Inferência Estatística II

Prof. Fernando de Souza Bastos
fernando.bastos@ufv.br

Departamento de Estatística
Programa de Pós-Graduação em Estatística Aplicada e Biometria
Universidade Federal de Viçosa
Campus UFV - Viçosa

Sumário

Introdução

O Teorema Central do Limite (TCL) é um pilar fundamental na Estatística, Probabilidade e Ciência de Dados, pois estabelece que a soma de um grande número de variáveis aleatórias independentes e identicamente distribuídas tende a se aproximar de uma distribuição normal, independentemente da forma original da distribuição dessas variáveis. Este teorema não apenas justifica a aplicação de métodos estatísticos que assumem normalidade, mas também permite a utilização de técnicas analíticas e inferenciais robustas para uma ampla gama de problemas práticos.

Introdução

Em Estatística, o TCL fundamenta a construção de intervalos de confiança e a realização de testes de hipóteses, possibilitando a generalização de resultados e a tomada de decisões com base em amostras. Na Ciência de Dados, ele é crucial para a modelagem e previsão, facilitando a análise de grandes volumes de dados e a implementação de algoritmos que dependem de pressupostos normais. Em suma, o Teorema Central do Limite não só proporciona uma base teórica sólida, mas também une teoria e prática, permitindo a solução eficaz de problemas complexos e a interpretação confiável de resultados em diversas disciplinas.

Teorema Central do Limite

Seja $\{X_n\}_{n\geq 1}$ uma sequência de variáveis aleatórias iid com média μ e variância $\sigma^2 < \infty$. Então,

$$\frac{\sum_{i=1}^{n} X_i - n\mu}{\sqrt{n}\sigma} = \frac{\sqrt{n}(\bar{X}_n - \mu)}{\sigma} \xrightarrow{D} N(0,1)$$

Demonstração

Assuma, sem perda de generalidade, $\mu = 0$ e $\sigma^2 = 1$.

$$
\begin{aligned}
M_{\frac{\sum X_i - n\mu}{\sqrt{n}\sigma}}(t) = M_{\frac{\sum X_i}{\sqrt{n}}}(t) &= E\left(e^{\frac{t\sum X_i}{\sqrt{n}}}\right) = E\left(\prod_{i=1}^{n} e^{\frac{tX_i}{\sqrt{n}}}\right) \\
&= \prod_{i=1}^{n} E\left(e^{\frac{tX_i}{\sqrt{n}}}\right) = \prod_{i=1}^{n} M_{X_i}\left(\frac{t}{\sqrt{n}}\right) = \left(M_{X_i}\left(\frac{t}{\sqrt{n}}\right)\right)^n
\end{aligned}
$$

Demonstração

Assuma, sem perda de generalidade, $\mu = 0$ e $\sigma^2 = 1$.

$$M_{\frac{\sum X_i - n\mu}{\sqrt{n}\sigma}}(t) = M_{\frac{\sum X_i}{\sqrt{n}}}(t) = E\left(e^{\frac{t\sum X_i}{\sqrt{n}}}\right) = E\left(\prod_{i=1}^{n} e^{\frac{tX_i}{\sqrt{n}}}\right)$$

$$= \prod_{i=1}^{n} E\left(e^{\frac{tX_i}{\sqrt{n}}}\right) = \prod_{i=1}^{n} M_{X_i}\left(\frac{t}{\sqrt{n}}\right) = \left(M_{X_i}\left(\frac{t}{\sqrt{n}}\right)\right)^n$$

Notemos que, $\ln M_{\frac{\sum X_i}{\sqrt{n}}}(t) = n \ln M_{X_i}(\frac{t}{\sqrt{n}}) = \dfrac{\ln M_{X_i}(\frac{t}{\sqrt{n}})}{\frac{1}{n}}$. Além disso, sabemos que $\lim_{n\to\infty} \ln[f(n)] = \ln \lim_{n\to\infty} f(n)$, sempre que $\lim_{n\to\infty} f(n) > 0$ e que para n grande $\frac{t}{\sqrt{n}} \approx 0$ e $M_{X_i}(0) = 1$.

Aplicando L'Hôpital, temos:

$$\lim_{n\to\infty}\frac{\ln M_{X_i}(\frac{t}{\sqrt{n}})}{\frac{1}{n}} = \lim_{n\to\infty}\frac{\frac{M'_{X_i}(\frac{t}{\sqrt{n}})}{M_{X_i}(\frac{t}{\sqrt{n}})}t(-\frac{1}{2})n^{-\frac{3}{2}}}{-\frac{1}{n^2}}$$

$$= \frac{t}{2}\lim_{n\to\infty}\sqrt{n}\frac{M'_{X_i}(\frac{t}{\sqrt{n}})}{M_{X_i}(\frac{t}{\sqrt{n}})}$$

$$= \star$$

Sabe-se que o k-ésimo momento de X_i é dado por $M^{(k)}_{X_i}(0) = E(X_i^k)$, ou seja,

$M^{(')}_{X_i}(0) = E(X_i) = \mu = 0$ e $M^{('')}_{X_i}(0) = E(X_i^2) = \sigma^2 = 1$ (por hipótese)

Logo,

$$\star = \frac{t}{2}\lim_{n\to\infty}\sqrt{n}\frac{M'_{X_i}(\frac{t}{\sqrt{n}})}{M_{X_i}(\frac{t}{\sqrt{n}})}$$

$$= \frac{t}{2}\lim_{n\to\infty}\frac{\dfrac{M'_{X_i}(\frac{t}{\sqrt{n}})}{M_{X_i}(\frac{t}{\sqrt{n}})}}{\dfrac{1}{\sqrt{n}}}$$

Logo,

$$\star = \frac{t}{2}\lim_{n\to\infty}\sqrt{n}\frac{M'_{X_i}(\frac{t}{\sqrt{n}})}{M_{X_i}(\frac{t}{\sqrt{n}})}$$
$$= \frac{t}{2}\lim_{n\to\infty}\frac{\frac{M'_{X_i}(\frac{t}{\sqrt{n}})}{M_{X_i}(\frac{t}{\sqrt{n}})}}{\frac{1}{\sqrt{n}}}$$

aplicando L'Hôpital novamente, temos:

$$\star = \frac{t}{2}\lim_{n\to\infty}\frac{\frac{M_{X_i}(\frac{t}{\sqrt{n}})M''_{X_i}(\frac{t}{\sqrt{n}})(-\frac{1}{2}tn^{-\frac{3}{2}}) - (M'_{X_i}(\frac{t}{\sqrt{n}}))^2(\frac{1}{2}tn^{-\frac{3}{2}})}{\left(M_{X_i}(\frac{t}{\sqrt{n}})\right)^2}}{-(\frac{1}{2})n^{-\frac{3}{2}}}$$

Simplificando os termos $-(\frac{1}{2})n^{-\frac{3}{2}}$ e observando que para n suficientemente grande, $\dfrac{t}{\sqrt{n}} \approx 0 \;\Rightarrow\; M_{X_i}(0) = 1, M_{X_i}^{(')}(0) = 0$ e $M_{X_i}^{('')}(0) = 1$, temos:

$$\frac{t}{2}\lim_{n\to\infty}\frac{\dfrac{M_{X_i}(\frac{t}{\sqrt{n}})M''_{X_i}(\frac{t}{\sqrt{n}})(-\frac{1}{2}tn^{-\frac{3}{2}}) - (M'_{X_i}(\frac{t}{\sqrt{n}}))^2(\frac{1}{2}tn^{-\frac{3}{2}})}{\left(M_{X_i}(\frac{t}{\sqrt{n}})\right)^2}}{-(\frac{1}{2})n^{-\frac{3}{2}}} = \frac{t^2}{2}$$

Simplificando os termos $-(\frac{1}{2})n^{-\frac{3}{2}}$ e observando que para n suficientemente grande, $\dfrac{t}{\sqrt{n}} \approx 0 \;\Rightarrow\; M_{X_i}(0) = 1, M_{X_i}^{(')}(0) = 0$ e $M_{X_i}^{('')}(0) = 1$, temos:

$$\frac{t}{2} \lim_{n\to\infty} \frac{\dfrac{M_{X_i}(\frac{t}{\sqrt{n}})M''_{X_i}(\frac{t}{\sqrt{n}})(-\frac{1}{2}tn^{-\frac{3}{2}}) - (M'_{X_i}(\frac{t}{\sqrt{n}}))^2(\frac{1}{2}tn^{-\frac{3}{2}})}{\left(M_{X_i}(\frac{t}{\sqrt{n}})\right)^2}}{-(\frac{1}{2})n^{-\frac{3}{2}}} = \frac{t^2}{2}$$

Portanto, $\lim_{n\to\infty} M_{\frac{\sum X_i}{\sqrt{n}}}(t) = \exp \lim_{n\to\infty} \ln M_{\frac{\sum X_i}{\sqrt{n}}}(t) = \exp\left(\frac{t^2}{2}\right)$, ou seja, $\dfrac{\sum X_i}{\sqrt{n}} \xrightarrow{D} X \sim N(0,1)$.

Método Delta

Suponha que conhecemos a distribuição de uma variável aleatória, mas que queremos determinar a distribuição de uma função dela. Isso também é verdade na teoria assintótica, o teorema de Slutsky's e o teorema visto em aula, imediatamente anterior a ele, são ilustrações disso. Outro resultado desse tipo é chamado de método delta. Vejamos o próximo slide!

Método Delta

Teorema 1

Seja $\{X_n\}_{n\geq 1}$ *uma sequência de variáveis aleatórias satisfazendo a seguinte convergência em distribuição:*

$$\sqrt{n}(X_n - \theta) \xrightarrow{D} N(0, \sigma^2).$$

Se g *é uma função diferenciável em* θ *e* $g'(\theta) \neq 0$, *então*

$$\sqrt{n}(g(X_n) - g(\theta)) \xrightarrow{D} N(0, [g'(\theta)]^2\sigma^2).$$

Demonstração

Vamos mostrar primeiro que $X_n \xrightarrow{P} \theta$. Seja $\varepsilon > 0$ e $m > 0$ inteiro ($m \in \mathbb{N}^*$) fixado.

$$
\begin{aligned}
P(|X_n - \theta| < \varepsilon) &= P(|\sqrt{n}(X_n - \theta)| < \varepsilon\sqrt{n}) \\
&\underset{\uparrow}{\geq} P(|\sqrt{n}(X_n - \theta)| < m)
\end{aligned}
$$

para $n \geq \left(\dfrac{m}{\varepsilon}\right)^2$

Segue que,

$$\begin{aligned}\liminf_{n\to\infty} P(|X_n-\theta|<\varepsilon) &\geq \liminf_{n\to\infty} P(|\sqrt{n}(X_n-\theta)|<m)\\ &= \lim_{n\to\infty} P(|\sqrt{n}(X_n-\theta)|<m)\\ &= P\left(|Z|<\frac{m}{\sigma}\right),\ Z\sim N(0,1)\end{aligned}$$

Usando o fato de que
$\sqrt{n}(X_n-\theta)\xrightarrow{D} N(0,\sigma^2)$

Segue que,

$$\begin{aligned}
\liminf_{n\to\infty} P(|X_n-\theta|<\varepsilon) &\geq \liminf_{n\to\infty} P(|\sqrt{n}(X_n-\theta)|<m)\\
&= \lim_{n\to\infty} P(|\sqrt{n}(X_n-\theta)|<m)\\
&= P\left(|Z|<\frac{m}{\sigma}\right),\ Z\sim N(0,1)
\end{aligned}$$

Usando o fato de que
$\sqrt{n}(X_n-\theta)\xrightarrow{D}N(0,\sigma^2)$

Assim,

$$\begin{aligned}
\liminf_{n\to\infty} P(|X_n-\theta|<\varepsilon) \geq P\left(|Z|<\frac{m}{\sigma}\right) = \Phi\left(\frac{m}{\sigma}\right)-\Phi\left(-\frac{m}{\sigma}\right)\\
= 2\Phi\left(\frac{m}{\sigma}\right)-1
\end{aligned}$$

Em resumo,

$$\liminf_{n\to\infty} P(|X_n-\theta|<\varepsilon) \geq 2\Phi\left(\frac{m}{\sigma}\right)-1,\ \forall m\in\mathbb{Z}^*$$

$$\begin{aligned}\liminf_{n\to\infty} P(|X_n-\theta|<\varepsilon) &\geq \lim_{m\to+\infty}\left[2\Phi\left(\frac{m}{\sigma}\right)-1\right]\\ &=1\end{aligned}$$

Em resumo,

$$\liminf_{n\to\infty} P(|X_n-\theta|<\varepsilon) \geq 2\Phi\left(\frac{m}{\sigma}\right)-1,\ \forall m \in \mathbb{Z}^*$$

$$\begin{aligned}\liminf_{n\to\infty} P(|X_n-\theta|<\varepsilon) &\geq \lim_{m\to+\infty}\left[2\Phi\left(\frac{m}{\sigma}\right)-1\right] \\ &= 1\end{aligned}$$

Como $\limsup \geq \liminf$, temos que

$$\limsup P(|X_n-\theta|<\varepsilon) = 1 \Rightarrow \lim_{n\to\infty} P(|X_n-\theta|<\varepsilon) = 1 \qquad (1)$$

Em resumo,

$$\liminf_{n\to\infty} P(|X_n-\theta|<\varepsilon) \geq 2\Phi\left(\frac{m}{\sigma}\right)-1,\ \forall m\in\mathbb{Z}^*$$
$$\liminf_{n\to\infty} P(|X_n-\theta|<\varepsilon) \geq \lim_{m\to+\infty}\left[2\Phi\left(\frac{m}{\sigma}\right)-1\right]$$
$$=1$$

Como $\limsup \geq \liminf$, temos que

$$\limsup P(|X_n-\theta|<\varepsilon)=1 \Rightarrow \lim_{n\to\infty} P(|X_n-\theta|<\varepsilon)=1 \qquad (1)$$

Ou seja, $X_n \xrightarrow{P} \theta$.cqd ■

Série de Taylor

Agora, lembre-se que uma série de Taylor é a série de funções da forma:

$$f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(a)}{n!},$$

Neste caso, a série acima é dita ser a série de Taylor de $f(x)$ em torno do ponto $x = a$.

Série de Taylor

Agora, lembre-se que uma série de Taylor é a série de funções da forma:

$$f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(a)}{n!},$$

Neste caso, a série acima é dita ser a série de Taylor de $f(x)$ em torno do ponto $x = a$.

Expandindo g em série de Taylor até a primeira ordem em torno de θ, temos que

$$g(x) = g(\theta) + g'(\theta)(x - \theta) + \mathcal{C}(x)(x - \theta),$$

em que $\lim_{x \to \theta} \mathcal{C}(x) = 0$.

Segue que,

$$g(x) - g(\theta) = g'(\theta)(x - \theta) + \mathcal{C}(x)(x - \theta)$$
$$\sqrt{n}\big(g(X_n) - g(\theta)\big) = \sqrt{n}(X_n - \theta)\big(g'(\theta) + \mathcal{C}(X_n)\big).$$

Para mostrar o resultado desejado, devemos mostrar que $\mathcal{C}(X_n) \xrightarrow{P} 0$. Com isso, utilizando o teorema de Slutsky, o resultado é obtido. Como $\lim_{x\to\theta} \mathcal{C}(x) = 0$, para $\varepsilon > 0, \exists\, \delta > 0$ tal que $|x - \theta| < \delta \Rightarrow |\mathcal{C}(x)| < \varepsilon$.

Ora,

- $\{|X_n - \theta| < \delta\}$: Este evento ocorre quando a variável aleatória X_n está suficientemente próxima de θ, ou seja, dentro de uma faixa de tamanho δ ao redor de θ.
- $\{|\mathcal{C}(X_n)| < \varepsilon\}$: Este evento ocorre quando o valor absoluto de $\mathcal{C}(X_n)$ está dentro de uma faixa de tamanho ε.

Como a função $\mathcal{C}(x)$ tende a 0 quando x tende a θ ($\lim_{x\to\theta} \mathcal{C}(x) = 0$), para qualquer $\varepsilon > 0$, existe um $\delta > 0$ tal que, se x estiver suficientemente próximo de θ (ou seja, se $|x - \theta| < \delta$), então $|\mathcal{C}(x)| < \varepsilon$. Dessa forma, se x pertence ao conjunto $\{|x - \theta| < \delta\}$, isso implica que x também pertence ao conjunto $\{|\mathcal{C}(x)| < \varepsilon\}$, ou seja:

$$\{|X_n - \theta| < \delta\} \subseteq \{|\mathcal{C}(X_n)| < \varepsilon\}$$

Daí,

$$\{|X_n - \theta| < \delta\} \subset \{|\mathcal{C}(X_n)| < \varepsilon\} \Rightarrow P(|X_n - \theta| < \delta) \leq P(|\mathcal{C}(X_n)| < \varepsilon)$$

Esse resultado, juntamente com (1) implica que,

$$\lim_{n\to\infty} P(|\mathcal{C}(X_n)| < \varepsilon) = 1, \text{ ou seja, } \mathcal{C}(X_n) \xrightarrow{P} 0.$$

Daí,

$$\{|X_n - \theta| < \delta\} \subset \{|\mathcal{C}(X_n)| < \varepsilon\} \Rightarrow P(|X_n - \theta| < \delta) \leq P(|\mathcal{C}(X_n)| < \varepsilon)$$

Esse resultado, juntamente com (1) implica que,

$$\lim_{n\to\infty} P(|\mathcal{C}(X_n)| < \varepsilon) = 1, \text{ ou seja, } \mathcal{C}(X_n) \xrightarrow{P} 0.$$

Portanto, como por hipótese, $\sqrt{n}(X_n - \theta) \xrightarrow{D} N(0, \sigma^2)$, temos que

$$\sqrt{n}\big(g(X_n) - g(\theta)\big) = \sqrt{n}(X_n - \theta)g'(\theta) \xrightarrow{D} N(0, [g'(\theta)]^2\sigma^2)$$

Exercício

Para 🏠

Seja $X_i \overset{\text{iid}}{\sim} Binomial(1, p),\ i = 1, \cdots, n$. Mostre que

$$\sqrt{n}\big(\operatorname{arcsen}\sqrt{\bar{X}} - \operatorname{arcsen}\sqrt{p}\big) \xrightarrow{D} N\big(0, \frac{1}{4}\big), \text{em que } \bar{X} = \sum_{i=0}^{n} \frac{X_i}{n}$$

Para 🏠

Exercícios 5.3.1 à 5.3.8, 5.3.11, 5.3.12

Referências I

CASELLA, George; BERGER, Roger L. **Statistical inference**. [S.l.]: Cengage Learning, 2021.

HOGG, RV; MCKEAN, J; CRAIG, AT. **Introduction to Mathematical Statistics**. Eighth Edition. [S.l.]: Pearson, 2019.