**Métodos Numéricos**
1er Cuatrimestre 2024
**Práctica 1**
Elementos de Álgebra Lineal

DEPARTAMENTO DE COMPUTACION
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales - UBA

*Nota:* $\mathbb{R}^n$ *está formado por vectores columna. Cuando se escriben por filas es por comodidad tipográfica.*

1. Dadas las matrices $A = (a_{ij}) \in \mathbb{R}^{n\times m}$, $B = (b_{ij}) \in \mathbb{R}^{m\times n}$, $D = (d_{ij}) \in \mathbb{R}^{m\times m}$ y los vectores columna $x = (x_i), z = (z_i) \in \mathbb{R}^n$, $y = (y_i), w = (w_i) \in \mathbb{R}^m$ (donde la notación $a_{ij}$ representa el elemento que está en la fila $i$ y en la columna $j$ de la matriz $A$ y la notación $x_i$ representa el elemento $i$-esimo del vector $x$), decidir si las siguientes afirmaciones son verdaderas o falsas y en este último caso justificar por qué lo son.

   a) $x^t A z = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} x_i a_{ij} z_j$
   b) $x z^t = \sum_{i=1}^{n} x_i z_i$
   c) $(ADw)_i = \sum_{j=1}^{m} \sum_{k=1}^{m} a_{ij} d_{jk} w_k$
   d) $(B^t D^{-1} y)_i = \sum_{j=1}^{m} \sum_{k=1}^{m} b_{ji} d_{jk}^{-1} y_k$ donde $d_{jk}^{-1} = (D^{-1})_{jk}$

2. Sean las siguientes matrices de $3 \times 3$:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 0 \\ 0 & 1 & 2 \\ 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 3 & 0 & 1 \\ 2 & 0 & 2 \end{pmatrix} \quad C = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{pmatrix}$$

   Para cada una de las particiones en bloques mencionadas a continuación, indicar si es realizable el producto $C = AB$ en bloques. En caso de ser realizable, calcular cada bloque $C_{ij}$ indicando sus dimensiones.

   a) $A_{11} = [a_{11}],\ A_{12} = [a_{12},\ a_{13}],\ A_{21} = \begin{bmatrix} a_{21} \\ a_{31} \end{bmatrix},\ A_{22} = \begin{bmatrix} a_{22} & a_{23} \\ a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}$

   $B_{11} = [b_{11}],\ B_{12} = [b_{12},\ b_{13}],\ B_{21} = \begin{bmatrix} b_{21} \\ b_{31} \end{bmatrix},\ B_{22} = \begin{bmatrix} b_{22} & b_{23} \\ b_{32} & b_{33} \end{bmatrix}$

   b) $A_{11} = [a_{11}\ \ a_{12}],\ A_{12} = [a_{13}],\ A_{21} = \begin{bmatrix} a_{21} & a_{22} \\ a_{31} & a_{32} \end{bmatrix},\ A_{22} = \begin{bmatrix} a_{23} \\ a_{33} \end{bmatrix}$

   $B_{11} = [b_{11}],\ B_{12} = [b_{12}\ \ b_{13}],\ B_{21} = \begin{bmatrix} b_{21} \\ b_{31} \end{bmatrix},\ B_{22} = \begin{bmatrix} b_{22} & b_{23} \\ b_{32} & b_{33} \end{bmatrix}$

   c) $A_{11} = \begin{bmatrix} a_{11} \\ a_{21} \end{bmatrix},\ A_{12} = \begin{bmatrix} a_{12} & a_{13} \\ a_{22} & a_{23} \end{bmatrix},\ A_{21} = [a_{31}],\ A_{22} = [a_{32}\ a_{33}]$

   $B_{11} = [b_{11}],\ B_{12} = [b_{12}\ b_{13}],\ B_{21} = \begin{bmatrix} b_{21} \\ b_{31} \end{bmatrix},\ B_{22} = \begin{bmatrix} b_{22} & b_{23} \\ b_{32} & b_{33} \end{bmatrix}$

   ¿Qué otras particiones válidas son posibles?

3. Sean $A \in \mathbb{R}^{n\times n}$ una matriz con columnas $a_1, \ldots, a_n$, y $B \in \mathbb{R}^{n\times n}$ una matriz con filas $b_1^t, \ldots, b_n^t$. Probar que:

a) Si $\forall x \in \mathbb{R}^n : Ax = Bx$, entonces $A = B$.

b) $AB = \sum_{i=1}^{n} a_i\, b_i^t$.

4. Exhibir $n \in \mathbb{N}$ y $A, B \in \mathbb{R}^{n\times n}$ para los cuales $AB \neq BA$. Idem para que $tr(AB) \neq tr(A)tr(B)$, siendo $tr(A) = \sum_i a_{ii}$ la *traza* de $A$.

5. Sean $A \in \mathbb{R}^{m\times n}$ y $B \in \mathbb{R}^{n\times r}$ tales que $AB = 0$ ¿Será cierto que $A = 0$ o $B = 0$?

6. Sean $A \in \mathbb{R}^{n\times n}$ no nula y $B, C \in \mathbb{R}^{n\times m}$ tales que $AB = AC$ ¿Será cierto que $B = C$?

7. Sean $A, B \in \mathbb{R}^{n\times n}$. Dar condiciones necesarias y suficientes sobre $A$ y $B$ para que valga la igualdad $(A + B)^2 = A^2 + 2AB + B^2$. Idem para que $(A + B)(A - B) = A^2 - B^2$

8. Sea $A \in \mathbb{R}^{n\times n}$ y $m \in \mathbb{N}$, probar la igualdad
$(I - A)(I + A + \ldots + A^m) = (I + A + \ldots + A^m)(I - A) = I - A^{m+1}$

9. Determinar si los siguientes conjuntos de $\mathbb{R}^n$ son linealmente independientes. Cuando no lo sean, escribir uno de sus elementos como combinación lineal del resto.

a) $C = \{(1,\ 2,\ 1,\ 0),\ (2,\ 1,\ 3,\ 0),\ (3,\ 2,\ 4,\ 1)\} \subseteq \mathbb{R}^4$

b) $C = \{(3,\ 3,\ 3),\ (2,\ 1, 0),\ (7,\ 5,\ 3)\} \subseteq \mathbb{R}^3$

10. Hallar dos bases distintas de los siguientes subespacios de $\mathbb{R}^n$. Extender las bases propuestas a bases de $\mathbb{R}^n$.

a) $S = \langle\, (1,\ 2,\ 0),\ (1,\ 3,\ 6),\ (1,\ 7,\ 30)\,\rangle \ \subseteq \mathbb{R}^3$

b) $S = \langle\, (1,\ 2),\ (4,\ 8)\,\rangle \ \subseteq \mathbb{R}^2$

11. Demostrar:

a) Sea $\lambda \in \mathbb{R},\ \lambda \neq 0$. El conjunto $\{v_1, \ldots, v_i, \ldots, v_m\} \subseteq \mathbb{R}^n$, con $m \leq n$, es linealmente independiente si y solo si el conjunto $\{v_1, \ldots, \lambda v_i, \ldots, v_m\}$ es linealmente independiente.

b) Sea $\lambda \in \mathbb{R}$. El conjunto $\{v_1, \ldots, v_i, \ldots, v_j, \ldots, v_m\} \subseteq \mathbb{R}^n$, con $m \leq n$, es linealmente independiente si y solo si el conjunto $\{v_1, \ldots, v_i + \lambda v_j, \ldots, v_j, \ldots, v_m\}$ es linealmente independiente.

Relacionar estas dos propiedades con el método clásico de triangulación de matrices (Eliminación Gaussiana).

12. Sea $A \in \mathbb{R}^{m\times n}$. Demostrar que $T(x) = Ax$ es una transformación lineal.

13. Sea $A = \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 1 & -2 \end{pmatrix}$ y sea $T(x) = Ax$. Sean $x = (-1, -1)$ e $y = (2, 1)$ dos puntos del plano. ¿Cuál es la imagen del segmento que tiene por extremo a dichos puntos? Justificar.

14. Demostrar el punto anterior considerando $A \in \mathbb{R}^{m\times n}$ y $x$ e $y$ dos puntos cualquiera de $\mathbb{R}^n$.

15. Hallar la transformación lineal $f : \mathbb{R}^3 \to \mathbb{R}^2$ asociada a la siguiente matriz $A \in \mathbb{R}^{2\times 3}$

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 7 & 4 & 3 \end{pmatrix}$$

16. Hallar la matriz $A \in \mathbb{R}^{3\times 3}$ asociada a la siguiente transformación lineal $f : \mathbb{R}^3 \to \mathbb{R}^3$

$$f(x_1, x_2, x_3) = (x_1 + 2x_2 + 3x_3,\ 2x_1 + 3x_3,\ 3x_2)$$

17. Hallar la matriz $A \in \mathbb{R}^{3\times 3}$ asociada a la siguiente transformación lineal $f : \mathbb{R}^3 \to \mathbb{R}^3$

$$f(x_1, x_2, x_3) = (-x_1,\ 2x_3,\ 3x_2)$$

¿Cómo esta transformación lineal mueve los ejes de coordenadas?

18. Para las siguientes matrices $A \in \mathbb{R}^{m\times n}$ hallar $Nu(A)$, $Im(A)$, su rango fila, su rango columna y comprobar que $n = dim(Nu(A)) + dim(Im(A))$

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 1 & 2 \\ 1 & 3 & 4 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{4\times 3} \quad A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & 3 & 7 \\ 0 & 6 & 30 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{3\times 3}$$

19. Para cualquier $u, v \in \mathbb{R}^n$, sea $A = uv^t$.

   a) Hallar $Im(A)$ y $dim(Nu(A))$.

   b) Probar que $A^2 = tr(A) \cdot A$.

20. Sean $A, B \in \mathbb{R}^{n\times n}$. Probar:

   a) $Nu(B) \subseteq Nu(AB)$.

   b) $Im(AB) \subseteq Im(A)$.

   c) Si $AB = 0$ entonces $Im(B) \subseteq Nu(A)$.

21. Sea $A \in \mathbb{R}^{m\times n}$. Supongamos que $dim(Nu(A)) = k$ y sea $B_1 = \{v_1, \ldots, v_k\} \subseteq \mathbb{R}^n$ una base del subespacio $Nu(A)$. Además sea $B_2 = \{v_{k+1}, \ldots, v_n\} \subseteq \mathbb{R}^n$ una base tal que $B_1 \cup B_2 = \{v_1, \ldots, v_n\}$ es una base de $\mathbb{R}^n$.

   a) Probar que cualquier vector $y \in Im(A)$ se puede escribir como una combinación lineal de $\{Av_{k+1}, \ldots, Av_n\} \subseteq \mathbb{R}^m$.

   b) Probar que los vectores del conjunto $\{Av_{k+1}, \ldots, Av_n\} \subseteq \mathbb{R}^m$ son linealmente independientes.

   c) Deducir el *Teorema de la dimensión*: $dim(Nu(A)) + dim(Im(A)) = n$.

22. Sea $A \in \mathbb{R}^{n\times n}$. Demostrar que las siguientes condiciones son equivalentes (es decir, si una de ellas vale, todas valen).

   a) $A$ es inversible.

   b) No existe $x \in \mathbb{R}^n, x \neq 0$, tal que $Ax = 0$.

   c) Las columnas de $A$ son linealmente independientes.

   d) Las filas de $A$ son linealmente independientes.

23. Sean $A \in \mathbb{R}^{n\times n}$ inversible y $B, C \in \mathbb{R}^{n\times m}$. Probar:

a) $AB = AC$ entonces $B = C$.

b) $AB = 0$ entonces $B = 0$.

c) Si $m = n$ y si $\forall D \in \mathbb{R}^{m\times m}$: $tr(BD) = tr(CD)$, entonces $B = C$.

d) Si $m = n$ entonces $tr(B) = tr(ABA^{-1})$
(Sug.: demostrar primero que $tr(CD) = tr(DC)$).

24. Sean $A, B \in \mathbb{R}^{n\times n}$ probar:

    a) Si $A$ es inversible entonces $A^{-1}$ es inversible y $(A^{-1})^{-1} = A$.

    b) Si $A, B$ son inversibles entonces $AB$ es inversible y $(AB)^{-1} = B^{-1}A^{-1}$.

    c) Si $A$ es inversible entonces $A^t$ es inversible y $(A^t)^{-1} = (A^{-1})^t$.

25. Sean $A, B \in \mathbb{R}^{n\times n}$. Probar mediante inducción en la dimensión de la matriz:

    a) Si $A$ y $B$ son triangulares inferiores (superiores) entonces el producto $AB$ es triangular inferior (superior).

    b) Si $A$ es inversible y triangular inferior (superior) entonces $A^{-1}$ es triangular inferior (superior).

26. Una matriz $A \in \mathbb{R}^{n\times n}$ se dice nilpotente si $A^k = 0$ para algún $k \in \mathbb{N}$. Probar que si $A$ es nilpotente entonces:

    a) $A$ no es inversible.

    b) $I - A$ es inversible.

27. Sea $x \in \mathbb{R}^n$. Demostrar que $\|x\|_2$ , $\|x\|_1$ , $\|x\|_\infty$ son normas vectoriales.

28. Graficar los siguientes conjuntos de puntos:

    a) $A = \{x \in \mathbb{R}^2 / \|x\|_2 = 1\}$

    b) $B = \{x \in \mathbb{R}^2 / \|x\|_1 = 1\}$

    c) $C = \{x \in \mathbb{R}^2 / \|x\|_\infty = 1\}$

29. a) Probar la desigualdad de Cauchy-Schwarz-Bunyakovski $|x^t y| \leqslant \|x\|_2 \|y\|_2$.

    b) Probar que si $x$ e $y$ son linealmente dependientes, entonces vale la igualdad.

30. Mostrar con un contraejemplo que la desigualdad de C-S-B no se cumple para la norma infinito.
¿Se cumple la desigualdad para la norma uno? Justificar la respuesta.

31. Probar que si $x \in \mathbb{R}^n$ entonces $\lim_{p\to\infty} \|x\|_p = \|x\|_\infty$.

## Resolver en computadora

i Dados $x_1, \ldots, x_n$ una muestra de una variable aleatoria, implementar rutinas que calculen la media y la varianza utilizando operaciones vectoriales.

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \qquad \sigma^2 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2$$

ii Sea $A \in \mathbb{R}^{m\times n}$.

a) Demostrar que $A^tA$ y $AA^t$ son simétricas.

b) Implementar una rutina que dada una matriz cuadrada verifique si la misma es simétrica.

c) Analizar la función implementada en el item anterior con la matriz $B$ generada de la siguiente forma:

```
from numpy.random import rand
>> A = rand(4,4);
>> B = A.T@A*0.1/0.1;
```

Analizar el resultado, revisar la implementación y (eventualmente) reimplementar la función.

iii Sean $A, B \in \mathbb{R}^{n\times n}$, con $n$ par y $B$ triangular inferior.

a) Realizar la multiplicación $AB$ por bloques, partiendo ambas matrices en bloques de tamaño $n/2$.

b) Implementar una rutina que realice la multiplicación por bloques, evitando cuentas innecesarias.

## Funciones útiles

A continuación incluimos ejemplos para crear y operar con matrices y vectores usando Python+Numpy y Matlab/Octave.

- Inicializar matrices y vectores usando distintas sintaxis en Numpy. Tener en cuenta que Numpy maneja como tipos de datos básicos tanto `array` multidimensional como `matrix`; para operaciones de álgebra lineal se recomienda usar esta última.

```python
from numpy import *
from numpy.linalg import *

# Distintas maneras de inicializar una matriz
A = matrix([[1,2],[3,4]])
B = matrix('1 2; 3 4')
C = matrix('1 2; 3 4', float)

# Para los vectores usamos matrices columna
v = matrix([[4],[5]])
w = matrix('4; 5')

# Crear matrices especiales
I = asmatrix(eye(3))          # Identidad de 3x3
D = asmatrix(diag([1,2]))     # Matriz diagonal
N = asmatrix(zeros((3,3)))    # Matriz nula de 3x3

# Construir una matriz de 4x4 usando las matrices A,B,C,D como bloques
E = bmat([[A,B],[C,D]])
```

- Operaciones básicas entre las matrices y vectores definidos anteriormente en Numpy

```
A + B       # Suma
A - B       # Resta
A * B       # Producto de matrices
A * v       # Producto de matriz por vector
3.2 * A     # Producto por escalar
A ** 2      # Potencia
A.t         # Traspuesta
inv(A)      # Inversa
```

- Inicializar matrices y vectores en Matlab/Octave, por defecto se inicializan con tipo de dato `double`.

```
% Distintas maneras de inicializar una matriz
A = [ 1,2 ; 3,4 ]
A = [ 1 2 ; 3 4 ]
C = [[1 2];[3,4]]

% Para los vectores usamos matrices columna
v = [4 ; 5]

% Crear matrices especiales
I = eye(3)          % Identidad de 3x3
D = diag([1,2])     % Matriz diagonal
N = zeros(3,3)      % Matriz nula de 3x3

% Construir una matriz de 4x4 usando las matrices A,B,C,D como bloques
E = [A,B;C,D]
E = [[A,B];[C,D]]
E = [[A B];[C D]]
```

- Operaciones básicas entre las matrices y vectores definidos anteriormente en Matlab/Octave

```
A + B       % Suma
A - B       % Resta
A * B       % Producto de matrices
A * v       % Producto de matriz por vector
3.2 * A     % Producto por escalar
A^2         % Potencia
A'          % Traspuesta
inv(A)      % Inversa
```

## Referencias

[1] Serge Lang. *Linear Algebra*. Addison-Wesley Publishing Company, 1986.

[2] C. Meyer. *Matrix Analysis and Applied Linear Algebra.* Society for Industrial and Applied Mathematics, 2000.

[3] G. Strang. *Algebra lineal y sus aplicaciones.* Ed. Paraninfo, 2007.