

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO em ECONOMIA
Microeconometria – 2015/3

NOTAS DE AULA

Autor: Paulo Ferreira Naibert
Professor: Hudson Torrent

Porto Alegre
25/06/2020
Revisão: 30 de junho de 2020

1 Regressão MQO Clássico

(Wooldridge, 2010, C.4 – The Single-Equation Linear Model and OLS Estimation)

Modelo de equações lineares

O modelo populacional que estudamos é linear em seus parâmetros,

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \cdots + \beta_K x_K + u$$

onde

- y, x_1, \dots, x_K são escalares aleatórios e observáveis (i.e., conseguimos observá-los em uma amostra aleatória da população);
- u é o *random disturbance* não observável, ou erro;
- $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_K$ são parâmetros (constantes) que gostaríamos de estimar.

Por conveniência, escrevemos a equação populacional em forma de vetor:

$$y = \mathbf{x}\boldsymbol{\beta} + u$$

onde

- $\mathbf{x} \equiv (x_1, \dots, x_K)$ é um vetor $1 \times K$ de regressores;
- $\boldsymbol{\beta} \equiv (\beta_1, \dots, \beta_K)'$ é um vetor $K \times 1$;
- Uma vez que a maioria das equações contém um intercepto, assumiremos que $x_1 \equiv 1$, visto que essa hipótese deixa a interpretação mais fácil.

Amostra Aleatória

Assumimos que conseguimos obter uma amostra aleatória de tamanho N da população para estimarmos $\boldsymbol{\beta}$. Dessa forma, $\{(\mathbf{x}_i, y_i); i = 1, 2, \dots, N\}$ são tratados como variáveis aleatória independentes, identicamente distribuídas, onde \mathbf{x}_i é $1 \times K$ e y_i é escalar. Para cada observação i , temos:

$$y_i = \mathbf{x}_i \boldsymbol{\beta} + u_i.$$

onde \mathbf{x}_i é um vetor $1 \times K$ de regressores.

Empilhando as N observações, obtemos a **notação matricial**:

$$\mathbf{y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} + \mathbf{u}$$

- \mathbf{y} é um vetor $N \times 1$;
- \mathbf{X} é uma matriz $N \times K$ de regressores, com N vetores, \mathbf{x}_i , de dimensão $1 \times K$ empilhados;
- $\boldsymbol{\beta}$ é um vetor $K \times 1$;
- \mathbf{u} é um vetor $N \times 1$;

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_N \end{bmatrix}; \quad \mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{x}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1K} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{N1} & x_{N2} & \dots & x_{NK} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_N \end{bmatrix}.$$

Hipóteses

H1 Estamos usando o modelo correto:

$$y_i = \mathbf{x}_i \boldsymbol{\beta} + u_i, \quad i = 1, \dots, N;$$

H2 X é **não** estocástica;

H3

H2' X é estocástica;

H3'

$$X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iT})$$

Um exemplo de equação com intercepto mais 3 variáveis num intervalo de tempo com $T = 5$:

$$\begin{bmatrix} y_{i1} \\ y_{i2} \\ y_{i3} \\ y_{i4} \\ y_{i5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_{1i1} & x_{2i1} & x_{3i1} \\ 1 & x_{1i2} & x_{2i2} & x_{3i2} \\ 1 & x_{1i3} & x_{2i3} & x_{3i3} \\ 1 & x_{1i4} & x_{2i4} & x_{3i4} \\ 1 & x_{1i5} & x_{2i5} & x_{3i5} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \end{bmatrix}$$

para $i = 1, \dots, N$. Podemos generalizar o modelo acima para K variáveis e T períodos de tempo.

Hipóteses

Para implementarmos o estimador de **GLS** precisamos das seguintes hipóteses:

1. $E(X_i \otimes \mathbf{u}_i) = 0$.

Para SGLS ser consistente, precisamos que \mathbf{u}_i não seja correlacionada com nenhum elemento de X_i .

2. Ω é positiva definida (para ter inversa). $E(X_i' \Omega^{-1} X_i)$ é **não** singular (para ter inversa).

Onde, Ω é a seguinte matriz **simétrica**, positiva-definida:

$$\Omega = E(\mathbf{u}_i \mathbf{u}_i').$$

Estimação

Agora, transformamos o sistema de equações ao realizarmos a pré-multiplicação do sistema por $\Omega^{-1/2}$:

$$\begin{aligned} \Omega^{-1/2} \mathbf{y}_i &= \Omega^{-1/2} X_i \boldsymbol{\beta} + \Omega^{-1/2} \mathbf{u}_i \\ \mathbf{y}_i^* &= X_i^* \boldsymbol{\beta} + \mathbf{u}_i^* \end{aligned}$$

Estimando a equação acima por **SOLS**:

$$\begin{aligned} \beta^{SOLS} &= \left(\sum_{i=1} X_i^{*'} X_i^* \right)^{-1} \left(\sum_{i=1} X_i^{*'} \mathbf{y}_i^* \right) \\ &= \left(\sum_{i=1} X_i' \Omega^{-1/2} \Omega^{-1/2} X_i \right)^{-1} \left(\sum_{i=1} X_i' \Omega^{-1/2} \Omega^{-1/2} \mathbf{y}_i \right) \\ &= \left(\sum_{i=1} X_i' \Omega^{-1} X_i \right)^{-1} \left(\sum_{i=1} X_i' \Omega^{-1} \mathbf{y}_i \right) \end{aligned}$$

FSGLS: SGLS Factível

Para obtermos β^{SGLS} precisamos conhecer Ω , o que não ocorre na prática. Então, precisamos estimar Ω com um estimador consistente. Para tanto usamos um procedimento de dois passos:

1. Estimar $\mathbf{y}_i = X_i\beta + \mathbf{u}_i$ via **SOLS** e guardar o resíduo estimado $\hat{\mathbf{u}}_i$.
2. Estimar Ω com o seguinte estimador $\hat{\Omega}$:

$$\hat{\Omega} = N^{-1} \sum_{i=1}^N \mathbf{u}_i \mathbf{u}_i'$$

Com a estimativa $\hat{\Omega}$ feita, podemos obter β^{FSGLS} pela fórmula do β^{SGLS} :

$$\beta^{FGLS} = \left[\sum_i X_i' \hat{\Omega}^{-1} X_i \right]^{-1} \left[\sum_i X_i' \hat{\Omega}^{-1} \mathbf{y}_i \right]$$

Empilhando as N observações:

$$\beta^{FGLS} = \left[X \left(I_N \otimes \hat{\Omega}^{-1} \right) X' \right]^{-1} \left[X' \left(I_N \otimes \hat{\Omega}^{-1} \right) \mathbf{y} \right]$$

Reescrevendo a equação acima:

$$\begin{aligned} \beta^{FGLS} &= \left[X \left(I_N \otimes \hat{\Omega}^{-1} \right) X' \right]^{-1} \left[X' \left(I_N \otimes \hat{\Omega}^{-1} \right) (X\beta + u) \right] \\ &= \left[X \left(I_N \otimes \hat{\Omega}^{-1} \right) X' \right]^{-1} \left\{ \left[X' \left(I_N \otimes \hat{\Omega}^{-1} \right) X \right] \beta + \left[X' \left(I_N \otimes \hat{\Omega}^{-1} \right) u \right] \right\} \\ &= \beta + \left[X \left(I_N \otimes \hat{\Omega}^{-1} \right) X' \right]^{-1} \left[X' \left(I_N \otimes \hat{\Omega}^{-1} \right) u \right] \end{aligned}$$

Valor Esperado

$$E(\beta^{FGLS}) = \beta + \left[X \left(I_N \otimes \hat{\Omega}^{-1} \right) X' \right]^{-1} \left[X' \left(I_N \otimes \hat{\Omega}^{-1} \right) u \right]$$

Concluimos que, se $\hat{\Omega} \xrightarrow{p} \Omega$, então, $\beta^{FSGLS} \xrightarrow{p} \beta$,

Variância

$$\begin{aligned} Var(\beta^{FGLS}) &= \left[X \left(I_N \otimes \hat{\Omega}^{-1} \right) X' \right]^{-1} \left[X' \left(I_N \otimes \hat{\Omega}^{-1} \right) u \right] \left\{ \left[X \left(I_N \otimes \hat{\Omega}^{-1} \right) X' \right]^{-1} \left[X' \left(I_N \otimes \hat{\Omega}^{-1} \right) u \right] \right\}' \\ &= \left[X \left(I_N \otimes \hat{\Omega}^{-1} \right) X' \right]^{-1} \left[X' \left(I_N \otimes \hat{\Omega}^{-1} \right) u u' \left(I_N \otimes \hat{\Omega}^{-1} \right) X \right] \left[X \left(I_N \otimes \hat{\Omega}^{-1} \right) X' \right]^{-1} \end{aligned}$$

Tirando o valor Esperado e supondo que:

$$E(X_i \Omega^{-1} u_i u_i' X_i) = E(X_i \Omega^{-1})$$

temos:

$$E \left[X' \left(I_N \otimes \hat{\Omega}^{-1} \right) u u' \left(I_N \otimes \hat{\Omega}^{-1} \right)' X \right] = E(X' \Omega^{-1} X)$$

e temos:

$$Var(\beta^{FSGLS}) = \left[E(X' \Omega^{-1} X) \right]^{-1}.$$

2 Endogeneity and GMM

Questão 2: Explique o problema de endogeneidade. Ressalte quais características um bom instrumento deve possuir. A partir da explicação, motive e estabeleça o estimador **GMM** para dados em painel. Qual a variância assintótica desse estimador? Qual a escolha ótima de W ? Indique quem é W a fim de que o estimador de GMM coincida com o estimador de Variáveis Instrumentais.

Modelo

No seguinte modelo *cross-section*:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} + \varepsilon_i ; \quad i = 1, \dots, N. \quad (2.1)$$

A variável explicativa x_k é dita **endógena** se ela for correlacionada com erro. Se x_k for não correlacionada com o erro, então x_k é dita **exógena**.

Endogeneidade surge, normalmente, de três maneiras diferentes:

1. Variável Omitida;
2. Simultaneidade;
3. Erro de Medida.

No modelo (2.1) vamos supor:

- x_1 é exógena.
- x_2 é endógena.

Hipóteses

Assim, precisamos encontrar um instrumento z_i para x_2 , uma vez que queremos estimar β_0 , β_1 e β_2 de maneira consistente. Para z_i ser um bom instrumento precisamos que z tenha:

1. $Cov(z, \varepsilon) = 0 \implies z$ é exógena em (2.1).
2. $Cov(z, x_2) \neq 0 \implies$ correlação com x_2 após controlar para outras variáveis.

Estimação

Indo para o problema de dados de painel, temos:

$$\mathbf{y}_i = \mathbf{X}_i \boldsymbol{\beta} + \mathbf{u}_i ; \quad i = 1, \dots, N. \quad (2.2)$$

onde \mathbf{y}_i é um vetor $T \times 1$, \mathbf{X}_i é uma matriz $T \times K$, $\boldsymbol{\beta}$ é o vetor de coeficientes $K \times 1$, \mathbf{u}_i é o vetor de erros $T \times 1$.

Se é verdade que há endogeneidade em (2.2), então:

$$E(\mathbf{X}_i' \mathbf{u}_i) \neq 0$$

Definimos \mathbf{Z}_i como uma matriz $T \times L$ com $L \geq K$ de variáveis exógenas (incluindo o instrumento). Queremos acabar com a endogeneidade, ou seja:

$$E(\mathbf{Z}_i' \mathbf{u}_i) = 0$$

Supondo $L = K$ (apenas substituímos a variável endógena por um instrumento).

$$\begin{aligned}
E[Z_i'(\mathbf{y}_i - X_i\boldsymbol{\beta})] &= 0 \\
E(Z_i'\mathbf{y}_i) - E(Z_i'X_i)\boldsymbol{\beta} &= 0 \\
E(Z_i'\mathbf{y}_i) &= E(Z_i'X_i)\boldsymbol{\beta} \\
\boxed{\boldsymbol{\beta} = [E(Z_i'X_i)]^{-1} [E(Z_i'\mathbf{y}_i)]}
\end{aligned}$$

Se Usarmos estimadores amostrais:

$$\begin{aligned}
\hat{\boldsymbol{\beta}} &= \left[N^{-1} \sum_{i=1}^N Z_i'X_i \right]^{-1} \left[N^{-1} \sum_{i=1}^N Z_i'\mathbf{y}_i \right] \\
\boxed{\hat{\boldsymbol{\beta}} &= (Z'X)^{-1}(Z'\mathbf{y})}
\end{aligned}$$

Se $L > K$, vamos considerar:

$$\text{Min}_{\boldsymbol{\beta}} E(Z_i\mathbf{u}_i)^2$$

onde:

$$\begin{aligned}
E(Z_i\mathbf{u}_i)^2 &= E[(Z_i\mathbf{u}_i)'(Z_i\mathbf{u}_i)] = (Z'\mathbf{y} - Z'X\boldsymbol{\beta})'(Z'\mathbf{y} - Z'X\boldsymbol{\beta}) \\
&= \mathbf{y}'ZZ'\mathbf{y} - \mathbf{y}'ZZ'X\boldsymbol{\beta} - \boldsymbol{\beta}'X'ZZ'\mathbf{y} + \boldsymbol{\beta}'X'ZZ'X\boldsymbol{\beta}
\end{aligned}$$

Derivando em relação em $\boldsymbol{\beta}$ e igualando a zero:

$$\begin{aligned}
-2\mathbf{y}'ZZ'X + 2\boldsymbol{\beta}'X'ZZ'X &= 0 \\
\boldsymbol{\beta}'X'ZZ'X &= \mathbf{y}'ZZ'X \\
\boldsymbol{\beta}' &= (\mathbf{y}'ZZ'X)(X'ZZ'X)^{-1} \\
\boxed{\boldsymbol{\beta} &= (X'ZZ'X)^{-1}(X'ZZ'\mathbf{y})}
\end{aligned}$$

Um estimador mais eficiente pode ser encontrado fazendo:

$$\text{Min}_{\boldsymbol{\beta}} E[(Z_i'\mathbf{y} - Z'X\boldsymbol{\beta})'W(Z_i'\mathbf{y} - Z'X\boldsymbol{\beta})].$$

Escolhendo \widehat{W} , a priori, temos:

$$\text{Min}_{\boldsymbol{\beta}} \left\{ \mathbf{y}'Z\widehat{W}Z'\mathbf{y} - \mathbf{y}'Z\widehat{W}Z'X\boldsymbol{\beta} - \boldsymbol{\beta}'X'Z\widehat{W}Z'\mathbf{y} + \boldsymbol{\beta}'X'Z\widehat{W}Z'X\boldsymbol{\beta} \right\}$$

Derivando em relação em $\boldsymbol{\beta}$ e igualando a zero:

$$\begin{aligned}
-2\mathbf{y}'Z\widehat{W}Z'X + 2\boldsymbol{\beta}'X'Z\widehat{W}Z'X &= 0 \\
\boldsymbol{\beta}'X'Z\widehat{W}Z'X &= \mathbf{y}'Z\widehat{W}Z'X \\
\boldsymbol{\beta}' &= (\mathbf{y}'Z\widehat{W}Z'X)(X'Z\widehat{W}Z'X)^{-1} \\
\boxed{\boldsymbol{\beta}^{GMM} &= (X'Z\widehat{W}'Z'X)^{-1}(X'Z\widehat{W}'Z'\mathbf{y})}
\end{aligned}$$

Valor Esperado

$$\boxed{E(\boldsymbol{\beta}^{GMM}) = \boldsymbol{\beta} + E[(X'Z\widehat{W}'Z'X)^{-1}(X'Z\widehat{W}'Z'\mathbf{u})]}.$$

Variância

$$\begin{aligned}
Var(\beta^{GMM}) &= E \left\{ \left[(X'Z\widehat{W}'Z'X)^{-1}(X'Z\widehat{W}'Z'\mathbf{u}) \right] \left[(X'Z\widehat{W}'Z'X)^{-1}(X'Z\widehat{W}'Z'\mathbf{u}) \right]' \right\} \\
&= E \left\{ (X'Z\widehat{W}'Z'X)^{-1} X'Z\widehat{W}'Z' \mathbf{u} \mathbf{u}' Z\widehat{W}Z'X (X'Z\widehat{W}Z'X)^{-1} \right\}.
\end{aligned}$$

Definindo $\Delta = E(Z'\mathbf{u}\mathbf{u}'Z)$ com $\Delta = W^{-1}$:

$$\begin{aligned}
Var(\beta^{GMM}) &= E \left\{ (X'Z\widehat{W}'Z'X)^{-1} X'Z\widehat{W}'W^{-1}\widehat{W}Z'X (X'Z\widehat{W}Z'X)^{-1} \right\} \\
&= E \left\{ (X'Z\widehat{W}'Z'X)^{-1} (X'Z\widehat{W}'Z'X) (X'Z\widehat{W}Z'X)^{-1} \right\}.
\end{aligned}$$

$$\boxed{Var(\beta^{GMM}) = E \left[(X'Z\widehat{W}Z'X)^{-1} \right]}.$$

Se tivéssemos definido $W = (Z'Z)^{-1}$, teríamos β^{2SLS} .

3 Random Effects (RE, EA)

Questão 3: Usando o problema de variável omitida como motivação (heterogeneidade não observada), explique o modelo de **Efeitos Aleatórios** para dados em painel. Explícite as hipóteses necessárias e indique o estimador apropriado para esse modelo, enfatizando as características do estimador GLS. Como podemos fazer inferência nesse caso?

Modelo

O modelo linear de **efeitos não observados**:

$$y_{it} = \mathbf{x}_{it}\boldsymbol{\beta} + c_i + u_{it}, \quad (3.1)$$

onde $t = 1, \dots, T$ e $i = 1, \dots, N$.

O modelo contém explicitamente um componente não observado que não varia no tempo c_i . Abordamos esse componente como parte do erro, não como parâmetro a ser estimado. Para a análise de **Efeitos Aleatórios, (EA) ou (RE)**, supomos que os regressões \mathbf{x}_{it} são **não correlacionados** com c_i , mas fazemos hipóteses mais restritas que o **POLS**; pois assim exploramos a presença de **correlação serial** do erro composto por GLS e garantimos a consistência do estimador de FGLS.

Podemos reescrever (3.1) como:

$$y_{it} = \mathbf{x}_{it}\boldsymbol{\beta} + v_{it}, \quad (3.2)$$

onde $t = 1, \dots, T$, $i = 1, \dots, N$ e $\boxed{v_{it} = c_i + u_{it}}$ é o erro composto.

Agora, vamos empilhar os t 's e reescrever (3.2) como:

$$\mathbf{y}_i = \mathbf{X}_i\boldsymbol{\beta} + \mathbf{v}_i, \quad (3.3)$$

onde $i = 1, \dots, N$ e $\boxed{\mathbf{v}_i = c_i\mathbf{1}_T + \mathbf{u}_i}$.

Hipóteses de $\hat{\boldsymbol{\beta}}^{RE}$

As Hipóteses que usamos para $\hat{\boldsymbol{\beta}}^{RE}$ são:

1. Usamos o modelo correto e c_i não é endógeno.

a) $E(u_{it} | x_{i1}, \dots, x_{iT}, c_i) = 0, i = 1, \dots, N.$

b) $E(c_{it} | x_{i1}, \dots, x_{iT}) = E(c_i) = 0, i = 1, \dots, N.$

2. Posto completo de $E(\mathbf{X}_i'\boldsymbol{\Omega}^{-1}\mathbf{X}_i)$.

Definindo a matriz $T \times T$, $\boxed{\boldsymbol{\Omega} \equiv E(\mathbf{v}_i\mathbf{v}_i')}$, queremos que $E(\mathbf{X}_i\boldsymbol{\Omega}^{-1}\mathbf{X}_i)$ tenha posto completo (posto = K).

A matriz $\boldsymbol{\Omega}$ é simétrica $\boldsymbol{\Omega}' = \boldsymbol{\Omega}$ e positiva definida $\det(\boldsymbol{\Omega}) > 0$. Assim podemos achar $\boldsymbol{\Omega}^{1/2}$ e $\boldsymbol{\Omega}^{-1/2}$ com $\boldsymbol{\Omega} = \boldsymbol{\Omega}^{1/2}\boldsymbol{\Omega}^{1/2}$ e $\boldsymbol{\Omega}^{-1} = \boldsymbol{\Omega}^{-1/2}\boldsymbol{\Omega}^{-1/2}$.

Estimação

Premultiplicando (3.3) por $\Omega^{-1/2}$ de dois lados, temos:

$$\begin{aligned}\Omega^{-1/2}\mathbf{y}_i &= \Omega^{-1/2}X_i\boldsymbol{\beta} + \Omega^{-1/2}\mathbf{v}_i \\ \mathbf{y}_i^* &= X_i^*\boldsymbol{\beta} + \mathbf{v}_i^*,\end{aligned}\tag{3.4}$$

Estimando o modelo acima por POLS:

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\beta}^{POLS} &= \left(\sum_{i=1}^N X_i^{*'} X_i^* \right)^{-1} \left(\sum_{i=1}^N X_i^{*'} \mathbf{y}_i^* \right) \\ &= \left(\sum_{i=1}^N X_i' \Omega^{-1} X_i \right)^{-1} \left(\sum_{i=1}^N X_i' \Omega^{-1} \mathbf{y}_i \right) \\ &= (X'(I_N \otimes \Omega^{-1})X)^{-1} (X'(I_N \otimes \Omega^{-1})\mathbf{y}).\end{aligned}\tag{3.5}$$

O problema, agora, é estimar Ω . Supondo:

- $E(u_{it}u_{it}) = \sigma_u^2$;
- $E(u_{it}u_{is}) = 0$.

Como $\Omega = E(\mathbf{v}_i \mathbf{v}_i') = E[(c_i \mathbf{1}_T + \mathbf{u}_i)(c_i \mathbf{1}_T + \mathbf{u}_i)']$, temos que:

$$\begin{aligned}E(v_{it}v_{it}) &= E(c_i^2 + 2c_i u_{it} + u_{it}^2) = \sigma_c^2 + \sigma_u^2 \\ E(v_{it}v_{is}) &= E[(c_i + u_{it})(c_i + u_{is})] = E(c_i^2 + c_i u_{is} + u_{it}c_i + u_{it}u_{is}) = \sigma_c^2.\end{aligned}$$

Assim,

$$\Omega = E(\mathbf{v}_i \mathbf{v}_i') = \sigma_u^2 I_T + \sigma_c^2 \mathbf{1}_T \mathbf{1}_T'$$

onde $\sigma_u^2 I_T$ é uma matriz diagonal, e $\sigma_c^2 \mathbf{1}_T \mathbf{1}_T'$ é uma matriz com todos os elementos iguais a σ_c^2 .

Agora, rodando POLS em (3.3) e guardando os resíduos, temos:

$$\hat{v}_{it}^{POLS} = \hat{y}_{it}^{POLS} - \mathbf{x}_{it} \hat{\boldsymbol{\beta}}^{POLS}$$

e conseguimos estimar σ_v^2 e σ_c^2 por estimadores amostrais:

- como $\sigma_v^2 = E(v_{it}^2)$:

$$\hat{\sigma}_v^2 = (NT - K)^{-1} \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \hat{v}_{it}^2$$

- como $\sigma_c^2 = E(v_{it}v_{is})$:

$$\hat{\sigma}_c^2 = \left[N \frac{T(T-1)}{2} - K \right]^{-1} \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{T-1} \sum_{s=t+1}^T \hat{v}_{it} \hat{v}_{is}$$

- N indivíduos;
- T elementos da diagonal principal de Ω
- $\frac{T(T-1)}{2}$ elementos da matriz triangular superior dos elementos fora da diagonal.
- K regressores.

Agora que temos $\hat{\sigma}_v^2$ e $\hat{\sigma}_c^2$ podemos achar $\hat{\sigma}_u^2$ pela equação $\hat{\sigma}_u^2 = \hat{\sigma}_v^2 - \hat{\sigma}_c^2$. Dessa forma, achamos os T^2 elementos de $\hat{\Omega}$, e podemos escrever:

$$\hat{\Omega} = \hat{\sigma}_u^2 I_T + \hat{\sigma}_c^2 \mathbf{1}_T \mathbf{1}_T'$$

Com $\hat{\Omega}$ estimado, reescrevemos (3.5) como:

$$\boldsymbol{\beta}^{RE} = \left[X'(I_N \otimes \hat{\Omega}^{-1})X \right]^{-1} \left[X'(I_N \otimes \hat{\Omega}^{-1})\mathbf{y} \right].\tag{3.6}$$

Valor Esperado

$$E(\boldsymbol{\beta}^{RE}) = \boldsymbol{\beta} + \left[X'(I_N \otimes \hat{\Omega}^{-1})X \right]^{-1} \left[X'(I_N \otimes \hat{\Omega}^{-1})\mathbf{v} \right].$$

Variância

$$Var(\boldsymbol{\beta}^{RE}) = E \left\{ \left[X'(I_N \otimes \hat{\Omega}^{-1})X \right]^{-1} \left[X'(I_N \otimes \hat{\Omega}^{-1})\mathbf{v}\mathbf{v}'(I_N \otimes \hat{\Omega}^{-1})'X \right] \left[X'(I_N \otimes \hat{\Omega}^{-1})X \right] \right\},$$

como $E(\mathbf{v}_i\mathbf{v}_i') = \Omega$,

$$Var(\boldsymbol{\beta}^{RE}) = E \left[X'(I_N \otimes \hat{\Omega}^{-1})X \right].$$

4 Fixed Effects (EF, FE)

Questão 4: Usando o problema de variável omitida como motivação (heterogeneidade não observada), explique o modelo de **Efeitos Fixos** para dados em painel. Explícite as hipóteses necessárias e indique o estimador apropriado para esse modelo. Como podemos fazer inferência nesse caso? Como podemos fazer inferência robusta nesse caso?

Modelo

O modelo linear de **efeitos não observados**:

$$y_{it} = \mathbf{x}_{it}\boldsymbol{\beta} + c_i + u_{it}, \quad (4.1)$$

onde $t = 1, \dots, T$ e $i = 1, \dots, N$.

O modelo contém explicitamente um componente não observado que não varia no tempo c_i . Abordamos esse componente como parte do erro, não como parâmetro a não observado. No caso da análise de **Efeitos Fixos (EF, FE)**, permitimos que esse componente c_i seja correlacionado com \mathbf{x}_{it} . Assim, se decidíssemos estimar o modelo (4.1) por POLS, ignorando c_i , teríamos problemas de inconsistência devido a **endogeneidade**.

As T equações do modelo (4.1) podem ser reescritas como:

$$\mathbf{y}_i = X_i\boldsymbol{\beta} + c_1\mathbf{1}_T + \mathbf{u}_i, \quad (4.2)$$

com $\mathbf{v}_i = c_i\mathbf{1}_T + \mathbf{u}_i$ sendo os erros compostos.

Matriz M^0

Definimos a matriz M^0 como:

$$M^0 = I_T - T^{-1}\mathbf{1}_T\mathbf{1}_T' = I_T - \mathbf{1}_T(\mathbf{1}_T'\mathbf{1}_T)^{-1}\mathbf{1}_T'.$$

A matriz M^0 é idempotente e simétrica.

$$M^0\mathbf{x} = \mathbf{x} - \bar{x}\mathbf{1}_T = \ddot{\mathbf{x}}.$$

Podemos transformar o modelo (4.3) ao premultiplicarmos todo o modelo por M^0 .

$$M^0\mathbf{y}_i = M^0X_i\boldsymbol{\beta} + M^0(c_1\mathbf{1}_T) + M^0\mathbf{u}_i, \quad i = 1, \dots, N.$$

$$M^0(c_1\mathbf{1}_T) = (I_T - T^{-1}\mathbf{1}_T\mathbf{1}_T')c_1\mathbf{1}_T = c_1\mathbf{1}_T - T^{-1}c_1\mathbf{1}_T\mathbf{1}_T'\mathbf{1}_T = c_1\mathbf{1}_T - c_1\mathbf{1}_T \implies \boxed{M^0(c_1\mathbf{1}_T) = 0}$$

$$\ddot{\mathbf{y}}_i = \ddot{X}_i\boldsymbol{\beta} + \ddot{\mathbf{u}}_i, \quad i = 1, \dots, N. \quad (4.3)$$

Estimação POLS

Aplicando POLS no modelo (4.3)

$$\boxed{\boldsymbol{\beta}^{FE} = \left[\sum_{i=1}^N \ddot{X}_i'\ddot{X}_i \right]^{-1} \left[\sum_{i=1}^N \ddot{X}_i'\ddot{\mathbf{y}}_i \right]} \quad (4.4)$$

Hipóteses

As Hipóteses que usamos para $\hat{\beta}^{FE}$ são:

FE.1: Exogeneidade Estrita: $E(u_{it} | \mathbf{x}_{i1}, \dots, \mathbf{x}_{iT}, c_i) = 0$, para $t = 1, \dots, T$ e $i = 1, \dots, N$.

FE.2: Posto completo de $E(X_i' \Omega^{-1} X_i)$ (para inverter a matriz). $\text{posto}[E(X_i' \Omega^{-1} X_i)] = K$.

FE.3: Homoscedasticidade: $E(\mathbf{u}_i \mathbf{u}_i' | X_i, c_i) = \sigma_u^2 I_T$.

Valor Esperado

Usando **FE.1** e **FE.2**, apenas.

$$E(\beta^{FE}) = \beta + E \left[\left(\sum_{i=1}^N \ddot{X}_i' \ddot{X}_i \right)^{-1} \left(\sum_{i=1}^N \ddot{X}_i' \ddot{\mathbf{u}}_i \right) \right]$$

$$E(\beta^{FE}) = \beta + E \left[(\ddot{X}' \ddot{X})^{-1} (\ddot{X}' \ddot{\mathbf{u}}) \right]$$

Sabendo que $\ddot{X} = (I_N \otimes M^0)X$ e $\ddot{\mathbf{u}} = (I_N \otimes M^0)\mathbf{u}$, definimos:

$$E(\beta^{FE}) = \beta + E \left\{ [X'(I_N \otimes M^0)(I_N \otimes M^0)X]^{-1} [X'(I_N \otimes M^0)(I_N \otimes M^0)\mathbf{u}] \right\}$$

$$E(\beta^{FE}) = \beta + E \left\{ [X'(I_N \otimes M^0)X]^{-1} [X'(I_N \otimes M^0)\mathbf{u}] \right\}$$

Variância

Usamos a variância do estimador para inferência. Usando **FE.1** e **FE.2**, apenas:

$$\text{Var}(\beta^{FE}) = E \left[(\ddot{X}' \ddot{X})^{-1} (\ddot{X}' \ddot{\mathbf{u}}) (\ddot{\mathbf{u}}' \ddot{X}) (\ddot{X}' \ddot{X})^{-1} \right]$$

Pão:

$$E \left[(\ddot{X}' \ddot{X})^{-1} \right] = E \left\{ [X'(I_N \otimes M^0)(I_N \otimes M^0)X]^{-1} \right\}$$

$$= E \left\{ [X'(I_N \otimes M^0)X]^{-1} \right\}$$

Recheio:

$$E \left[(\ddot{X}' \ddot{\mathbf{u}}) (\ddot{\mathbf{u}}' \ddot{X}) \right] = E \left[X'(I_N \otimes M^0)(I_N \otimes M^0) \mathbf{u} \mathbf{u}' (I_N \otimes M^0)(I_N \otimes M^0) X \right]$$

$$= E \left[X'(I_N \otimes M^0) \mathbf{u} \mathbf{u}' (I_N \otimes M^0) X \right]$$

$$\text{Var}(\beta^{FE}) = \text{Pão Recheio Pão}$$

$$\text{Var}(\beta^{FE}) = E \left\{ [X'(I_N \otimes M^0)X]^{-1} \right\} E \left[X'(I_N \otimes M^0) \mathbf{u} \mathbf{u}' (I_N \otimes M^0) X \right] E \left\{ [X'(I_N \otimes M^0)X]^{-1} \right\}$$

Variância sob Homocedasticidade

Usando **FE.3**, temos

Recheio':

$$E \left[X'(I_N \otimes M^0) \right] \sigma_u^2 I_{NT} E \left[(I_N \otimes M^0) X \right] = \sigma_u^2 E \left[X'(I_N \otimes M^0) X \right]$$

$(I_N \otimes M^0)$ é uma matrix de dimensão $NT \times NT$, visto que I_N é $N \times N$ e M^0 é $T \times T$.

$$Var(\beta^{FE}) = \text{Pão Recheio'} \text{ Pão}$$

$$= E \left\{ \left[X'(I_N \otimes M^0) X \right]^{-1} \right\} \sigma_u^2 E \left[X'(I_N \otimes M^0) X \right] E \left\{ \left[X'(I_N \otimes M^0) X \right]^{-1} \right\}$$

$$= E \left\{ \left[X'(I_N \otimes M^0) X \right]^{-1} \right\} \sigma_u^2 I_{NT}$$

$$\boxed{Var(\beta^{FE}) = \sigma_u^2 \cdot E \left[X'(I_N \otimes M^0) X \right]}$$

5 First Difference (FD, PD)

Questão 5: Usando o problema de variável omitida como motivação (heterogeneidade não observada), explique o modelo de **Primeira Diferença** para dados em painel. Explícite as hipóteses necessárias e indique o estimador apropriado para esse modelo. Como podemos fazer inferência nesse caso? Como podemos fazer inferência robusta nesse caso?

Modelo

O modelo linear de **efeitos não observados**:

$$y_{it} = \mathbf{x}_{it}\boldsymbol{\beta} + c_i + u_{it}, \quad (5.1)$$

para $t = 1, \dots, T$ e $i = 1, \dots, N$.

O modelo contém explicitamente um componente não observado, c_i , que não varia no tempo. Tratamos o componente não observado como parte do erro, não como parâmetro a ser estimado. Aqui permitimos que c_i seja correlacionado com \mathbf{x}_{it} . Deste modo, **não** podemos ignorar a sua presença e estimar (5.1) por POLS, visto que isso resultaria num estimador inconsistente devido a **endogeneidade**.

Assim, transformamos o modelo para eliminar c_i e conseguirmos fazer uma estimação consistente de $\boldsymbol{\beta}$. A transformação a ser feita é a primeira diferença. Para tanto, seguimos os seguintes passos:

- Reescrevemos (5.1) defasado:

$$y_{it-1} = \mathbf{x}_{it-1}\boldsymbol{\beta} + c_i + u_{it-1} \quad (5.2)$$

- Tiramos a diferença entre (5.2) e (5.1):

$$\begin{aligned} y_{it} - y_{it-1} &= (\mathbf{x}_{it} - \mathbf{x}_{it-1})\boldsymbol{\beta} + c_i - c_i + u_{it} - u_{it-1} \\ \Delta y_{it} &= \Delta \mathbf{x}_{it}\boldsymbol{\beta} + \Delta u_{it}. \end{aligned} \quad (5.3)$$

para $t = 2, \dots, T$ e $i = 1, \dots, N$.

Reescrevendo (5.3) no formato matricial empilhando T :

$$\Delta \mathbf{y}_i = \Delta \mathbf{X}_i \boldsymbol{\beta} + \mathbf{e}_i \quad (5.4)$$

com $\boxed{e_{it} = \Delta u_{it}}$.

- $\Delta \mathbf{y}_i$ vetor $(T-1) \times 1$
- $\Delta \mathbf{X}_i$ matriz $(T-1) \times K$
- $\boldsymbol{\beta}$ vetor $K \times 1$
- \mathbf{e}_i vetor $(T-1) \times 1$

Estimação POLS

O estimador $\hat{\boldsymbol{\beta}}^{FD}$ é o POLS da regressão no modelo (5.4), assim:

$$\boxed{\boldsymbol{\beta}^{FD} = \left[\sum_{i=1}^N \Delta \mathbf{X}_i' \Delta \mathbf{X}_i \right]^{-1} \left[\sum_{i=1}^N \Delta \mathbf{X}_i' \Delta \mathbf{y}_i \right]} \quad (5.5)$$

Hipóteses

As Hipóteses que usamos para $\hat{\beta}^{FD}$ são:

FD.1: Exogeneidade Estrita: $E(u_{it} | \mathbf{x}_{i1}, \dots, \mathbf{x}_{iT}, c_i) = 0$, para $t = 1, \dots, T$ e $i = 1, \dots, N$.

FD.2: Posto completo de $E(\Delta X_i' \Delta X_i)$ (para inverter a matriz). $\text{posto}[E(\Delta X_i' \Delta X_i)] = K$.

FD.3: Homoscedasticidade: $E(\mathbf{e}_i \mathbf{e}_i' | X_i, c_i) = \sigma_e^2 I_{T-1}$.

Valor Esperado

Usando apenas **FD.1** e **FD.2**:

$$E(\beta^{FD}) = \beta + E \left[\left(\sum_{i=1}^N \Delta X_i' \Delta X_i \right)^{-1} \left(\sum_{i=1}^N \Delta X_i' \mathbf{e}_i \right) \right]$$

$$\boxed{E(\beta^{FD}) = \beta + E \left[(\Delta X' \Delta X)^{-1} (\Delta X' \mathbf{e}) \right]}$$

Variância

Usando apenas **FD.1** e **FD.2**:

$$\boxed{\text{Var}(\beta^{FD}) = E \left[(\Delta X' \Delta X)^{-1} (\Delta X' \mathbf{e} \mathbf{e}' \Delta X) (\Delta X' \Delta X)^{-1} \right]}$$

Variância sob Homocedasticidade

Usando **FD.3**, temos

$$\text{Var}(\beta^{FD}) = \sigma_e^2 E \left[(\Delta X' \Delta X)^{-1} (\Delta X' \Delta X) (\Delta X' \Delta X)^{-1} \right]$$

$$\boxed{\text{Var}(\beta^{FD}) = \sigma_e^2 E \left[(\Delta X' \Delta X)^{-1} \right]}$$

com

$$\sigma_e^2 = [N(T-1) - K]^{-1} \left[\sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \hat{e}_{it}^2 \right],$$

que é a média de todos \hat{e}_{it}^2 contando K regressores.

6 Exogeneidade Estrita e FDIV

Questão 6: Explique a hipótese de exogeneidade estrita dos regressores. Em seguida, argumente mostrando que a hipótese de exogeneidade estrita não se sustenta no seguinte modelo:

$$y_{it} = z_{it}\gamma + \rho y_{it-1} + c_i + u_{it}.$$

Explique detalhadamente como esse modelo pode ser estimado a partir da combinação entre Variáveis Instrumentais e método da Primeira Diferença.

Modelo

No seguinte modelo

$$y_{it} = x_{it}\beta + u_{it},$$

para $t = 1, \dots, T$ e $i = 1, \dots, N$.

- y_{it} escalar;
- x_{it} vetor $1 \times K$;
- β vetor $K \times 1$;
- u_{it} escalar.

$\{x_{it}\}$ é estritamente **exógeno** se valer:

$$E(u_{it} | x_{i1}, \dots, x_{iT}) = 0, \quad t = 1, \dots, T$$

ou seja:

$$E(y_{it} | x_{i1}, \dots, x_{iT}) = x_{it}\beta, \quad t = 1, \dots, T$$

o que é equivalente a hipótese de que utilizamos o modelo linear correto.

Para o seguinte modelo:

$$y_{it} = z_{it}\gamma + \rho y_{it-1} + c_i + u_{it}, \quad t = 2, \dots, T$$

é **impossível** termos exogeneidade estrita. Isso porque, nesse modelo, de efeitos não observados temos:

$$E(y_{it} | z_{i1}, \dots, z_{iT}, y_{it-1}, c_i) \neq 0.$$

Isso ocorre porque, y_{it} é afetado por y_{it-1} que contribui para y_{it} com, pelo menos, ρc_i .

$$\left. \begin{aligned} y_{it} &= z_{it}\gamma + \rho y_{it-1} + c_i + u_{it} \\ y_{it-1} &= z_{it-1}\gamma + \rho y_{it-2} + c_i + u_{it-1} \end{aligned} \right\} \implies y_{it} = z_{it}\gamma + \rho(z_{it-1}\gamma + \rho y_{it-2} + c_i + u_{it-1}) + c_i + u_{it}.$$

Para eliminarmos este efeito, podemos tirar a primeira diferença do modelo:

$$y_{it} - y_{it-1} = (z_{it} - z_{it-1})\gamma + \rho(y_{it-1} - y_{it-2}) + (c_i - c_i) + (u_{it} - u_{it-1})$$

$\Delta y_{it} = \Delta z_{it}\gamma + \rho \Delta y_{it-1} + \Delta u_{it}, \quad t = 3, \dots, T$

(6.1)

Estimação

Não podemos estimar o modelo (6.1) por POLS, uma vez que $Cov(\Delta y_{it-1}, \Delta u_{it}) \neq 0$. Como saída, podemos estimar por P2SLS, usando instrumentos para Δy_{it-1} (alguns instrumentos para Δy_{it-1} são $y_{it-2}, y_{it-3}, \dots, y_{i1}$).

P2SLS

$$y_{it} = \mathbf{x}'_{it}\boldsymbol{\beta} + u_{it}$$

- $i = 1, \dots, N$
- $t = 1, \dots, T$
- y_{it} escalar;
- \mathbf{x}_{it} vetor $K \times 1$;
- $\boldsymbol{\beta}$ vetor $K \times 1$;
- u_{it} escalar.

$$\boxed{\boldsymbol{\beta}^{P2SLS} = (X'P_ZX)^{-1}(X'P_Z\mathbf{y})}$$

com

$$\boxed{P_Z = Z'(Z'Z)^{-1}Z}$$

onde P_Z é a matriz de projeção em Z .

FDIV

$$\begin{aligned} y_{it} &= \mathbf{x}'_{it}\boldsymbol{\beta} + c_i + u_{it}, \quad i = 1, \dots, N, \quad t = 1, \dots, T \\ \Delta y_{it} &= \Delta \mathbf{x}'_{it}\boldsymbol{\beta} + \Delta u_{it}, \quad i = 1, \dots, N, \quad t = 2, \dots, T \end{aligned}$$

Vamos supor $\Delta \mathbf{x}'_{it}$ tem variável endógena (y_{it} , no caso). \mathbf{w}_{it} é um vetor $1 \times L_t$ de instrumentos, onde $L_t \geq K$. Se os instrumentos forem diferentes:

$$W_i = \text{diag}(\mathbf{w}'_{i2}, \mathbf{w}'_{i3}, \dots, \mathbf{w}'_{iT})$$

onde W_i é uma matriz $(T-1) \times L$

$$L = L_2 + L_3 + \dots + L_T$$

Hipóteses

FDIV.1: $E(\mathbf{w}_{it}\Delta u'_{it})$ para $i = 1, \dots, N, t = 2, \dots, T$.

FDIV.2: $\text{Posto}[E(W'_iW_i)] = L$

FDIV.3: $\text{Posto}[E(W'_i\Delta X_i)] = K$

Estimação FDIV

$$\boxed{\boldsymbol{\beta}^{FDIV} = (\Delta X'P_W\Delta X)^{-1}(\Delta X'P_W\Delta \mathbf{y})}$$

$$\boxed{P_W = W(W'W)^{-1}W'}$$

Valor Esperado

$$E(\boldsymbol{\beta}^{FDIV}) = \boldsymbol{\beta} + (\Delta X'P_W\Delta X)^{-1}(\Delta X'P_W\mathbf{e})$$

Variância

$$\begin{aligned}
Var(\boldsymbol{\beta}^{FDIV}) &= E \left\{ [E(\boldsymbol{\beta}^{FDIV}) - \beta] [E(\boldsymbol{\beta}^{FDIV}) - \beta]' \right\} \\
&= E \left\{ [\Delta X' P_W \Delta X]^{-1} [\Delta X' P_W \mathbf{e}] [\Delta X' P_W \mathbf{e}]' [\Delta X' P_W \Delta X]^{-1} \right\} \\
&= E \left[(\Delta X' P_W \Delta X)^{-1} (\Delta X' P_W \mathbf{e} \mathbf{e}' P_W \Delta X) (\Delta X' P_W \Delta X)^{-1} \right]
\end{aligned}$$

$$e_i = \Delta u_{it}.$$

7 Latent Variables, Probit and Logit

Questão 7: Usando a motivação de uma **variável latente**, motive a construção do estimador **LOGIT/PROBIT**. Explique o procedimento de estimação de verossimilhança que caracteriza o estimador. Inclua em sua explicação o resultado da distribuição assintótica de $\sqrt{n}(\boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{\theta}_0)$. Ressalte a forma mais simples da variância assintótica desse estimador, devido ao fato de ser um estimador de máxima verossimilhança.

Modelo

Suponha y^* não observável (**latente**) seguindo o seguinte modelo:

$$y_i^* = \mathbf{x}_i' \boldsymbol{\beta} + \varepsilon_i. \quad (7.1)$$

Defina y como:

$$y_i = \begin{cases} 1, & y_i^* \geq 0 \\ 0, & y_i^* < 0 \end{cases}$$

temos que:

$$\begin{aligned} P(y_i = 1 | \mathbf{x}) &= p(\mathbf{x}) \\ P(y_i = 0 | \mathbf{x}) &= 1 - p(\mathbf{x}). \end{aligned}$$

Além disso, pela definição de y_i , equação (7.1), temos:

$$\begin{aligned} P(y_i = 1 | \mathbf{x}) &= P(y_i^* \geq 0 | \mathbf{x}) \\ &= P(\mathbf{x}_i' \boldsymbol{\beta} + \varepsilon_i \geq 0 | \mathbf{x}) \\ &= P(\varepsilon_i \geq -\mathbf{x}_i' \boldsymbol{\beta} | \mathbf{x}). \end{aligned}$$

Agora, supondo que ε_i tem FDA, G , tal que $G' = g$ é simétrica ao redor de zero:

$$\begin{aligned} P(y_i = 1 | \mathbf{x}) &= 1 - P(\varepsilon_i < -\mathbf{x}_i' \boldsymbol{\beta} | \mathbf{x}) \\ &= 1 - G(-\mathbf{x}_i' \boldsymbol{\beta} | \mathbf{x}) \\ &= G(\mathbf{x}_i' \boldsymbol{\beta}). \end{aligned}$$

Se $G(\cdot)$ for uma distribuição:

Normal Padrão: $\hat{\boldsymbol{\beta}}$ é o estimador **probit**.

Logística: $\hat{\boldsymbol{\beta}}$ é o estimador **logit**.

Supondo $\mathbf{y}_i | \mathbf{x} \sim \text{Bernoulli}(p(\mathbf{x}))$, sua fmp é dada por:

$$f(y_i | \mathbf{x}_i; \boldsymbol{\beta}) = [G(\mathbf{x}_i' \boldsymbol{\beta})]^{y_i} [1 - G(\mathbf{x}_i' \boldsymbol{\beta})]^{1-y_i}, \quad y = 0, 1.$$

Para estimarmos $\hat{\boldsymbol{\beta}}$ por máxima verossimilhança, temos de encontrar $\boldsymbol{\beta} \in B$, onde B é o espaço paramétrico, tal que $\boldsymbol{\beta}$ maximize o valor da distribuição conjunta de \mathbf{y} , ou seja:

$$\max_{\boldsymbol{\beta} \in B} \prod_{i=1}^N f(y_i | \mathbf{x}_i; \boldsymbol{\beta}).$$

Tirando o logaritmo e dividindo tudo por N (podemos fazer isso pois são transformações monotônicas e não alteram o lugar onde $\boldsymbol{\beta}$ ótimo irá parar):

$$\text{Max}_{\beta \in B} \left\{ N^{-1} \sum_{i=1}^N \ln [f(y_i | \mathbf{x}_i; \beta)] \right\}.$$

Podemos definir $\ell_i(\beta) = \ln[f(y_i | \mathbf{x}_i; \beta)]$ como sendo a verossimilhança condicional da observação i :

$$\text{Max}_{\beta \in B} \left\{ N^{-1} \sum_{i=1}^N \ell_i(\beta) \right\}.$$

Dessa forma, podemos ver que o problema acima é a analogia amostral de:

$$\text{Max}_{\beta \in B} E[\ell_i(\beta)].$$

Definindo o *vector score* da observação i :

$$s_i(\beta) = [\nabla_{\beta} \ell_i(\beta)]' = \left[\frac{\partial \ell_i(\beta)}{\partial \beta_1}, \dots, \frac{\partial \ell_i(\beta)}{\partial \beta_K} \right]$$

Definindo a **Matriz Hessiana** da observação i :

$$H_i(\beta) = \nabla_{\beta} s_i(\beta) = \nabla_{\beta}^2 \ell_i(\beta)$$

Tendo essas definições, o **Teorema do Valor Médio** (TVM) nos diz que no intervalo $[a, b]$, existe um número, c , tal que:

$$f'(c) = \frac{f(b) - f(a)}{b - a}.$$

FAZER DESENHO

Trocando $f(\cdot)$ por $s_i(\cdot)$, a por β_0 , b por $\hat{\beta}$ e c por $\bar{\beta}$, temos:

$$H_i(\bar{\beta}) = \frac{s_i(\hat{\beta}) - s_i(\beta_0)}{\hat{\beta} - \beta_0},$$

tirando médias dos dois lados:

$$N^{-1} \sum_{i=1}^N H_i(\bar{\beta}) = \frac{1}{\hat{\beta} - \beta_0} N^{-1} \sum_{i=1}^N [s_i(\hat{\beta}) - s_i(\beta_0)]$$

Supondo que $\hat{\beta}$ maximiza $\ell(\beta | \mathbf{y}, \mathbf{x})$, temos que: $N^{-1} \sum_{i=1}^N s_i(\hat{\beta}) = 0$. E podemos reescrever a equação anterior como:

$$\begin{aligned} \hat{\beta} - \beta_0 &= (-1) \left[N^{-1} \sum_{i=1}^N H_i(\bar{\beta}) \right]^{-1} N^{-1} \sum_{i=1}^N s_i(\beta_0) \\ \sqrt{N}(\hat{\beta} - \beta_0) &= \left[-N^{-1} \sum_{i=1}^N H_i(\bar{\beta}) \right]^{-1} \sqrt{N} \cdot N^{-1} \sum_{i=1}^N s_i(\beta_0) \\ \sqrt{N}(\hat{\beta} - \beta_0) &= \left[-N^{-1} \sum_{i=1}^N H_i(\bar{\beta}) \right]^{-1} N^{-1/2} \sum_{i=1}^N s_i(\beta_0). \end{aligned}$$

Onde

$$\left[-N^{-1} \sum_{i=1}^N H_i(\bar{\beta}) \right]^{-1} \xrightarrow{p} A_0^{-1}, \quad N^{-1/2} \sum_{i=1}^N s_i(\beta_0) \xrightarrow{d} N(0, B_0).$$

Assim, temos que:

$$\boxed{\sqrt{N}(\hat{\beta} - \beta_0) \rightarrow N(0, A_0^{-1} B_0 A_0^{-1})}.$$

A forma mais simples de achar $Var(\hat{\beta})$ é:

$$\boxed{Var(\hat{\beta}) = -E[H_i(\hat{\beta})]^{-1}}.$$

8 ATT, ATE, Propensity Score

Questão 8: Explique como estimar o efeito médio do tratamento (τ_{ATE}) e o efeito médio do tratamento sobre o tratado (τ_{ATT}), considerando a hipótese de Ignorabilidade do Tratamento condicional a um conjunto de covariáveis. Aborde o método *Propensity Score*. Discuta a importância da hipótese *Overlap* para a aplicabilidade desse estimador. Explique resumidamente como o *Propensity Score* pode ser estimado.

Modelo

- $y_1 \rightarrow$ variável de interesse com tratamento
- $y_0 \rightarrow$ variável de interesse sem tratamento

$$w = \begin{cases} 1 & \text{se tratam} \\ 0 & \text{se não tratam} \end{cases}$$

Idealmente, para isolarmos completamente o efeito de $w = 1$, gostaríamos de poder calcular:

$$N^{-1} \sum_{i=1}^N (y_{i1} - y_{i0}).$$

Ou seja, o efeito que o tratamento causa sobre um indivíduo com todo o resto permanecendo constante. Em outras palavras, queríamos que houvesse dois mundos paralelos observáveis onde seria possível observar o que acontece com y_i com e sem tratamento. Infelizmente, para cada indivíduo i , observamos apenas y_{i1} ou y_{i0} , nunca ambos.

Antes de continuarmos, faremos as seguintes definições:

ATE: $E(y_1 - y_0)$

ATT: $E(y_1 - y_0 | w = 1)$ (ATE no tratado).

ATE e ATT condicional a variáveis \mathbf{x}

$$\begin{aligned} ATE(\mathbf{x}) &= E(y_1 - y_0 | \mathbf{x}) \\ ATT(\mathbf{x}) &= E(y_1 - y_0 | \mathbf{x}, w = 1) \end{aligned}$$

OBS:

$$\begin{aligned} E(y_1 - y_0) &= E[E(y_1 - y_0 | w)] \\ E(y_1 - y_0 | w) &= E(y_1 - y_0 | w = 0) \cdot P(w = 0) + E(y_1 - y_0 | w = 1) \cdot P(w = 1). \end{aligned}$$

Métodos Assumindo Ignorabilidade do Tratamento

ATE.1: Ignorabilidade.

w e (y_1, y_0) são independentes condicionais a \mathbf{x} .

ATE.1': Ignorabilidade da Média.

- $E(y_0 | w, \mathbf{x}) = E(y_0 | \mathbf{x})$
- $E(y_1 | w, \mathbf{x}) = E(y_1 | \mathbf{x})$

Vamos definir

$$\begin{aligned} E(y_0 | \mathbf{x}) &= \mu_0(\mathbf{x}) \\ E(y_1 | \mathbf{x}) &= \mu_1(\mathbf{x}). \end{aligned}$$

Sob **ATE.1** e **ATE.1'**:

$$\begin{aligned} ATE(\mathbf{x}) &= E(y_1 - y_0 | \mathbf{x}) = \mu_1(\mathbf{x}) - \mu_0(\mathbf{x}) \\ ATT(\mathbf{x}) &= E(y_1 - y_0 | \mathbf{x}, w = 1) = \mu_1(\mathbf{x}) - \mu_0(\mathbf{x}) \end{aligned}$$

ATE.2: *Overlap*

Para todo \mathbf{x} , $P(w = 1 | \mathbf{x}) \in (0, 1)$, $p(\mathbf{x}) = p(w = 1 | \mathbf{x})$.

$p(\mathbf{x})$ é o *Propensity Score*, ele representa a probabilidade de y_i ser tratado dado o valor das covariáveis \mathbf{x} . Essa hipótese é importante visto que podemos expressar o *ATE* em função de $p(\mathbf{x})$.

Para o *ATT* vamos supor:

ATT.1': $E(y_0 | \mathbf{x}, w) = E(y_0 | \mathbf{x})$

ATT.2: *Overlap*: Para todo \mathbf{x} , $P(w = 1 | \mathbf{x}) < 1$.

Propensity Score

Como foi dito anteriormente, apenas observamos ou y_1 ou y_0 para a mesma pessoa, mas não ambos. Mais precisamente, junto com w , o resultado observado é:

$$y = wy_1 + (1 - w)y_0$$

como w é binário, $w^2 = w$, assim, temos:

$$\begin{aligned} wy &= w^2y_1 + (w - w^2)y_0 \implies \boxed{wy = wy_1} \\ (1 - w)y &= (w - w^2)y_1 + (w^2 - 2w + 1)y_0 \implies \boxed{(1 - w)y = (1 - w)y_0}. \end{aligned}$$

Fazemos isso para tentar isolar $\mu_0(\mathbf{x})$ e $\mu_1(\mathbf{x})$:

$\mu_1(\mathbf{x})$

$$\begin{aligned} E(wy | \mathbf{x}) &= E[E(wy_1 | \mathbf{x}, w) | \mathbf{x}] \\ &= E[w\mu_1(\mathbf{x}) | \mathbf{x}] \\ &= \mu_1(\mathbf{x})E(w | \mathbf{x}). \end{aligned}$$

Como w é binária: $E(w | \mathbf{x}) = P(w = 1 | \mathbf{x}) = p(\mathbf{x})$. Assim:

$$\begin{aligned} E(wy | \mathbf{x}) &= \mu_1(\mathbf{x})p(\mathbf{x}) \\ \boxed{\mu_1(\mathbf{x})} &= \frac{E(wy | \mathbf{x})}{p(\mathbf{x})} \end{aligned}$$

$$\mu_0(\mathbf{x})$$

$$\begin{aligned} E[(1-w)y|\mathbf{x}] &= E[E((1-w)y_0|\mathbf{x}, w)|\mathbf{x}] \\ &= E[(1-w)\mu_0(\mathbf{x})|\mathbf{x}] \\ &= \mu_0(\mathbf{x})E(w|\mathbf{x}) \end{aligned}$$

$$E[(1-w)y|\mathbf{x}] = \mu_0(\mathbf{x})[1-p(\mathbf{x})] \implies$$

$$\boxed{\mu_0(\mathbf{x}) = \frac{E[(1-w)y|\mathbf{x}]}{1-p(\mathbf{x})}}$$

ATE:

$$\mu_1(\mathbf{x}) - \mu_0(\mathbf{x}) = E\left[\frac{[w-p(\mathbf{x})]y}{p(\mathbf{x})[1-p(\mathbf{x})]}|\mathbf{x}\right]$$

$$\boxed{\widehat{ATE} = N^{-1} \sum_{i=1}^N \frac{[w_i - p(\mathbf{x}_i)]y_i}{p(\mathbf{x}_i)[1-p(\mathbf{x}_i)]}}$$

ATT:

$$E(y_1|\mathbf{x}, w=1) - E(y_0|\mathbf{x}) = \frac{1}{\hat{P}(w=1)} E\left[\frac{[w-\hat{p}(\mathbf{x})]y}{[1-\hat{p}(\mathbf{x})]}|\mathbf{x}\right]$$

$$\hat{P}(w=1) = N^{-1} \sum_{i=1}^N w_i$$

$$\widehat{ATT} = \frac{N}{\sum_{i=1}^N w_i} N^{-1} \sum_{i=1}^N \frac{[w_i - \hat{p}(\mathbf{x}_i)]y_i}{[1 - \hat{p}(\mathbf{x}_i)]}$$

$$\boxed{\widehat{ATT} = \frac{1}{\sum_{i=1}^N w_i} \sum_{i=1}^N \frac{[w_i - \hat{p}(\mathbf{x}_i)]y_i}{[1 - \hat{p}(\mathbf{x}_i)]}}$$

Appêndice

Sums of Values

(Greene, 2012, p. 977, A.2.7)

$$\mathbf{1}'_N \mathbf{1}_N = N \quad ; \quad \mathbf{1}_N \mathbf{1}'_N = \begin{bmatrix} 1 & \dots & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \dots & 1 \end{bmatrix}_{N \times N}$$

Defining \mathbf{x} with dimension $1 \times N$:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_N \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{x}' \mathbf{1}_N = \mathbf{1}'_N \mathbf{x} = (\mathbf{x}' \mathbf{1}_N)' = \sum_{i=1}^N x_i$$

$$\mathbf{1}_N \mathbf{x}' = \begin{bmatrix} x_1 & \dots & x_N \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_1 & \dots & x_N \end{bmatrix}_{N \times N} \quad ; \quad \mathbf{x} \mathbf{1}'_N = \begin{bmatrix} x_1 & \dots & x_1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_N & \dots & x_N \end{bmatrix}_{N \times N}$$

$$E(\mathbf{x}) = \bar{\mathbf{x}} = N^{-1} \sum_{i=1}^N x_i = N^{-1} \mathbf{x}' \mathbf{1}_N$$

Important Idempotent Matrices

(Greene, 2012, p. 978, A.28)

Centering Matrix

$$M^0 = I_N - \mathbf{1}_N (\mathbf{1}'_N \mathbf{1}_N)^{-1} \mathbf{1}'_N = I_N - N^{-1} \mathbf{1}_N \mathbf{1}'_N$$

A Matriz M^0 é **idempotente** e **simétrica**.

Idempotência: $AA = A$

Simetria: $A' = A$

$$M^0 \mathbf{x} = (I_N - N^{-1} \mathbf{1}_N \mathbf{1}'_N) \mathbf{x} = \mathbf{x} - N^{-1} \mathbf{1}_N (\mathbf{1}'_N \mathbf{x}) = \mathbf{1}_N \bar{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{x}} \\ \vdots \\ \bar{\mathbf{x}} \end{bmatrix}$$

$$M^0 \mathbf{1} = (I_N - N^{-1} \mathbf{1}_N \mathbf{1}'_N) \mathbf{1}_N = \mathbf{1}_N - N^{-1} \mathbf{1}_N (\mathbf{1}'_N \mathbf{1}_N) = \mathbf{0}_N$$

Referências

GREENE, WILLIAM H. 2012. *Econometric Analysis*. 7 edn. Boston: Prentice Hall.

WOOLDRIDGE, JEFFREY M. 2010. *Econometric Analysis of Cross Section and Panel Data*. 2 edn. Boston, Massachusetts: MIT Press.