  $A_V$  com a distribuição espacial dos membros do cluster.



Estudos da estrutura hierárquica em clusters jovens (Walker et al. 2016) usaram o parâmetro  $Q$  para distinguir as distribuições fragmentadas das suaves. Comparando a estrutura física de um aglomerado com a geometria de sua potencial nuvem original pode fornecer importantes informações sobre a distribuição prévia de gás original da região formadora de estrelas e como a nuvem em questão pode ter evoluído durante a formação do aglomerado. A Figura 2 apresenta uma visão da possível nuvem original e o aglomerado formado em sobreposição.

Outra interessante conclusão está ligada à idade dinâmica dos clusters, que leva em conta as passagens de cada cluster por várias regiões da Galáxia e seu movimento orbital (Gieles & Portegies Zwart 2011). O parâmetro medido  $Q < 0,8$  indicou que 52% da amostra apresentava subestruturas. Os outros 48% têm  $Q > 0,8$ , o que pode ser interpretado como objetos centralmente concentrados. De acordo com Parker et al. (2014), uma conclusão importante que emerge dessa observação é que as regiões com  $Q < 0,8$  ou 1 devem ser dinamicamente jovens. Gregorio-Hetem et al. (2015) também estudou como a probabilidade de pertinência das estrelas ao cluster afeta os resultados. Quando se considera apenas os membros muito prováveis (probabilidade de adesão  $P > 50\%$ ), obtém-se uma correlação  $\bar{m} \times \bar{s}$  similar ao que se encontra na literatura para outros clusters da Galáxia.

Também foi verificado que a análise fractal utilizada para investigar a relação nuvem-cluster pode ser muito útil para restringir o cenário de formação do cluster (Walker et al. 2016). Pode-se dizer que objetivo principal de uma análise da relação nuvem-cluster é a comparação da estrutura física do cluster com sua nuvem parental. A interpretação desta relação pode contribuir com informações sobre a distribuição original do gás da



nuvem formadora e como a nuvem particular pode ter evoluído desde as estrelas do cluster foram formadas.

Foram utilizadas as técnicas de medida da dimensão fractal das nuvens,  $D_2$ , apresentadas por Hetem & Lépine (1993), e estes resultados comparados com as medidas de  $Q$ . Apesar de altamente especulativa, esta comparação resultou em uma tendência semelhante às apresentadas por simulações numéricas de outros autores. Esta tendência implica que o agrupamento estelar poderia estar relacionado com as subestruturas das nuvens, de forma comparável aos achados por Lomax et al. (2011) para nuvens artificiais e seus clusters derivados. Uma das conclusões foi que o cluster NGC 6530, estudado por Gregorio-Hetem et al (2015) e por Fernandes et al. (2012) é sistematicamente diferente dos demais clusters, o que concorda com resultados anteriores da literatura.

## **1.2- Fonte de Dados**

### **1.2.1- GAIA**

Os dados oriundos do satélite Gaia (Gaia Collaboration et al. 2018), em particular o Gaia DR2, frutos de uma ambiciosa missão da Agência Espacial Europeia (ESA) que teve o objetivo de mapear a Via Láctea, revelam no processo a sua composição, formação e evolução das estrelas. As informações deste catálogo de grande precisão nos forneceram a localização e o movimento próprio de cada uma das estrelas analisadas, bem como o erro associados a cada uma dessas medições.

A missão Gaia está baseada nos princípios comprovados da missão Hipparcos da ESA (Perryman & Khanna 2010) para ajudar a solucionar um dos desafios mais difíceis, mas profundamente fundamentais da astronomia moderna: a criação de um mapa tridimensional de alta precisão. Seus catálogos contêm cerca de um bilhão de estrelas em toda a nossa galáxia e além.

### **1.2.2- 2MASS**

O “Two Micron All Sky Survey” – 2MASS (Cutri 2003) realizou a primeira observação completa de toda a esfera celeste com telescópios de detecção de ondas na região próxima ao infravermelho. Esse catálogo nos forneceu informações sobre a luz emitida por cada estrela, portanto a intensidade e a cor de cada uma delas em filtros diferentes, assim foi possível utilizar o diagrama HR como ferramenta de determinação de massas e idades.

### **1.3- Presente Trabalho**

De posse dos dados provenientes do 2MASS e GAIA, das metodologias de medida das estatísticas fractais ( $Q$  e  $D_2$ ), dos parâmetros ajustados dos perfis de King, das massas, idades e de uma metodologia de estimativa das incertezas mais robusta, pretende-se, agora, avançar para um maior número de clusters. Também deseja-se ampliar as regiões da Galáxia estudadas através de amostragens em outras faixas de coordenadas.

Tome-se como exemplo a região de formação estelar Canis Major (CMa R1) mostra um cenário intrigante de formação de estrelas, que poderia ser resultado do efeito de uma remanescente de super-novas. Esta hipótese ainda não está totalmente aceita, pois existe a possibilidade de ventos estelares serem um mecanismo alternativo para o que se observa nesta região (Gregorio-Hetem 2008).

#### **1.3.1- Raio do core versus idade dos clusters**

Concluimos, em trabalhos anteriores, que há uma consistência entre as idades e os raios do core entre nossas amostras são e outros objetos semelhantes da Via Láctea, apesar de uma significativa dispersão. Destaca-se o fato de que nossa amostra tende a apresentar maiores valores de raio do core. A hipótese de que os clusters já analisados sejam

provavelmente objetos em expansão pode ser confirmada com base em sua evolução dinâmica.

### 1.3.2- Crossing time

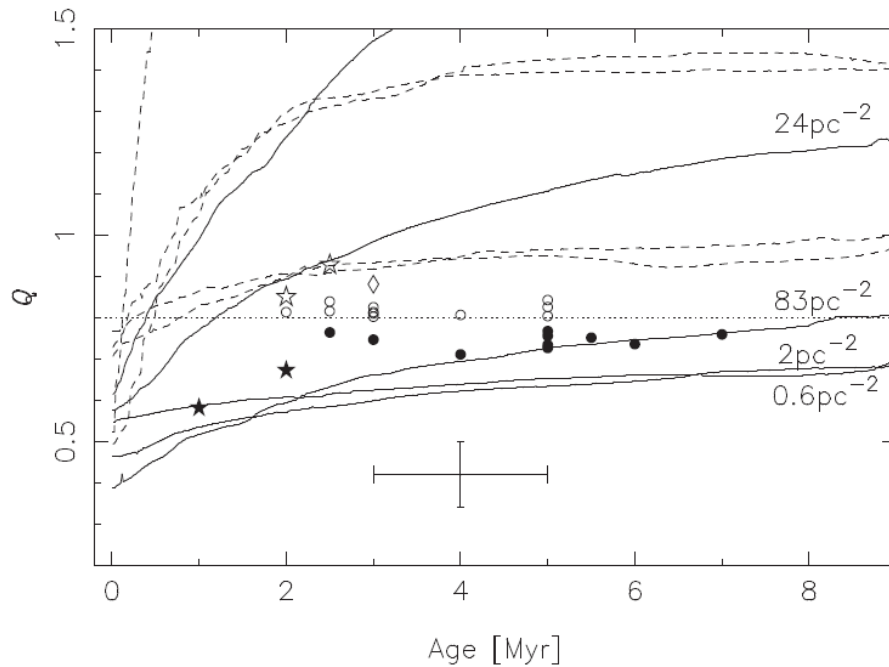
Utilizando a massa total e o raio dos clusters obtidos, o crossing time dos clusters foi estimado a partir da expressão sugerida por Gieles & Portegies Zwart (2011). Segundo estes autores, pode-se definir uma fronteira que distingue grupos estelares sob diferentes condições dinâmicas, a qual é expressa pela idade dinâmica, também chamada de parâmetro  $\chi$ , dado pela razão entre idade e o crossing time. As associações *unbound* (objetos em expansão) têm  $\chi < 1$ , enquanto os agrupamentos de estrelas *bound* têm  $\chi > 1$ . Os aglomerados da amostra de Gregorio-Hetem et al. (2015) são mais susceptíveis de serem associações *unbound*, seguindo a mesma tendência dos objetos da Via Láctea.

### 1.3.3- Evolução do cluster

Os valores de  $Q$  e da idade observados para nossas amostras, foram comparados com diferentes classes de objetos estelares jovens analisadas por outros autores, tendo sido observado que os valores  $Q$  de nossos clusters estão coerentes com os obtidos por simulações parametrizadas para as mesmas faixas de idades. Por exemplo, Schmeja & Klessen (2006) sugerem que os valores tendem a ser inferiores aos cálculos projetados em 2D. Parker & Dale (2013), que utilizou modelos com e sem feedback para simular os efeitos da presença (ou não) de fontes ionizantes na formação estelar (Dale et al 2012, 2013). Mesmo tendo em conta as grandes barras de erro para  $Q$ , como ilustrado na Fig.3, a distribuição dos valores de  $Q$  na amostra, em função da idade, é consistente com os modelos de realimentação, em particular os que assumem densidades iniciais baixas. Parker & Dale (2013) sugerem que os modelos de menor densidade são os mais afetados pelo feedback, que são os únicos que mantêm alguma subestrutura na faixa entre 5 e 10 Myr. Como os clusters com baixas densidades têm tempos de relaxação mais longos, suas subestruturas não são apagadas, devido à mistura estelar ser insignificante.

Outros agrupamentos jovens da literatura também foram estudados. Excetuando Cygnus OB2, os outros clusters, como  $\square$  Oph, Taurus, Chamaeleon, IC348 e  $\sigma$  Ori, são semelhantes às nossas amostras, coincidindo com a baixa -densidade feedback modelos de Dale et al. (2012, 2013). Os resultados são também comparáveis aos de Parker et al. (2014) para a evolução de  $Q$  com base em simulações de diferentes valores de razão virial  $\alpha_{vir}$ , a energia cinética total sobre a energia potencial.

**Figura 3** -  $Q$  como função da idade dos clusters (Gregorio-Hetem 2015). Os resultados são comparados às simulações de Parker & Dale (2013) indicando as densidades iniciais (número de estrelas por  $\text{pc}^2$ ).



## 2- Objetivos

O principal objetivo deste projeto é ampliar o número de clusters estudados de forma que possamos 1) Aprofundar os estudos da relação entre os parâmetros da estatística fractal e as evidências evolutivas dos clusters; e 2) Gerar um estudo mais detalhado das condições dinâmicas do gás com vistas à compreensão da formação de clusters e suas relações com as nuvens parentais.

Como resultados, espera-se obter estudos sobre a interação dos clusters em seus primeiros estágios com o potencial gravitacional galáctico. Esses estudos também poderão nos dar informações sobre a história da influência da Galáxia sobre os clusters e como estes foram afetados por sua passagem pelas suas estruturas (disco, halo, etc).

### **3- Metodologia**

O estudo dos estágios iniciais da evolução dos clusters de estrelas faz parte de tema maior, no qual se inclui a compreensão da transição nuvem-gás para cluster-estrelas. Portanto, o desafio principal está na formalização em forma de modelos da criação de estruturas globulares ou filamentos e como as características iniciais (*bound* versus *unbound*, por exemplo) afetam a história futura dos clusters.

O presente projeto exigiu uma extensa pesquisa bibliográfica, bem como dos bancos de dados observacionais disponíveis na Internet. Não se descarta a possibilidade da obtenção de dados via observação, cogitando-se a colaboração com colegas observacionais. Os dados compilados deverão, então, ser alvo de análises de caráter formal, estatístico e estrutural, de forma que os modelos atuais possam ser confrontados em suas hipóteses fundamentais.

Assim, faz-se necessário a formalização e aplicação de uma metodologia que possa conter todas as possibilidades de utilização das informações primárias (dados observacionais), secundárias (parâmetros obtidos via estatísticas e modelos) e terciárias (variáveis de modelos teóricos), previstas inicialmente ou não. Além disso, deve-se ter em conta que o volume de dados será elevado, sendo aconselhável a execução automática do maior número possível das etapas de cálculos. Dessa forma, do ponto de vista tecnológico, será necessário o estabelecimento de um fluxo (no sentido de *pipeline*) para o apropriado tratamento e controle dos dados, bem como de sua administração.

De posse dos dados observacionais, serão calculados os parâmetros intermediários através da aplicação de rotinas numéricas a serem desenvolvidas. Estes resultados serão comparados com resultados obtidos em trabalhos anteriores e da bibliografia.

Em uma etapa posterior, comparar-se-ão os resultados com modelos da bibliografia

e serão discutidas as hipóteses que tratam dos fenômenos observados.

#### 4- Resultados e discussão

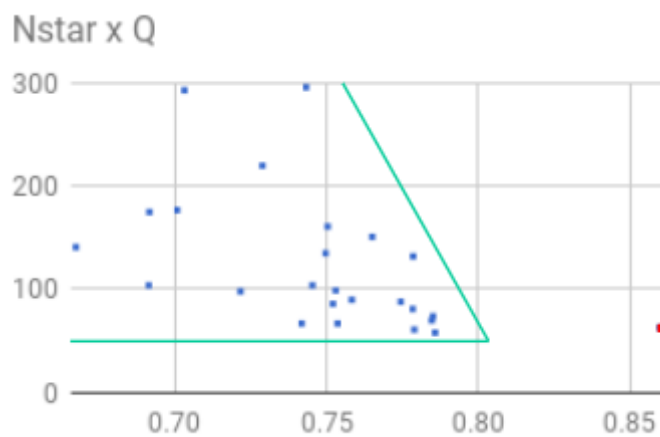
**Tabela 1** - Seguem os dados obtidos para cada um dos 25 clusters analisados através das rotinas de programação:

Cluster	Q	erro (Q)	m	erro(m)	s	erro(s)	Nstar
Berkeley 86	0.75218	0.09924	0.68967	0.08855	0.91690	0.02788	86
Collinder 205	0.70082	0.10329	0.66513	0.09685	0.94907	0.02166	177
Hogg 10	0.77455	0.16803	0.69727	0.14714	0.9002	0.04527	88
Hogg 22	0.072174	0.13335	0.69240	0.12497	0.95934	0.03791	98
Lynga 14	0.75372	0.10793	0.70679	0.09763	0.93774	0.03538	67
Markarian 38	0.78589	0.11486	0.69543	0.09748	0.88493	0.03667	58
NGC 2244	0.74330	0.06030	0.67447	0.05430	0.90740	0.00912	296
NGC 2264	0.7036	0.04399	0.65046	0.04040	0.92492	0.00690	293
NGC 2302	0.78474	0.1039	0.65724	0.08428	0.83752	0.02788	70
NGC 2362	0.77863	0.15075	0.64898	0.12352	0.83349	0.02957	132
NGC 2367	0.77900	0.10365	0.64508	0.08277	0.82809	0.02917	61
NGC 2645	0.74542	0.12376	0.65658	0.10673	0.88083	0.02978	104
NGC 2659	0.72893	0.12101	0.68155	0.11198	0.93499	0.02223	220
NGC 3572	0.76514	0.14664	0.69040	0.13023	0.90233	0.03056	151
NGC 3590	0.77843	0.15229	0.75005	0.14199	0.96354	0.04756	81
NGC 5606	0.75310	0.13636	0.66338	0.11742	0.88087	0.03359	99
NGC 6178	0.69149	0.12146	0.69835	0.12004	1.00993	0.03655	104
NGC 6530	0.85984	0.05765	0.64913	0.04188	0.75494	0.01379	63
NGC 6604	0.75843	0.09169	0.68977	0.08123	0.90947	0.02487	90

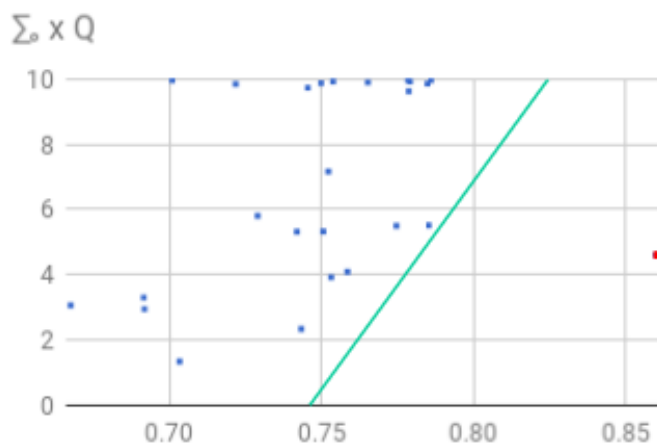
NGC6613	0.74977	0.09400	0.68608	0.08454	0.91505	0.02117	135
Ruprecht 79	0.69175	0.133663	0.64583	0.12607	0.93363	0.02806	175
Stock 13	0.74184	0.11059	0.68719	0.09898	0.92634	0.03559	67
Stock 16	0.66747	0.12311	0.64916	0.11804	0.97258	0.03007	141
Trumpler 18	0.75046	0.12243	0.67824	0.10907	0.90376	0.02480	161
Trumpler 28	0.78515	0.11149	0.66102	0.09099	0.84191	0.02935	74

Seguem os principais gráficos obtidos relacionando os parâmetros entre si e com os parâmetros do modelo de King:

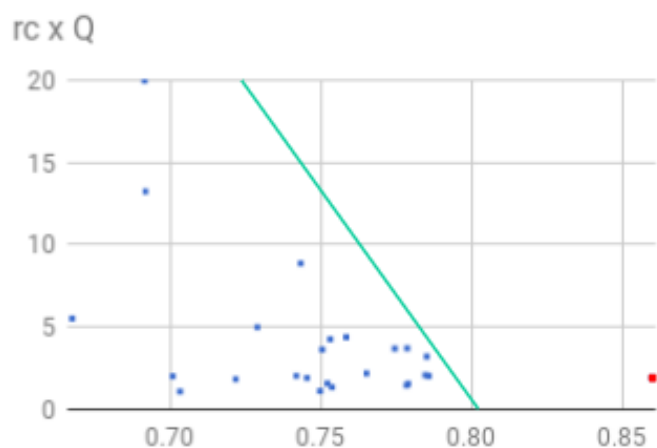
**Gráfico 1** - da relação linear do número de estrelas com o parâmetro Q de cada cluster. O gráfico mostra um comportamento que apresenta regiões proibidas (limitadas pelas linhas verdes).



**Gráfico 2** - da relação linear entre  $\Sigma_o$  e o parâmetro Q. Os dados são limitados pela linha verde.



**3- Gráfico** da relação linear entre  $rc$  e o parâmetro  $Q$ . O gráfico apresenta certo comportamento, conforme  $rc$  decresce, a probabilidade de o cluster ter um parâmetro  $Q$  maior aumenta. Também se observa uma região proibida, limitada pela linha verde.



O principal resultado até então foi a peculiaridade mostrada pelo cluster NGC6530, que devido a um baixo valor de 's' obteve-se um parâmetro  $Q$  elevado. As causas desse fato ainda são desconhecidas, apesar de termos teorias para tal evento.



## **5- Conclusão**

Durante a Reunião Anual da SAB e ao comparar os resultados obtidos com trabalhos anteriores, ficou evidente alguns erros e acertos do presente projeto, como algumas divergências sobre os parâmetros obtidos e os bons algoritmos desenvolvidos.

Com os conselhos e avaliações recebidos durante a apresentação do banner, pretende-se rever as rotinas numéricas para aumentar a precisão dos resultados obtidos, comparar a outros dados que descrevem o comportamento dos clusters, utilizar de outras técnicas de análise e interpretação de dados, bem como a ampliação do número de clusters estudados.

## 6- Referências

- Alfaro, E. J., & González, M., 2016, MNRAS 456, 2900–2906
- Cartwright & Whitworth 2004
- Cartwright A., Whitworth A. P., 2004, MNRAS, 348, 589
- Cutri, R. M. et al., 2003, The IRSA 2MASS All-Sky Point Source Catalog,  
NASA/IPAC Infrared Science Archive
- Dale, J. E., Ercolano, B., Bonnell, I. A., 2012, MNRAS, 424, 377
- Dale, J. E., Ercolano, B., Bonnell, I. A., 2013, MNRAS, 430, 234
- Davidge, T. J., 2017, ApJ 837:178
- Dias, W. S., Monteiro, H., Caetano T. C., Lépine, J. R. D., Assafin M. & Oliveira, A. F.  
2014, A&A 564, A79
- Elmegreen, B. G., 2011, EAS Publications Series, 51, 31
- Elmegreen, B. G., Falgarone, E., 1996, ApJ, 471, 816.
- Fernandes, B. Gregorio-Hetem, J.; Hetem, A. 2012, “Probing the anomalous extinction of  
four young star clusters: the use of colour-excess, main-sequence fitting and fractal  
analysis”. A&A, v. 541, p. A95.
- Gaia Collaboration et al. (2018) Gaia Data Release 2. Summary of the contents and  
survey properties. ArXiv e-prints. External Links: 1804.09365, ADS entry, Gaia  
Data Release 2 Documentation release 1.1.
- Gieles, M., & Portegies Zwart, S. F., 2011, MNRAS, 410, L6
- Girichidis, P., Federrath, C., Allison, R., Banerjee, R., Klessen, R. S., 2012, MNRAS, 420,  
3264
- Gower, J.C., Ross, G.J.S., 1969, Appl. Stat., 18, 54
- Gregorio-Hetem, J., 2008, “The Canis Major Star Formation Region”, Handbook of Star  
Forming Regions Vol. II, Astronomical Society of the Pacific, Bo Reipurth, ed.
- Gregorio-Hetem, J.; Hetem, A.; Santos-Silva, T.; Fernandes, B., 2015, “Statistical fractal  
analysis of 25 young star clusters”. Monthly Notices of the Royal Astronomical  
Society, v. 448, p. 2504-2513
- Hetem, A. & Lépine, J. R. D., 1993, A&A 270, 451
- Annibal Hetem,. The Search for Parameters and Solutions: Applying Genetic Algorithms on  
Astronomy and Engineering. In: Shangce Gao. (Org.). Bio-Inspired Computational

Algorithms and Their Applications. 1ed. Rijeka, Croatia: InTech, 2012, v. 1, p. 161-186.

Jaffa, S. E., Whitworth, A. P., Lomax, O., 2017, MNRAS 466, 1082–1092

Lada, C. J., & Lada, E. A. 2003, ARA&A, 41, 57

Lomax, O., Whitworth, P., & Cartwright, A. 2011, MNRAS, 412-627

Parker, R. J., & Dale, J. E., 2013, MNRAS, 432-986

Parker, R. J., & Dale, J. E., 2015, MNRAS 451, 3664–3670

Parker, R. J., Andersen M., 2014, MNRAS, 441, 784

Portegies Zwart, S. F., McMillan, S. L. W., Gieles, M., 2010, ARA&A 48, 431

Schmeja & Klessen (2006)

Walker, D. L., Longmore, S. N., Bastian, N., Kruijssen, J. M. D., Rathborne, J. M., Galván Madrid, R., Liu, H. B., 2016, MNRAS 457, 4536.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ABC**

**Projeto Dirigido**

Sérgio Enzo Matsuda Sampa

**Algoritmo de Determinação de Parâmetros Fractais  
Estruturais em Aglomerados de Estrelas Jovens**

Santo André

2018