

DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DE ERVA-MATE A PARTIR DA ANÁLISE DE IMAGEM VIA ImageJ

Alessandra Suzin Bertan¹, Marco Aurélio Cremasco²

¹Laboratório de Processos de Transferência de Massa, Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil (alessandra.suzin.bertan@gmail.com)

²Departamento de Engenharia de Processos, Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil

Resumo: Apresenta-se um estudo sobre análise granulométrica de fragmentos de erva-mate, utilizando-se análise de imagem via software ImageJ. A partir de uma amostra, tira-se desta uma fotografia, que é processada e da qual se obtém a área individual de cada partícula que, igualada à área superficial de uma esfera, possibilita conhecer o diâmetro equivalente. Do conjunto de diâmetros equivalentes, obtém-se o seu valor médio bem como são avaliados onze modelos de função de densidade de probabilidade.

Palavras-chave: erva-mate; imagem; ImageJ; área superficial; diâmetro

INTRODUÇÃO

A erva-mate (*Ilex paraguariensis* A. St. Hil.) é planta endêmica da América do Sul. No Brasil, é encontrada majoritariamente nos estados do sul do país, sendo consumida na forma de bebidas, decorrentes da infusão de folhas e ramos fragmentados em água quente, como no chimarrão e no chá-mate, ou em água fria, como no tererê. A diferença fundamental entre as bebidas reside no processamento da matéria prima, conforme ilustra a Figura 1, no qual o material triturado, denominado erva cancheada e posteriormente peneirada, é submetido à infusão em água gerando ou chimarrão ou tererê; ou essa erva cancheada e peneirada é ainda submetida a uma etapa de torrefação, de modo a produzir o chá-mate.

Além da etapa de peneiramento, o tamanho médio das partículas, que compõem os fragmentos da erva cancheada, determina o tipo de equipamento em que se dará a operação de fragmentação, bem como influencia a operação subsequente de torrefação. Em complemento, o conhecimento de tal característica é fundamental para o fenômeno de transferência de massa associado à infusão da matéria-prima em água.

O presente trabalho tem por objetivo apresentar um estudo sobre análise granulométrica de fragmentos de erva cancheada torreficada destinados ao consumo como chá-mate, utilizando-se a técnica de análise de imagem por meio do aplicativo ImageJ. A partir de amostra de material coletado de um sachê, seleciona-se aleatoriamente determinada quantidade de partículas, obtendo-se desta uma imagem fotográfica, que é processada via o aplicativo mencionado, do qual se obtém a área individual de cada partícula, que é

igualada à área superficial de uma esfera de mesmo diâmetro, possibilitando o cálculo individual do diâmetro equivalente. A partir dos valores individuais dos diâmetros equivalentes, este trabalho direciona-se à avaliação de modelos para a frequência relativa de partículas que detêm certo diâmetro equivalente, que pode ser ajustada por meio de função de densidade de probabilidade (PDF em inglês), cuja algumas delas estão apresentadas no Quadro 1.

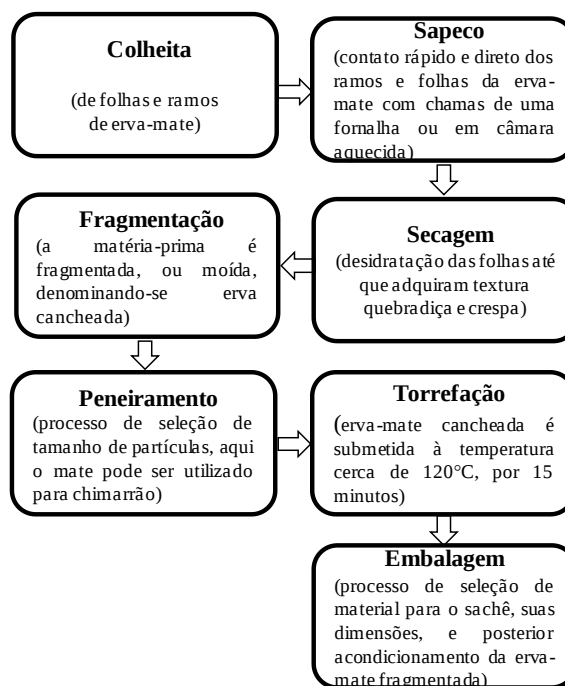


Figura 1. Processamento da erva-mate para consumo enquanto chá.

Quadro 1. Função de densidade de probabilidade (Moura, 2018).

PDF	p(x)
Normal	$\frac{1}{\sqrt{2\pi\text{Var}_x}} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(x - E_x)^2}{\text{Var}_x}\right)$
Log-normal	$\frac{1}{x\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{(\ln(x) - \mu)^2}{2\sigma^2}\right]$
Logística	$\frac{1}{\beta} \exp\left(\frac{x - \alpha}{\beta}\right) \left[1 + \exp\left(\frac{x - \alpha}{\beta}\right)\right]^{-2}$
Gumbel	$\frac{1}{\beta} \exp\left[-\frac{x - \alpha}{\beta} - \exp\left(\frac{x - \alpha}{\beta}\right)\right]$
Weibull	$\frac{\eta}{\beta} \left(\frac{x}{\beta}\right)^{\eta-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\eta\right]$
Exponencial	$\frac{1}{\beta} \exp\left[-\left(\frac{x}{\beta}\right)\right]$
Rayleigh	$\frac{1}{\beta^2} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x}{\beta}\right)^2\right]$
Maxwell	$\frac{1}{\beta^3} \left(\frac{2}{\pi}\right)^{1/2} x^2 \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x}{\beta}\right)^2\right]$
Gama	$\frac{(\beta x)^{\eta-1}}{\Gamma(\eta)} x^2 \exp(-\beta x)$
Beta	$\frac{x^{(\beta-1)}(1-x)^{(\eta-1)}}{\Gamma(\beta)\Gamma(\eta)/\Gamma(\beta+\eta)}$
Cauchy	$\frac{\beta}{\pi} \left(\frac{1}{x^2 + \beta^2}\right)$

MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi conduzido no Laboratório de Processos de Transferência de Massa, Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas. Utilizou-se sachê de chá-mate da Matte Leão com cerca de 1,20 g de material particulado (sem o invólucro), papel sulfite branco, régua, aparelho celular e um computador.

O estudo experimental da análise granulométrica inicia-se pela construção de uma malha de análise, desenhada sobre um papel branco, no formato de quadrado de 25 mm por 25 mm (Figura 2). No canto inferior esquerdo dessa malha, traça-se uma reta de dimensão conhecida que, no presente trabalho, foi igual a 5 mm. Em seguida, elege-se uma amostra de partículas contida em um sachê de chá, espalhando-a sobre a malha de análise (Figura 3). Fotografa-se a malha preenchida por um celular, cuja imagem é salva, denominando-a, por exemplo, por ervamate.

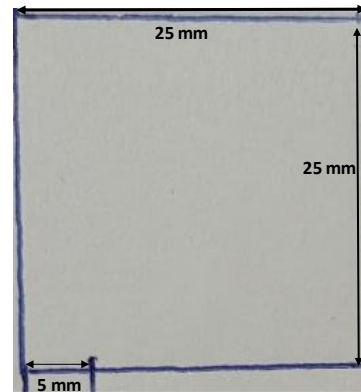


Figura 2. Malha de análise.



Figura 3. Fotografia das partículas.

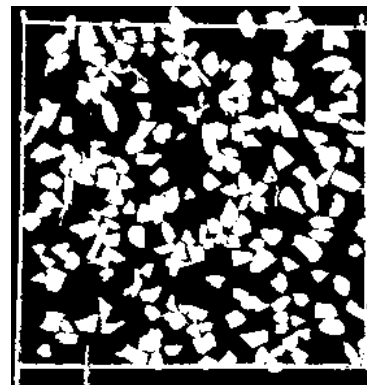


Figura 4. Imagem binária.

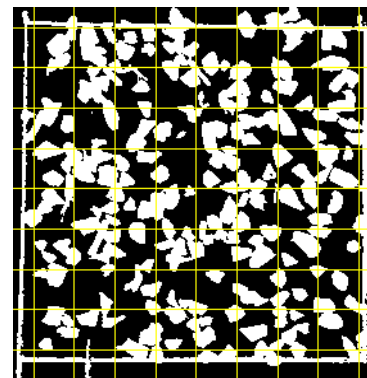


Figura 5. Imagem binária em quadrantes.

De posse da fotografia das partículas (Figura 3), tem início a análise da imagem. Faz-se o *download* do aplicativo ImageJ, que é gratuito (<https://imagej.en.download.it/>). Após a instalação do aplicativo, começa o processamento da imagem propriamente dito. Abre-se a fotografia por meio da guia *File>Open>ervamate*. Amplia-se a imagem na tela do computador. Converte-se a imagem no formato binário, tendo em vista o objetivo de se obter a área superficial. Para tanto, entra-se na guia *Process>Binary*, no que resulta em uma imagem plana do “ervamate” (Figura 4), a ser salva utilizando-se a guia *File>Save as>PNG>ervamatebinary*. Realiza-se a calibração da medida, empregando-se a ferramenta *straight*. Traça-se uma linha sobre o comprimento conhecido (no caso, 5 mm), disposto à margem esquerda inferior da *ervamatebinary*, e, a seguir, entra-se na guia *Analyse>Set Scale>Know distance (5)>Unit of length (mm)*. Em seguida, constrói-se os quadrantes sobre a imagem binária por meio da guia *Analyse>Tools>Grid* (selecionando-se determinada cor), salva-se o resultado (Figura 5). Em seguida, inicia-se a obtenção da área de cada partícula. Para tanto, seleciona-se determinado quadrante e, neste, certa partícula. Emprega-se a ferramenta *freehand*, e contorna-se a partícula eleita. A seguir, entra-se na guia *Analyse>Measure*, obtendo-se o primeiro valor da área. Repete-se o procedimento para partículas aleatórias no primeiro quadrante eleito, passando-se para os demais quadrantes, até a obtenção de um número considerável de partículas (203 no presente trabalho). O próximo passo é o de salvar os resultados por meio da guia *Analyse>Sumarize>File>Save as>(nome do arquivo)*. O arquivo é salvo na extensão .TXT. Na segunda coluna desse arquivo, aparecerá “Area”, a qual corresponde a área binária ou aquela projetada da imagem inicial. No presente trabalho, esse arquivo foi convertido em EXCEL.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram analisadas 203 partículas, gerando, cada qual, uma área S_i , cujo diâmetro, D_i , é equivalente à área superficial de uma esfera de igual volume, obtida de (Cremasco, 2018)

$$\pi D_i^2 = S_i \quad (1)$$

ou

$$D_i = \left(\frac{1}{\pi} S_i \right)^{1/2} \quad (2)$$

A Figura 6 apresenta a série de valores aleatórios de diâmetro equivalente. A partir dos resultados ilustrados nessa figura é possível obter a distribuição granulométrica das partículas. A partir do histograma

construído, calcula-se o valor do diâmetro equivalente médio da amostra mediante (Cremasco, 2018)

$$d_p = \left[\frac{\sum_{i=1}^k \left(\frac{f_i}{d_i} \right)}{\sum_{i=1}^k \left(\frac{f_i}{d_i^3} \right)} \right]^{1/2} \quad (3)$$

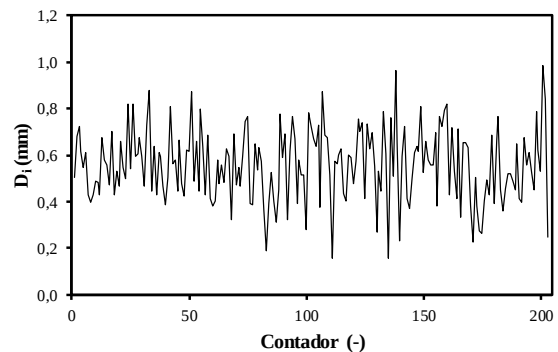


Figura 6. Série aleatória relativa ao diâmetro equivalente de cada partícula.

Na Equação 3, f_i refere-se à frequência relativa que determinado número de partícula se encontra o intervalo Δ , assim como d_i é o diâmetro médio das partículas contidas nesse intervalo, o qual é calculado por

$$\Delta = \frac{D_{i_{\max}} - D_{i_{\min}}}{k} \quad (4)$$

em que $D_{i_{\max}}$ e $D_{i_{\min}}$ são os valores máximo e mínimo encontrados na série aleatória de partículas (Figura 6); k é o número (inteiro) de classes do histograma. Neste caso, torna-se necessário o seu conhecimento. Neste trabalho, utiliza-se a técnica baseada no coeficiente de variação (Pietro e Cremasco, 2017; Moura, 2018; Pinto et al., 2019; Cremasco e Melo, 2019). Essa técnica toma a série original (Figura 6) e a divide em vários histogramas, associados aos respectivos números de classes. Obtém-se, para cada histograma, o valor do coeficiente de variação, C_v , segundo

$$C_v = \frac{[\text{Var}(X)]^{1/2}}{E(X)} \times 100\% \quad (5)$$

com a variância, $\text{Var}(X)$, e o valor esperado, $E(X)$, obtidos por (Cremasco e Melo, 2019)

$$\text{Var}(X) = \sum_{i=1}^k x_i^2 p(x_i) - E(X)^2 \quad (6)$$

$$E(X) = \sum_{i=1}^k x_i p(x_i) \quad (7)$$

com

$$p(x_i) = \frac{n_i}{N} \quad (8)$$

em que n_i é o número de variáveis aleatórias, no caso o número de valores de diâmetro equivalente, dentro de certo intervalo de classe; x_i é o respectivo valor médio desse diâmetro; N é o número total de partículas contidas na série aleatória (203 neste trabalho). O método consiste na construção da curva C_v vs k até que não ocorra variação significativa de C_v com o incremento de k (Cremasco e Melo, 2019). A partir da série ilustrada na Figura 6, foram calculados valor de C_v , iniciando-se com $k = 2$ até $k = 10$. A Figura 7 apresenta a curva obtida.

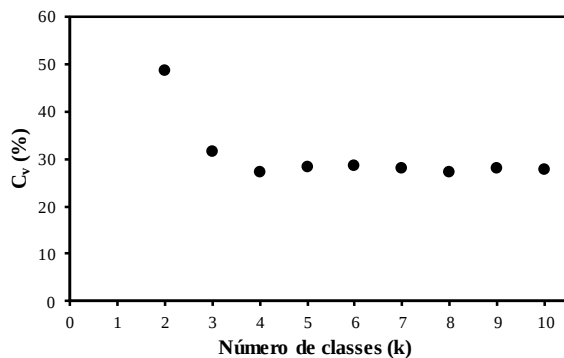


Figura 7. Coeficiente de variação em função do número de classes.

É necessário destacar que o coeficiente de variação, C_v , representa a dispersão relativa de uma distribuição de dados (Pinto et al., 2019), que é considerada baixa para $C_v \leq 15\%$, média dispersão para C_v entre 15% e 30% e alta dispersão para valores de $C_v \geq 30\%$ (Spiegel e Stephens, 2008). Observa-se, por inspeção da Figura 7, que a saturação de C_v situou-se em cerca de 30% , ou seja, média dispersão relativa. Tal saturação, situação na qual a variação de C_v se mantém praticamente constante com o incremento do número de classes, deu-se a partir de $k = 5$, cujo valor será aquele considerado para o número de classes. Uma vez que valor máximo do diâmetro equivalente é igual a $0,984\text{ mm}$, e o mínimo é igual a $0,158\text{ mm}$, tem-se da Equação 4, $\Delta = 0,1652\text{ mm}$. Com tais valores é possível obter a distribuição de frequência conforme oferece o histograma ilustrado na Figura 8. Com os valores de diâmetros equivalentes médios de cada classe, d_i , e a respectiva frequência, f_i , e o número de classes, k , obtém-se o valor do diâmetro equivalente médio empregando-se a Equação 3, cujo resultado é $d_p = 0,419\text{ mm}$.

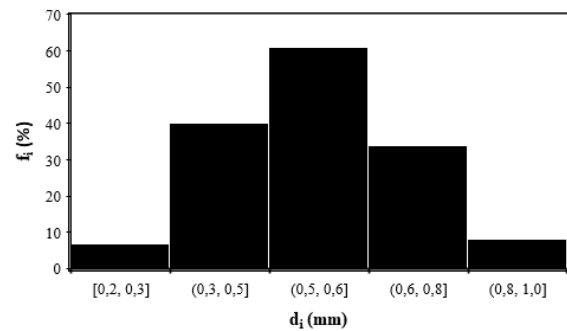


Figura 8. Distribuição granulométrica.

Após fixar o número de classes igual a 5, as PDFs presentes no Quadro 1 foram ajustadas mediante a técnica dos mínimos quadrados (Cremasco e Melo, 2019), enquanto o desempenho de ajuste se deu por meio do teste de Kolmogorov-Smirnov (K-S), definido pela diferença máxima entre a função cumulativa de frequência, $P(x_i)$, obtida experimentalmente e aquela advinda do modelo ajustado por $G(x_i)$, ou

$$D_{\max} = \max |P(x_i) - G(x_i)| \quad (9)$$

O valor obtido de $D_{\max}$ é comparado com o valor crítico, D_c , para certo nível de significância. Tendo em vista que o valor de $k = 5$ e considerando-se 5% para o nível de significância, $D_c = 0,565$ (O'Connor e Kleyner, 2012). A Tabela 1 apresenta o desempenho dos modelos contidos no Quadro 1, que apresentam $D_{\max} < D_c$ para todos os ensaios avaliados, exceto os modelos Log-normal e de Cauchy.

Nota-se, por inspeção da Tabela 1, que os modelos Normal, Logística, Gumbel, Weibull apresentam $D_{\max} < 0,10$, demonstrando-se adequados para representar a distribuição de frequência do diâmetro equivalente das partículas de erva-mate, destacando-se o modelo de Weibull. A Figura 9 ilustra o desempenho do modelo de Weibull em relação aos valores experimentais, cuja descrição para a distribuição granulométrica é

$$x_i = 6,251 \left(\frac{d_i}{0,61} \right)^{2,815} \exp \left[- \left(\frac{d_i}{0,61} \right)^{3,815} \right] \quad (9)$$

Visto $x_i = 100f_i$, utiliza-se a Equação 10 na Equação 3 para $k = 5$, obtendo-se o valor para o diâmetro equivalente igual a $d_p = 0,404\text{ mm}$, acarretando em desvio relativo (D.R) igual a $-3,58\%$, este calculado por

$$D.R(\%) = \left(\frac{d_{p\text{mod}} - d_{p\text{exp}}}{d_{p\text{exp}}} \right) \times 100 \quad (10)$$

sendo $d_{p\text{mod}}$ e $d_{p\text{exp}}$ os valores advindos do modelo e aquele experimental, respectivamente.

Tabela 1. Valor do desvio máximo considerando-se o teste de Kolmogorov-Smirnov.

PDF	$D_{\text{máx}}$	K-S
Normal	0,0238	Aprovado
Log-normal	0,5778	Reprovado
Logística	0,0512	Aprovado
Gumbel	0,0796	Aprovado
Weibull	0,0197	Aprovado
Exponencial	0,4673	Aprovado
Rayleigh	0,2058	Aprovado
Maxwell	0,1244	Aprovado
Gama	0,2712	Aprovado
Beta	0,5187	Aprovado
Cauchy	0,7454	Reprovado

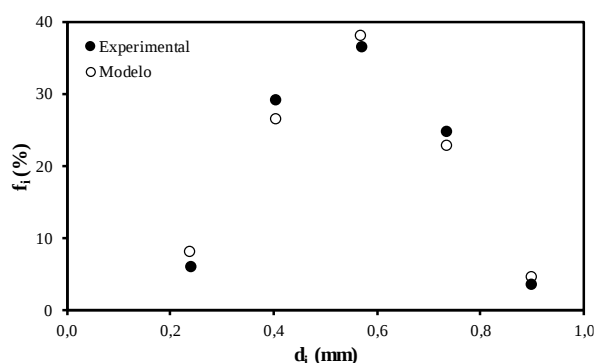


Figura 9. Análise comparativa distribuição granulométrica oriunda do modelo de Weibull em relação àquela obtida experimentalmente.

CONCLUSÃO

No presente trabalho avaliou-se a distribuição granulométrica de partículas de erva-mate cancheada, fragmentada e tostada, direcionada ao consumo de chá mate, cujo diâmetro equivalente se situou entre 0,1 mm a 1,0 mm. Nessa faixa de diâmetro, pode-se utilizar a técnica de peneiramento, em que as aberturas de peneiras situam entre 140 Mesh e 18 Mesh. Além de elencar o conjunto de peneiras, a operação requer um agitador para a promoção da agitação das peneiras, uma balança para avaliação da massa retida em cada peneira. Trata-se do método clássico. No presente trabalho, foi demonstrado a possibilidade de se utilizar técnicas por análise de imagem, cuja método clássico é o MEV, indicado para dimensões de partículas entre $0,2 \times 10^{-3}$ a 50×10^{-3} mm (Cremasco, 2018), faixa bem inferior àquela aqui encontrada.

Avalia-se uma distribuição granulométrica situada na faixa entre 0,1 mm a 1,0 mm, empregando-se análise de imagem por meio de fotografia extraída de um celular e processada por um software gratuito, o aplicativo ImageJ. O manuseio do software possibilita transformar uma imagem 3D em uma 2D, cujo resultado é a imagem projetada da partícula real, que

pode ser igualada à área superficial de uma esfera, possibilitando o cálculo do diâmetro equivalente. O resultado obtido é uma série aleatória de tamanho de partículas, tornando possível avaliar a sua distribuição por faixas de tamanho, à semelhança do conjunto de peneiras, identificadas a classes de um histograma. Em outras palavras, foi possível trabalhar com distribuição de densidade de probabilidade ou de frequência (PDF). A partir de então, obteve-se o valor médio do diâmetro equivalente igual a 0,419 mm. Em complemento a esse resultado, avaliou-se o desempenho de onze modelos de PDF, ajustados pelo método dos mínimos quadrados, utilizando-se o teste de Kolmogorov-Smirnov para verificar a aderência dos resultados, indicando que o modelo de Weibull como o mais apropriado, fornecendo o valor de 0,404 mm para o diâmetro médio equivalente.

É importante destacar que a técnica experimental empregada neste trabalho não substitui a técnica do peneiramento, tendo em vista que foi aplicada para um único tipo de partícula, cujo contraste binário das partículas é nítido. Partículas pulverulentas, como aquelas encontradas em sachê de chá de hortelã, por exemplo, carecem de tratamentos mais complexos do que os encontrados neste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho contou com o apoio do CNPq (Proc. n°.140204/2021-0 e do Faepex-Unicamp (Proc. n°.18501-25).

REFERÊNCIAS

- Cremasco, M.A. Operações unitárias em sistemas particulados e fluidomecânicos. (3ª ed.). Blucher, São Paulo, 2018.
- Cremasco, M.A.; Melo, K.P. Distribuição de esfericidade de aglomerados de partículas resultantes da secagem de biomassa residual de leveduras. In: Anais do XXXIX Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, 2019. Disponível em: <https://proceedings.science/enemp/enemp-2019/trabalhos/distribuicao-de-esfericidade-de-aglomerados-de-particulas-resultantes-da-secagem?lang=pt-br>. Acesso em: 24 fev. 2025.
- Moura, V. B. Study of fluidization regimes by Shannon entropy. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação “Stricto Sensu” em Engenharia Química. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2018.
- O'Connor, D.T.; Kleyner, A. Practical reliability engineering. (5th ed.). John Wiley & Sons, New York, 2012.



Pietro, W.H.; Cremasco, M.A. Application of probability density functions in modelling annual data of atmospheric NO_x temporal concentration. Chemical Engineering Transactions, v. 57, p. 487-492, 2017.

Pinto, M.P.M.; Castilho, G.J.; Cremasco, M.A. Estudo do número de classes para a construção de histograma de distribuição de frequência para análise estatística de sinais obtidos na seção downer de um LFC. In: Anais do SimAPI 40 - Simpósio Comemorativo – 40 Anos da Área de Sistemas Particulados DEQ/UFSCAR, p. 771-778, 2019.

Spiegel, M.R.; Stephens, L.J. Schaum's outline of theory and problems of statistics. (4th ed.). McGraw-Hill, New York, 2008.