

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



Por que Testes de Hipóteses e Poder importam?

Decidir sob incerteza

No mundo real decidimos com dados imperfeitos: aprovar um tratamento, liberar um lote, avaliar uma política. Testes de hipóteses formalizam essa decisão, controlando o **tamanho** (α) e quantificando a capacidade de detectar efeitos reais via **poder** ($1 - \beta$).

Por que Testes de Hipóteses e Poder importam?

Decidir sob incerteza

No mundo real decidimos com dados imperfeitos: aprovar um tratamento, liberar um lote, avaliar uma política. Testes de hipóteses formalizam essa decisão, controlando o **tamanho** (α) e quantificando a capacidade de detectar efeitos reais via **poder** ($1 - \beta$).

Perguntas-motrizes da aula

- Como controlar erro tipo I e compreender erro tipo II?

Por que Testes de Hipóteses e Poder importam?

Decidir sob incerteza

No mundo real decidimos com dados imperfeitos: aprovar um tratamento, liberar um lote, avaliar uma política. Testes de hipóteses formalizam essa decisão, controlando o **tamanho** (α) e quantificando a capacidade de detectar efeitos reais via **poder** ($1 - \beta$).

Perguntas-motrizes da aula

- Como controlar erro tipo I e compreender erro tipo II?
- O que determina o **poder** e como aumentá-lo (n , σ , efeito, α)?

Por que Testes de Hipóteses e Poder importam?

Decidir sob incerteza

No mundo real decidimos com dados imperfeitos: aprovar um tratamento, liberar um lote, avaliar uma política. Testes de hipóteses formalizam essa decisão, controlando o **tamanho** (α) e quantificando a capacidade de detectar efeitos reais via **poder** ($1 - \beta$).

Perguntas-motrizes da aula

- Como controlar erro tipo I e compreender erro tipo II?
- O que determina o **poder** e como aumentá-lo (n , σ , efeito, α)?
- Qual a relação entre **teste bilateral** e **intervalo de confiança**?

Por que Testes de Hipóteses e Poder importam?

Decidir sob incerteza

No mundo real decidimos com dados imperfeitos: aprovar um tratamento, liberar um lote, avaliar uma política. Testes de hipóteses formalizam essa decisão, controlando o **tamanho** (α) e quantificando a capacidade de detectar efeitos reais via **poder** ($1 - \beta$).

Perguntas-motrizes da aula

- Como controlar erro tipo I e compreender erro tipo II?
- O que determina o **poder** e como aumentá-lo (n , σ , efeito, α)?
- Qual a relação entre **teste bilateral** e **intervalo de confiança**?
- Como interpretar corretamente o **p-valor**?

O que você levará desta aula

Ao final, você será capaz de

- Derivar/aplicar testes (Z , t , proporções, duas amostras) e obter **valores críticos**.

O que você levará desta aula

Ao final, você será capaz de

- Derivar/aplicar testes (Z , t , proporções, duas amostras) e obter **valores críticos**.
- Traçar e interpretar **curvas de poder** e seus trade-offs.

O que você levará desta aula

Ao final, você será capaz de

- Derivar/aplicar testes (Z , t , proporções, duas amostras) e obter **valores críticos**.
- Traçar e interpretar **curvas de poder** e seus trade-offs.
- Conectar decisão em teste com **IC**: incluir/excluir μ_0 .

O que você levará desta aula

Ao final, você será capaz de

- Derivar/aplicar testes (Z , t , proporções, duas amostras) e obter **valores críticos**.
- Traçar e interpretar **curvas de poder** e seus trade-offs.
- Conectar decisão em teste com **IC**: incluir/excluir μ_0 .
- Reportar **p-valor** com ênfase também em **efeito prático**.

O que você levará desta aula

Ao final, você será capaz de

- Derivar/aplicar testes (Z , t , proporções, duas amostras) e obter **valores críticos**.
- Traçar e interpretar **curvas de poder** e seus trade-offs.
- Conectar decisão em teste com **IC**: incluir/excluir μ_0 .
- Reportar **p-valor** com ênfase também em **efeito prático**.

O que você levará desta aula

Ao final, você será capaz de

- Derivar/aplicar testes (Z , t , proporções, duas amostras) e obter **valores críticos**.
- Traçar e interpretar **curvas de poder** e seus trade-offs.
- Conectar decisão em teste com **IC**: incluir/excluir μ_0 .
- Reportar **p-valor** com ênfase também em **efeito prático**.

Roteiro aplicado

Exemplos numéricos (média e proporção), cenários uni/bilaterais, comparação de níveis α , e visualização interativa do poder (*shiny*) para orientar decisões em pesquisa e indústria.

Sumário

1 Exemplos

- Exemplo 1: Teste Bilateral para a Média
- Exemplo 2: Teste Bilateral para a Média (Prático)
- Exemplo 3: Teste Bilateral para a Média
- Exemplo 4: Teste Unilateral para a Média
- Exemplo 5: Teste unilateral a direita
- Exemplo 6: Teste unilateral a esquerda
- Exemplo 7: Teste unilateral para a Proporção Binomial
- Exemplo 8: Teste Bilateral
- Exemplo 9: para Duas Amostras Independentes

2 Relação entre Testes de Hipóteses e IC

- Exemplo 10 - Distribuição Binomial
- Exemplo 1 - Distribuição Poisson
- Exemplo 2 (Valor - p)

Exemplo 1: Teste Bilateral para a Média com Variância Conhecida

Considere X uma variável aleatória com média μ e variância finita σ^2 . Queremos testar

$$H_0 : \mu = \mu_0 \quad \text{contra} \quad H_1 : \mu \neq \mu_0 \quad (1)$$

onde μ_0 é especificado. Sejam X_1, \dots, X_n uma amostra aleatória i.i.d. da distribuição de X e denotem a média e a variância amostrais por \bar{X} e S^2 , respectivamente. Vamos fazer um estudo de sua função poder.

Regra de decisão (bicaudal)

Para o teste **bilateral**, rejeitamos H_0 quando \bar{X} estiver *muito distante* de μ_0 . Assim, para as hipóteses (1), usamos a regra de decisão

$$\text{Rejeitar } H_0 \text{ em favor de } H_1 \text{ se } \bar{X} \leq h \text{ ou } \bar{X} \geq k, \quad (2)$$

onde $h < k$ são tais que

$$\alpha = P_{H_0}[\bar{X} \leq h \text{ ou } \bar{X} \geq k] = P_{H_0}[\bar{X} \leq h] + P_{H_0}[\bar{X} \geq k]. \quad (3)$$

Aproximação assintótica e regiões críticas

Pelo **TCL** e por **Slutsky**, sob H_0 temos, para n grande,

$$T_n = \frac{\sqrt{n}(\bar{X} - \mu_0)}{S} \xrightarrow{d} N(0, 1).$$

Logo, uma escolha natural é dividir α igualmente entre as duas caudas da *distribuição assintótica* de T_n :

$$P_{H_0}[T_n \leq -z_{1-\alpha/2}] = \frac{\alpha}{2} \quad \text{e} \quad P_{H_0}[T_n \geq z_{1-\alpha/2}] = \frac{\alpha}{2}. \quad (4)$$

Isso leva à regra (nível assintótico α):

$$\text{Rejeitar } H_0 \text{ em favor de } H_1 \text{ se } \left| \frac{\bar{X} - \mu_0}{S/\sqrt{n}} \right| \geq z_{1-\alpha/2}. \quad (5)$$

Aproximação assintótica e regiões críticas

Equivalentemente, em termos de \bar{X} ,

$$h \approx \mu_0 - z_{1-\alpha/2} \frac{S}{\sqrt{n}} \quad \text{e} \quad k \approx \mu_0 + z_{1-\alpha/2} \frac{S}{\sqrt{n}}.$$

Observação: Se X é exatamente Normal, então $T_n \sim t_{(n-1)}$ sob H_0 (para qualquer n) e podemos usar $t_{1-\alpha/2, (n-1)}$ no lugar de $z_{1-\alpha/2}$.

Substituindo S por σ e dado que $Z_{1-\alpha/2} = -Z_{\alpha/2}$, segue facilmente que a função poder aproximada é

$$\begin{aligned}\gamma(\mu) &= P_{\mu}(\bar{X} \leq \mu_0 - |z_{\alpha/2}|\sigma/\sqrt{n}) + P_{\mu}(\bar{X} \geq \mu_0 + |z_{\alpha/2}|\sigma/\sqrt{n}) \\ &= \Phi\left(\frac{\sqrt{n}(\mu_0 - \mu)}{\sigma} - |z_{\alpha/2}|\right) + 1 - \Phi\left(\frac{\sqrt{n}(\mu_0 - \mu)}{\sigma} + |z_{\alpha/2}|\right),\end{aligned}$$

em que $\Phi(z)$ é a função de distribuição acumulada de uma variável aleatória normal padrão. Observe que a derivada da função poder é

$$\gamma'(\mu) = \frac{\sqrt{n}}{\sigma} \left(\phi\left(\frac{\sqrt{n}(\mu_0 - \mu)}{\sigma} + |z_{\alpha/2}|\right) - \phi\left(\frac{\sqrt{n}(\mu_0 - \mu)}{\sigma} - |z_{\alpha/2}|\right) \right)$$

em que $\phi(z)$ é a função de densidade de probabilidade de uma variável aleatória normal padrão.

Exercício 4.6.2

Considere $a = \frac{\sqrt{n}(\mu_0 - \mu)}{\sigma}$ e notem que,

- Se $\mu < \mu_0$, então $a > 0$;

Exercício 4.6.2

Considere $a = \frac{\sqrt{n}(\mu_0 - \mu)}{\sigma}$ e notem que,

- Se $\mu < \mu_0$, então $a > 0$;
- Se $\mu > \mu_0$, então $a < 0$;

Exercício 4.6.2

Considere $a = \frac{\sqrt{n}(\mu_0 - \mu)}{\sigma}$ e notem que,

- Se $\mu < \mu_0$, então $a > 0$;
- Se $\mu > \mu_0$, então $a < 0$;

Podemos reescrever então a derivada da função poder como

$$\gamma'(\mu) = \frac{\sqrt{n}}{\sigma} \left(\phi(|z_{\alpha/2}| + a) - \phi(|z_{\alpha/2}| - a) \right),$$

uma vez que $\phi(x) = \phi(-x)$.

Suponha $\mu < \mu_0$

Nesse caso,

$$\begin{aligned} |z_{\alpha/2}| + a > |z_{\alpha/2}| - a &\Rightarrow -\frac{(|z_{\alpha/2}| + a)^2}{2} < -\frac{(|z_{\alpha/2}| - a)^2}{2} \\ &\Rightarrow e^{-\frac{(|z_{\alpha/2}| + a)^2}{2}} < e^{-\frac{(|z_{\alpha/2}| - a)^2}{2}} \\ &\Rightarrow \frac{\sqrt{n}}{\sigma\sqrt{2\pi}} \left[e^{-\frac{(|z_{\alpha/2}| + a)^2}{2}} - e^{-\frac{(|z_{\alpha/2}| - a)^2}{2}} \right] < 0 \\ &\Rightarrow \gamma'(\mu) < 0 \end{aligned}$$

Suponha $\mu > \mu_0$

Nesse caso,

$$\begin{aligned} |z_{\alpha/2}| + a < |z_{\alpha/2}| - a &\Rightarrow -\frac{(|z_{\alpha/2}| + a)^2}{2} > -\frac{(|z_{\alpha/2}| - a)^2}{2} \\ &\Rightarrow e^{-\frac{(|z_{\alpha/2}| + a)^2}{2}} > e^{-\frac{(|z_{\alpha/2}| - a)^2}{2}} \\ &\Rightarrow \frac{\sqrt{n}}{\sigma\sqrt{2\pi}} \left[e^{-\frac{(|z_{\alpha/2}| + a)^2}{2}} - e^{-\frac{(|z_{\alpha/2}| - a)^2}{2}} \right] > 0 \\ &\Rightarrow \gamma'(\mu) > 0 \end{aligned}$$

Conclusões (Teste bilateral, grandes amostras)

- **Pressupostos:** X_1, \dots, X_n i.i.d., $E[X] = \mu$, $V(X) = \sigma^2 < \infty$; n grande.
- **Estatística:** $T_n = \frac{\sqrt{n}(\bar{X} - \mu_0)}{S} \xrightarrow{H_0} N(0, 1)$.
- **Regra (nível α):** rejeitar H_0 se $|T_n| \geq z_{1-\alpha/2}$.
- **Função poder:** $\gamma(\mu_0) = \alpha$; $\gamma'(\mu) < 0$ se $\mu < \mu_0$ e $\gamma'(\mu) > 0$ se $\mu > \mu_0$; **consistente:** $\gamma(\mu) \rightarrow 1$ para $\mu \neq \mu_0$ quando $n \rightarrow \infty$.
- **Casos especiais:** se X é Normal, usar t_{n-1} no lugar de z ; se σ é conhecido, o teste Z é exato.
- **Prática:** para n pequeno ou caudas pesadas, preferir t , transformações, bootstrap ou testes robustos.

Exemplo 2: Teste Bilateral para a Média com Variância Conhecida

Suponha que desejamos testar

$$H_0 : \mu = 30,000 \text{ versus } H_1 : \mu \neq 30,000. \quad (6)$$

Suponha que $n = 20$ e $\alpha = 0.01$. Então, a regra de rejeição se torna

$$\text{Rejeitar } H_0 \text{ em favor de } H_1 \text{ se } \frac{\bar{X} - 30,000}{\sigma/\sqrt{20}} \geq |z_{\frac{0.01}{2}}|. \quad (7)$$

A próxima Figura exhibe a curva da função poder para este teste quando $\sigma = 5000$. Para comparação, a curva da função poder para o teste com nível $\alpha = 0.05$ também é apresentada. Veja também [shiny da função poder!](#)

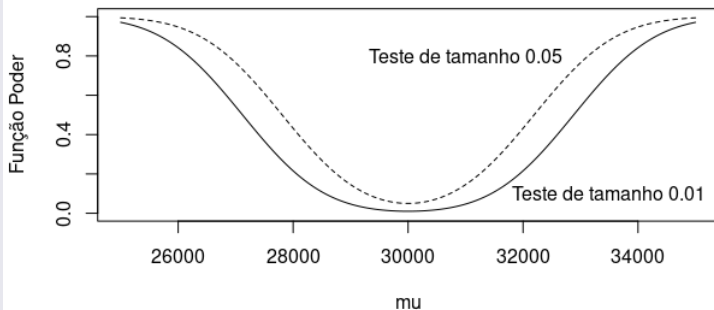


Figura: Função Poder para o teste de hipótese do exemplo

Exemplo 3: Teste Bilateral para a Média com Variância Desconhecida

Se X é Normal, então sob H_0 temos

$$T = \frac{\bar{X} - \mu_0}{S/\sqrt{n}} \sim t_{n-1}.$$

Logo, o teste bicaudal de tamanho exato α é:

$$\text{Rejeitar } H_0 \text{ se } \left| \frac{\bar{X} - \mu_0}{S/\sqrt{n}} \right| \geq t_{1-\alpha/2, n-1}.$$

Ele também possui uma curva da função poder em forma de ‘bacia’ semelhante à Figura anterior, embora não seja tão fácil de mostrar; veja Lehmann (1986).

Exemplo 4: Teste Unilateral para a Média com Variância Conhecida

Distribuição Normal:

- **Hipótese Nula (H0):** A média de uma população é igual a 100 e **Hipótese Alternativa (H1):** A média de uma população é maior que 100.
- $n = 30$, $\sigma = 15$ e $\alpha = 0,05$
- **Média real sob H1 (Suposição):** 105

Para calcular a função poder, usamos a distribuição normal padrão (Z) e a fórmula:

$$\gamma(\mu) = P\left(Z > Z_{1-\alpha} - \frac{\mu - \mu_0}{\sigma/\sqrt{n}}\right)$$

em que $Z_{1-\alpha}$ é o valor crítico para o nível de significância α .

Para $\alpha = 0,05$, $Z_{0,95} \approx 1,645$.

Agora, substituindo os valores:

$$\begin{aligned}\gamma(105) &= P\left(Z > 1,645 - \frac{105 - 100}{15/\sqrt{30}}\right) \\ &= P(Z > 1,645 - 1,826) \\ &= P(Z > -0,181)\end{aligned}$$

A probabilidade de Z ser maior que $-0,181$ é aproximadamente $0,5718$. Portanto, o poder do teste é de aproximadamente $0,572$. Logo, com essa amostra, temos cerca de $57,2\%$ de chance de rejeitar H_0 quando a média verdadeira é 105 . O erro tipo II é $\beta \approx 0,428$.

Exemplo 5: Teste Z unilateral para a média (σ conhecido)

Testar

$$H_0 : \mu \leq \mu_0 \quad \text{vs} \quad H_1 : \mu > \mu_0,$$

com $\mu_0 = 100$, $n = 36$, $\sigma = 12$, $\alpha = 0,05$. Rejeitamos H_0 se

$$Z = \frac{\bar{X} - \mu_0}{\sigma/\sqrt{n}} > z_{1-\alpha}.$$

Como $z_{1-\alpha} = z_{0,95} \approx 1,645$, o ponto crítico em termos de \bar{X} é

$$x_c = \mu_0 + z_{1-\alpha} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = 100 + 1,645 \cdot \frac{12}{6} = 100 + 3,29 = 103,29.$$

Logo, rejeite H_0 se $\bar{X} > 103,29$. Observação: $\alpha = P_{\mu=\mu_0}(\bar{X} > x_c)$.

Cálculo do Poder do Teste

O poder do teste é a probabilidade de rejeitar H_0 quando a verdadeira média μ é maior que μ_0 . Assumindo que a verdadeira média é $\mu = 105$:

$$\begin{aligned}\gamma(\mu = 105) &= P_{\mu=105}(\bar{X} > x_c) = P(\bar{X} > 103,29) \\ &= P\left(Z > \frac{(103,29 - 105) \times 6}{12}\right) = P(Z > -0,855) \\ &= 0,804\end{aligned}$$

Vejam os gráficos de poder [cliquem aqui!](#)

Exemplo 6: Teste unilateral para a Média (σ conhecido)

Vamos testar a seguinte hipótese nula e alternativa:

$$H_0 : \mu = \mu_0 = 50 \quad \text{contra} \quad H_1 : \mu < 50$$

Em que $\mu_0 = 50$ é a média sob H_0 , e μ é a média populacional desconhecida. Temos uma amostra de tamanho $n = 36$, com desvio padrão populacional $\sigma = 8$, e o nível de significância $\alpha = 0.05$.

Exemplo 6: Teste unilateral para a Média (σ conhecido)

Vamos testar a seguinte hipótese nula e alternativa:

$$H_0 : \mu = \mu_0 = 50 \quad \text{contra} \quad H_1 : \mu < 50$$

Em que $\mu_0 = 50$ é a média sob H_0 , e μ é a média populacional desconhecida. Temos uma amostra de tamanho $n = 36$, com desvio padrão populacional $\sigma = 8$, e o nível de significância $\alpha = 0.05$.

Vamos rejeitar H_0 se $\bar{X} < x_c < 50$, tal que $\alpha = P_{\text{Sob } H_0}(\bar{X} < x_c)$

$$Z_\alpha = -1,645$$

Cálculo do Valor Crítico sob H_0

$$0,05 = P_{\text{Sob } H_0}(\bar{X} < x_c) = P\left(Z < \frac{(x_c - 50) \times 6}{8}\right)$$

$$\Rightarrow \frac{(x_c - 50) \times 6}{8} = -1,645$$

$$\Rightarrow x_c = 47,81$$

Cálculo do Valor Crítico sob H_0

$$\begin{aligned}0,05 &= P_{\text{Sob } H_0}(\bar{X} < x_c) = P\left(Z < \frac{(x_c - 50) \times 6}{8}\right) \\&\Rightarrow \frac{(x_c - 50) \times 6}{8} = -1,645 \\&\Rightarrow x_c = 47,81\end{aligned}$$

Cálculo do Poder do Teste

O poder do teste é a probabilidade de rejeitar H_0 quando a verdadeira média μ é menor que μ_0 . Vamos assumir que a verdadeira média é $\mu = 47$:

$$\begin{aligned}\gamma(47) &= P_{\mu=47}(\bar{X} < x_c) = P(\bar{X} < 47,81) \\&= P\left(Z < \frac{(47,81 - 47) \times 6}{8}\right) = P(Z < 0,6075) \\&= 0,728\end{aligned}$$

Vejam os gráficos de poder [cliquem aqui!](#)

Exemplo 7: Teste unilateral para a Proporção Binomial

Vamos testar a seguinte hipótese nula e alternativa:

$$H_0 : p = p_0 = 0,4 \quad \text{contra} \quad H_1 : p > 0,4$$

O tamanho da amostra é $n = 100$, o nível de significância é $\alpha = 0,01$, e assumimos que a proporção real sob H_1 é $p = 0,55$.

Exemplo 7: Teste unilateral para a Proporção Binomial

Vamos testar a seguinte hipótese nula e alternativa:

$$H_0 : p = p_0 = 0,4 \quad \text{contra} \quad H_1 : p > 0,4$$

O tamanho da amostra é $n = 100$, o nível de significância é $\alpha = 0,01$, e assumimos que a proporção real sob H_1 é $p = 0,55$.

Vamos rejeitar H_0 se $\bar{p} > p_c > 0,4$, tal que $\alpha = P_{\text{Sob } H_0}(\bar{p} > p_c)$

$$Z_\alpha = 2,33$$

Cálculo do Valor Crítico sob H_0

$$\begin{aligned} 0,01 &= P_{\text{Sob } H_0}(\bar{p} > p_c) = P\left(Z > \frac{(p_c - 0,4) \times 10}{\sqrt{0,04 \times (1 - 0,04)}}\right) \\ \Rightarrow \frac{(p_c - 0,4) \times 10}{\sqrt{0,4 \times (1 - 0,4)}} &= 2,33 \Rightarrow p_c = 0,5141 \end{aligned}$$

Cálculo do Valor Crítico sob H_0

$$\begin{aligned} 0,01 &= P_{\text{Sob } H_0}(\bar{p} > p_c) = P\left(Z > \frac{(p_c - 0,4) \times 10}{\sqrt{0,04 \times (1 - 0,04)}}\right) \\ \Rightarrow \frac{(p_c - 0,4) \times 10}{\sqrt{0,4 \times (1 - 0,4)}} &= 2,33 \Rightarrow p_c = 0,5141 \end{aligned}$$

Cálculo do Poder do Teste

O poder do teste é a probabilidade de rejeitar H_0 quando a verdadeira proporção p é maior que 0,4. Assumindo que a verdadeira proporção é $p = 0,55$:

$$\begin{aligned} \gamma(p = 0,55) &= P_{p=0,55}(\bar{p} > p_c) = P(\bar{p} > 0,5141) \\ &= P\left(Z > \frac{(0,5141 - 0,55) \times 10}{\sqrt{0,55 \times (1 - 0,55)}}\right) = P(Z > -0,722) \\ &= 0,7648 \end{aligned}$$

Vejam os gráficos de poder [cliquem aqui!](#)

Exemplo 8: Teste Bilateral para a Média

Vamos testar:

$$H_0 : \mu = \mu_0 = 50 \quad \text{contra} \quad H_1 : \mu \neq 50$$

com $n = 36$, desvio-padrão populacional conhecido $\sigma = 10$ e nível $\alpha = 0,05$.

Exemplo 8: Teste Bilateral para a Média

Vamos testar:

$$H_0 : \mu = \mu_0 = 50 \quad \text{contra} \quad H_1 : \mu \neq 50$$

com $n = 36$, desvio-padrão populacional conhecido $\sigma = 10$ e nível $\alpha = 0,05$.

Regra de decisão e quantis

Rejeitar H_0 se $\bar{X} > k$ ou $\bar{X} < h$, com

$$\frac{\alpha}{2} = P_{H_0}(\bar{X} > k) = P_{H_0}(\bar{X} < h), \quad z_{1-\alpha/2} = 1,96.$$

Crítico do lado direito (k)

$$\begin{aligned} 0,025 &= P_{H_0}(\bar{X} > k) = P\left(Z > \frac{k - 50}{\sigma/\sqrt{n}}\right) = P\left(Z > \frac{(k - 50) \cdot 6}{10}\right) \\ \Rightarrow \frac{(k - 50) \cdot 6}{10} &= 1,96 \Rightarrow k = 50 + 1,96 \cdot \frac{10}{6} = 53,27. \end{aligned}$$

Crítico do lado direito (k)

$$\begin{aligned} 0,025 &= P_{H_0}(\bar{X} > k) = P\left(Z > \frac{k - 50}{\sigma/\sqrt{n}}\right) = P\left(Z > \frac{(k - 50) \cdot 6}{10}\right) \\ \Rightarrow \frac{(k - 50) \cdot 6}{10} &= 1,96 \Rightarrow k = 50 + 1,96 \cdot \frac{10}{6} = 53,27. \end{aligned}$$

Crítico do lado esquerdo (h)

$$\begin{aligned} 0,025 &= P_{H_0}(\bar{X} < h) = P\left(Z < \frac{h - 50}{\sigma/\sqrt{n}}\right) = P\left(Z < \frac{(h - 50) \cdot 6}{10}\right) \\ \Rightarrow \frac{(h - 50) \cdot 6}{10} &= -1,96 \Rightarrow h = 50 - 1,96 \cdot \frac{10}{6} = 46,73. \end{aligned}$$

Função poder (bicaudal)

Para $\mu \in \mathbb{R}$,

$$\gamma(\mu) = P_{\mu}(\bar{X} > k) + P_{\mu}(\bar{X} < h).$$

Função poder (bicaudal)

Para $\mu \in \mathbb{R}$,

$$\gamma(\mu) = P_{\mu}(\bar{X} > k) + P_{\mu}(\bar{X} < h).$$

Exemplo numérico: $\mu = 54$

Com $k = 53,27$, $h = 46,73$ e $\sigma/\sqrt{n} = 10/6 \approx 1,667$,

$$\begin{aligned}\gamma(54) &= P\left(Z > \frac{53,27 - 54}{1,667}\right) + P\left(Z < \frac{46,73 - 54}{1,667}\right) \\ &= P(Z > -0,438) + P(Z < -4,36).\end{aligned}$$

Como $P(Z < -4,36) \approx 0$, conclui-se

$$\gamma(54) \approx P(Z > -0,438) \approx 0,67.$$

Vejam os gráficos de poder [cliquem aqui!](#)

Exemplo 9: para Duas Amostras Independentes

Considere amostras aleatórias independentes de $N(\mu_1, \sigma^2)$ e $N(\mu_2, \sigma^2)$, respectivamente. Definimos $n = n_1 + n_2$ como o tamanho combinado da amostra e S_p^2 como o estimador combinado da variância comum, dado por

$$S_c^2 = \frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n - 2}.$$

A um nível de significância $\alpha = 0.05$, rejeitamos $H_0 : \mu_1 = \mu_2$ em favor da alternativa unilateral $H_1 : \mu_1 > \mu_2$ se

$$T = \frac{\bar{X} - \bar{Y} - 0}{S_c \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \geq t_{0.05, n-2},$$

pois, sob H_0 , T segue uma distribuição t com $n - 2$ graus de liberdade.

Relação entre Testes de Hipóteses e IC

Existe uma relação entre testes bilaterais e intervalos de confiança. Considere o teste t bilateral. Aqui, usamos a regra de rejeição com “se e somente se” substituindo “se”. Portanto, em termos de aceitação, temos Aceitar H_0 , se, e somente se,

$$\mu_0 - t_{\alpha/2, n-1} S / \sqrt{n} < \bar{X} < \mu_0 + t_{\alpha/2, n-1} S / \sqrt{n}.$$

Relação entre Testes de Hipóteses e IC

Existe uma relação entre testes bilaterais e intervalos de confiança. Considere o teste t bilateral. Aqui, usamos a regra de rejeição com “se e somente se” substituindo “se”. Portanto, em termos de aceitação, temos Aceitar H_0 , se, e somente se,

$$\mu_0 - t_{\alpha/2, n-1} S / \sqrt{n} < \bar{X} < \mu_0 + t_{\alpha/2, n-1} S / \sqrt{n}.$$

Isso pode ser facilmente demonstrado como “Aceitar H_0 se, e somente se”,

$$\mu_0 \in \left(\bar{X} - t_{\alpha/2, n-1} \frac{S}{\sqrt{n}}, \bar{X} + t_{\alpha/2, n-1} \frac{S}{\sqrt{n}} \right).$$

Ou seja, aceitamos H_0 ao nível de significância α se e somente se μ_0 está no intervalo de confiança de $(1 - \alpha)100\%$ para μ . De forma equivalente, rejeitamos H_0 ao nível de significância α se, e somente se, μ_0 não está no intervalo de confiança de $(1 - \alpha)100\%$ para μ . Isso é válido para todos os testes de hipóteses bilaterais.

Exemplo 10 - Distribuição Binomial

Suponha que X segue uma distribuição binomial com parâmetros 1 e p . Considere o teste de hipótese $H_0 : p = p_0$ contra $H_1 : p < p_0$. Seja X_1, \dots, X_n uma amostra aleatória da distribuição de X , e seja $\hat{p} = \frac{X}{n}$. Para testar H_0 versus H_1 , utilizamos uma das seguintes estatísticas:

$$Z_1 = \frac{\hat{p} - p_0}{\sqrt{p_0(1 - p_0)/n}} \leq c \text{ ou } Z_2 = \frac{\hat{p} - p_0}{\sqrt{\hat{p}(1 - \hat{p})/n}} \leq c.$$

Se o tamanho da amostra n for grande, tanto Z_1 quanto Z_2 têm distribuições normais aproximadas, desde que $H_0 : p = p_0$ seja verdadeira. Portanto, se c for definido como -1.645 , o nível de significância aproximado é $\alpha = 0.05$. Ambos os métodos fornecem resultados numéricos semelhantes.

Com uma hipótese alternativa bilateral, Z_2 fornece uma melhor relação com o intervalo de confiança para p . Ou seja, $|Z_2| < z_{\alpha/2}$ é equivalente a p_0 estar no intervalo

$$\left(\hat{p} - z_{\alpha/2} \sqrt{\frac{\hat{p}(1 - \hat{p})}{n}}, \hat{p} + z_{\alpha/2} \sqrt{\frac{\hat{p}(1 - \hat{p})}{n}} \right),$$

que é o intervalo que fornece um intervalo de confiança aproximado de $(1 - \alpha)100\%$ para p , conforme discutido na aula de Intervalos de Confiança. Vejam os gráficos de poder [cliquem aqui!](#)

Exemplo - Distribuição Poisson

Seja X_1, X_2, \dots, X_{10} uma amostra aleatória de tamanho $n = 10$ de uma distribuição de Poisson com média θ . A região crítica para testar $H_0 : \theta = 0.1$ contra $H_1 : \theta > 0.1$ é dada por $Y = \sum_{i=1}^{10} X_i \geq 3$.

A estatística Y segue uma distribuição de Poisson com média 10θ . Portanto, com $\theta = 0.1$, a média de Y é 1, o nível de significância do teste é

$$P(Y \geq 3) = 1 - P(Y \leq 2) = 1 - 0.920 = 0.080.$$

Por outro lado, se a região crítica definida por $\sum_{i=1}^{10} X_i \geq 4$ for usada, o nível de significância é

$$\alpha = P(Y \geq 4) = 1 - P(Y \leq 3) = 1 - 0.981 = 0.019.$$

Por exemplo, se um nível de significância de aproximadamente $\alpha = 0.05$ for desejado, a maioria dos estatísticos usaria um desses testes, ou seja, eles ajustariam o nível de significância para o teste mais conveniente.

Nível de Significância Observado (p-valor)

Muitos estatísticos não gostam de testes randomizados na prática. Na verdade, muitos estatísticos relatam o que são comumente chamados de níveis de significância observados ou valores-p (para valores de probabilidade). Um exemplo geral é suficiente para explicar os níveis de significância observados.

Seja X_1, \dots, X_n uma amostra aleatória de uma distribuição $N(\mu, \sigma^2)$, em que tanto μ quanto σ^2 são desconhecidos. Considere, primeiro, as hipóteses unilaterais $H_0 : \mu = \mu_0$ versus $H_1 : \mu > \mu_0$, em que μ_0 é especificado. Escreva a regra de rejeição como

$$\text{Rejeitar } H_0 \text{ em favor de } H_1, \text{ se } \bar{X} \geq k, \quad (8)$$

em que \bar{X} é a média da amostra.

Seja X_1, \dots, X_n uma amostra aleatória de uma distribuição $N(\mu, \sigma^2)$, em que tanto μ quanto σ^2 são desconhecidos. Considere, primeiro, as hipóteses unilaterais $H_0 : \mu = \mu_0$ versus $H_1 : \mu > \mu_0$, em que μ_0 é especificado. Escreva a regra de rejeição como

$$\text{Rejeitar } H_0 \text{ em favor de } H_1, \text{ se } \bar{X} \geq k, \quad (8)$$

em que \bar{X} é a média da amostra.

Anteriormente, especificamos um nível e, em seguida, resolvemos para k . Na prática, no entanto, o nível não é especificado. Em vez disso, uma vez que a amostra é observada, o valor realizado \bar{x} de \bar{X} é calculado e fazemos a pergunta: O valor \bar{x} é suficientemente grande para rejeitar H_0 em favor de H_1 ?

Para responder a isso, calculamos o valor-p, que é a probabilidade,

$$\text{valor-p} = P_{\text{Sob } H_0}(\bar{X} \geq \bar{x}).$$

Observe que este é um “nível de significância” baseado nos dados, e chamamos isso de nível de significância observado ou valor-p.

A hipótese H_0 é rejeitada em todos os níveis maiores ou iguais ao valor-p. Por exemplo, se o valor-p for 0,048 e o nível nominal α for 0,05, então H_0 será rejeitada; no entanto, se o nível nominal α for 0,01, então H_0 não será rejeitada. Em resumo, o experimentador define as hipóteses; o estatístico seleciona a estatística de teste e a regra de rejeição; os dados são observados e o estatístico relata o valor-p para o experimentador; e o experimentador decide se o valor-p é suficientemente pequeno para justificar a rejeição de H_0 em favor de H_1 . O próximo exemplo fornece uma ilustração numérica.

Exemplo (Valor - p)

Considere os dados de Darwin do Exemplo 4.5.5 do livro do Hogg (Edição 8). Os dados são um design emparelhado sobre as alturas de plantas de *Zea mays* cruzadas e autofertilizadas. Em cada um dos 15 vasos, uma planta cruzada e uma autofertilizada foram cultivadas. Os dados de interesse são as 15 diferenças emparelhadas, (cruzada - autofertilizada). Como no Exemplo, deixe X_i denotar a diferença emparelhada para o i -ésimo vaso. Deixe μ ser a verdadeira diferença média. As hipóteses de interesse são $H_0 : \mu = 0$ versus $H_1 : \mu > 0$. A regra de rejeição padronizada é

$$\text{Rejeitar } H_0 \text{ em favor de } H_1 \text{ se } T \geq k, \quad (9)$$

em que $T = \frac{\bar{X}}{S/\sqrt{15}}$, \bar{X} e S são, respectivamente, a média amostral e o desvio padrão das diferenças.

A hipótese alternativa afirma que, em média, as plantas cruzadas são mais altas do que as plantas autofertilizadas. Do Exemplo 4.5.5, a estatística do teste t tem o valor 2,15. Deixando $t(14)$ denotar uma variável aleatória com a distribuição t com 14 graus de liberdade e usando R, o valor- p para o experimento é

$$P[t(14) > 2.15] = 1 - pt(2.15, 14) = 1 - 0.9752 = 0.0248.$$

Na prática, com esse valor- p , H_0 seria rejeitada em todos os níveis maiores ou iguais a 0,0248.

Suponha que as hipóteses sejam $H_0 : \mu = \mu_0$ versus $H_1 : \mu < \mu_0$. Obviamente, o valor- p observado neste caso é

$$\text{valor-}p = P_{\text{Sob } H_0}(\bar{X} \geq \bar{x}).$$

Para a hipótese bilateral $H_0 : \mu = \mu_0$ versus $H_1 : \mu \neq \mu_0$, nossa regra de rejeição “não especificada” é

$$\text{Rejeitar } H_0 \text{ em favor de } H_1 \text{ se } \bar{X} \leq l \text{ ou } \bar{X} \geq k. \quad (10)$$

Para o valor-p, calculamos cada um dos valores-p de um lado, pegamos o menor valor-p e o dobramos. Como ilustração, no exemplo de Darwin, suponha que as hipóteses sejam $H_0 : \mu = 0$ versus $H_1 : \mu \neq 0$. Então, o valor-p é $2 \times (0,0248) = 0,0496$.

Referências I



Hogg, RV, J McKean e AT Craig (2019). *Introduction to Mathematical Statistics*.