

---

# AI ALGORITHMS

---

## Study Book

### **Author**

Nelson Bruno Andrés Moreno Cabañas

Santiago, Chile

2024

# Contents

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Machine Learning</b>	<b>3</b>
2.1	Linear Regression . . . . .	3
2.1.1	Regularization . . . . .	4
2.2	Decision Trees . . . . .	5
2.3	Random Forest . . . . .	6
2.3.1	Ensemble Methods . . . . .	6
2.4	Gradient Boosting Classifier . . . . .	8
2.5	Naive Bayes . . . . .	8
2.5.1	Gaussian Naive Bayes . . . . .	8
2.5.2	Multinomial Naive Bayes . . . . .	9
2.6	Support Vector Machines . . . . .	9
2.6.1	Soft Margin . . . . .	11
2.6.2	Kernel Trick . . . . .	11
2.6.3	Kernels . . . . .	11
2.7	ARIMA . . . . .	12
2.7.1	P Value . . . . .	13
2.7.2	D Value . . . . .	13
2.7.3	Q Value . . . . .	14
<b>3</b>	<b>K-Means</b>	<b>15</b>
<b>4</b>	<b>Principal Component Analysis (PCA)</b>	<b>15</b>
<b>5</b>	<b>Others</b>	<b>16</b>
5.1	Performance Metrics . . . . .	16
5.2	Bias vs Variance . . . . .	16
5.3	Oversampling and Undersampling . . . . .	16
5.4	SHAP Values . . . . .	16
<b>6</b>	<b>REMOVE</b>	<b>17</b>
6.1	Pictures . . . . .	17
6.2	Citation . . . . .	17

# 1 Introduction

Esta es la introducción.

## 2 Machine Learning

Consideremos un conjunto de datos  $X = (x_1, \dots, x_N)$  donde para cada  $i \in 1, \dots, N$ ,  $x_i = [x_i^1, \dots, x_i^M]$  es decir, un conjunto de  $N$  datos con  $M$  features cada uno. Consideremos además  $Y = (y_1, \dots, y_N)$  las etiquetas o labels cada cada dato. En problemas de clasificación binario,  $y_i \in \{0, 1\}$  y en problemas de clasificación multiclase,  $y_i \in \{1, \dots, L\}$ . Para problemas de regresión,  $Y = (y_1, \dots, y_N)$  con cada  $y_i \in \mathbb{R}$ .

### 2.1 Linear Regression

Un modelo de regresión lineal es un modelo de aprendizaje **supervisado** utilizado para problemas de **regresión** y **clasificación**. Se construye a través de la búsqueda de parámetros  $\beta_0, \dots, \beta_M$  que multiplican el *input* para obtener la predicción. En problemas de regresión,

$$\hat{y} = f(\beta) = \beta_0 + \sum_{j=1}^M \beta_j x^j$$

y en problemas de clasificación a través de una función sigmoide

$$\hat{y} = f(\beta) = \frac{1}{1 + e^{-(\beta_0 + \sum_{j=0}^M \beta_j x^j)}}$$

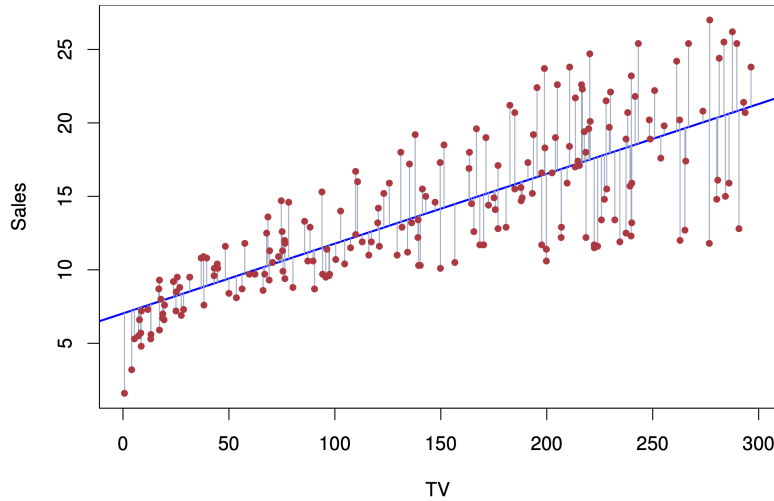


Figure 1: Linear Regression Diagram

El problema a optimizar (mínimos errores cuadrados) queda entonces definido por

$$\min_{\beta} \quad \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - f(\beta))^2$$

Cuya solución es cerrada en el caso de estimar una regresión y estimada a través del descenso de gradiente en el caso de una clasificación.

### 2.1.1 Regularization

Para prevenir el *overfitting* y que la importancia de los parámetros quede mejor distribuida, es posible agregar a la función un término regularizador de la siguiente forma

$$\begin{aligned} \min_{\beta} \quad & \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - f(\beta))^2 \\ \text{s.t.} \quad & \|\beta\|_p^p \leq t \end{aligned}$$

De manera equivalente, por el método de *Lagrange*, sin optimizar el valor de  $\lambda$  y eliminando constantes que no dependen de  $\beta$

$$\min_{\beta} \quad \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - f(\beta))^2 + \lambda \|\beta\|_p^p$$

Cuando  $p = 1$  se le conoce como regresión **Lasso** y cuando  $p = 2$  una regresión **Ridge**. La combinación de ambas restricciones es conocida como **Elastic Net**.

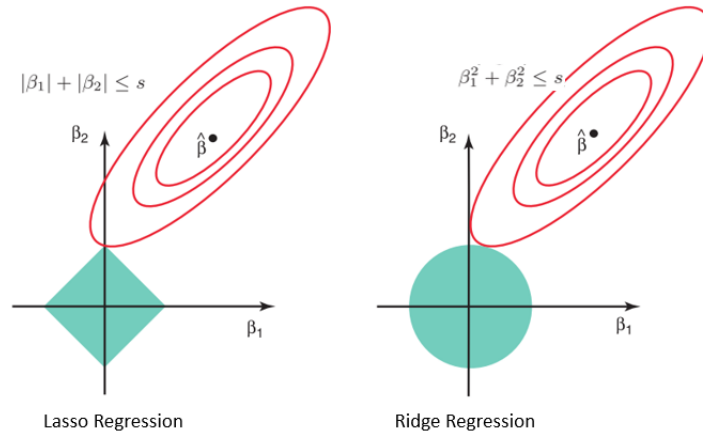


Figure 2: Lasso and Ridge Diagram

Notar que la restricción para el caso *Lasso* hace más probable que las curvas de nivel intersecten la restricción en una esquina (en mayor dimensión es incluso más probable) por lo que los parámetros que no son importantes para el modelo, serán llevados a 0. En el caso de la restricción *Ridge*, la forma permite que los valores queden acotados pero ninguno será llevado a 0.



Figure 3: Regularization Feature Importance

## 2.2 Decision Trees

Un árbol de decisión es un modelo de aprendizaje **supervisado** utilizado para problemas de **regresión** y **clasificación**. El objetivo es aprender simples reglas de decisión a partir de las features.



Figure 4: Decision Tree Diagram

En el caso de un problema de clasificación, la variable a escoger y el corte correspondiente se puede elegir como aquel que minimice el desorden de los elementos. Definimos primero la **entropía** según

$$H(p) = - \sum_{j=1}^L p_j \log_2 p_j$$

donde  $p_j$  es la frecuencia relativa del label  $j$  en un grupo. Notar que la entropía es mínima cuando el grupo solo tiene elementos de la clase 0 o de la clase 1 ( $p_j = 1$ ) y máxima cuando hay la misma cantidad de elementos de cada clase ( $p_j = \frac{1}{2}$ ).

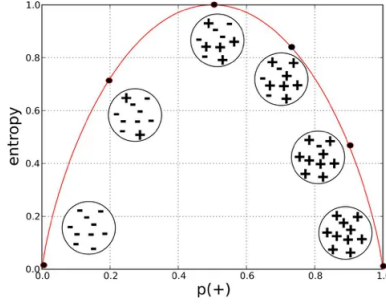


Figure 5: Entropy Diagram

Con la entropía ya definida, definamos la **Information Gain** como

$$IG(S, D) = H(S) - \sum_{V \in D} \frac{|V|}{|D|} H(V)$$

Donde el primer término es la entropía antes del split y el segundo término es la suma de las entropías después del split. Podemos iterar hasta que la *Information Gain* no tenga modificaciones (es decir, llegar a los nodos puros) pero esto podría traer problemas de *overfitting*, en general esto se regula con la profundidad del árbol y escogiendo en cada iteración, la división que maximiza el IG.

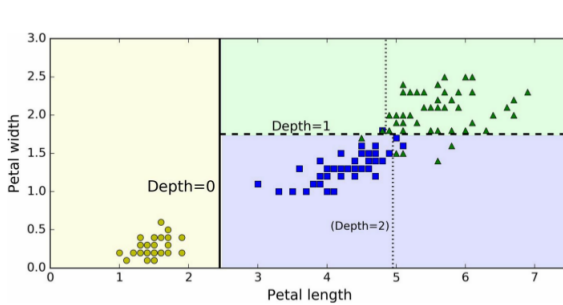
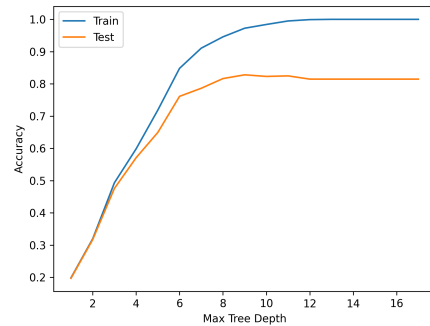


Figure 6-2. Decision Tree decision boundaries

(a) Decision Tree Boundaries



(b) Max Depth and Accuracy

Figure 6: Decision Tree Implementation

En vez de la entropía, es posible usar otro indicador como el **Gini Index** definido como:

$$G(p) = 1 - \sum_{j=1}^L p_j^2$$

## 2.3 Random Forest

### 2.3.1 Ensemble Methods

Los **métodos de ensamblaje** son aquellos en los que se combinan múltiples estimadores entrenados sobre los datos para generar una predicción más robusta (menor varianza) y generalizada. La predicción

final se puede realizar por *Majority Voting*, *Simple Average* o *Weighted Average*.

Existen 3 estrategias principales en los métodos de ensamblaje:

1. **Bagging**: Corresponde a una abreviación de *Bootstrap Aggregating*, esta estrategia entrena cada estimador base con una **muestra con reemplazo** de ejemplos del conjunto de entrenamiento.
2. **Boosting**: Esta estrategia se basa en entrenar secuencialmente estimadores base débiles que **aprenden de los errores del anterior** para crear un estimador robusto.
3. **Stacking**: Este método combina las predicciones de múltiples estimadores fuertes en una sola.

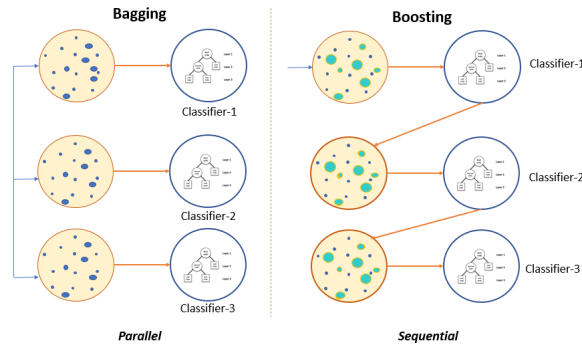


Figure 7: Bagging and Boosting Diagram

El algoritmo de *Random Forest* es un método **supervisado de ensamblaje** basado en *Decision Trees*. Este, utiliza la estrategia de **bagging** para entrenar cada árbol de decisión sobre muestras con reemplazo del conjunto de entrenamiento y además, cada árbol es entrenado sobre un **subconjunto aleatorio de features** para asegurar que no haya similitud entre ellos. Ambas estrategias permiten mejorar la precisión del modelo y controlar el *overfitting*.

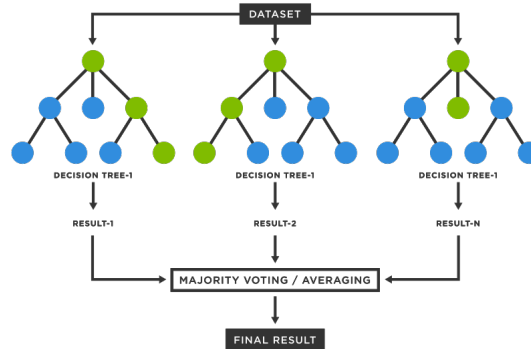


Figure 8: Random Forest Diagram

Para estimar la **feature importance** en modelos basados en árboles, se pueden mirar 3 posibles aspectos:

1. Suma de las *information gain* con una variable determinada (o cuánto reduce la entropía, es equivalente).
2. Cantidad de nodos resultantes de la división con esa variable.
3. Profundidad promedio de un árbol en que su primera división es con esa variable.

Para extender esto a *Random Forest*, se toma un promedio entre los distintos árboles de decisión que lo conforman.

## 2.4 Gradient Boosting Classifier

## 2.5 Naive Bayes

Este modelo de aprendizaje **supervisado** puede ser utilizado para problemas de clasificación. Este algoritmo es una aplicación del teorema de *Bayes* en el que se asume (*Naive*) la independencia condicional entre los pares de features  $x^j$  dado el valor del label  $y$

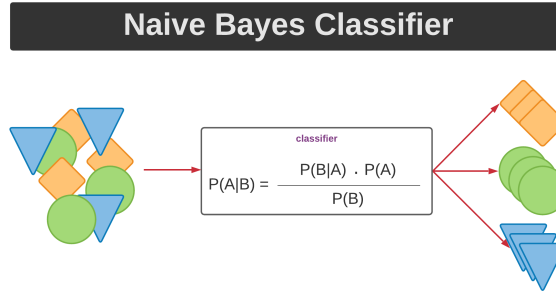


Figure 9: Naive Bayes Diagram

La formulación es la siguiente:

$$P(y|x^1, \dots, x^M) = \frac{P(y)P(x^1, \dots, x^M|y)}{P(x^1, \dots, x^M)} = \frac{P(y) \prod_{j=1}^M P(x^j|y)}{P(x^1, \dots, x^M)} \propto P(y) \prod_{j=1}^M P(x^j|y)$$

y la predicción se realiza según

$$\hat{y} = \operatorname{argmax}_y P(y) \prod_{j=1}^M P(x^j|y)$$

### 2.5.1 Gaussian Naive Bayes

Aquí consideramos que  $x^j|y \sim \mathcal{N}(\mu_j, \sigma_j^2)$ , es decir, cada feature sigue una distribución normal según:

$$P(x^j|y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_j^2}} \exp\left(-\frac{(x^j - \mu_j)^2}{2\sigma_j^2}\right)$$

donde la media y varianza  $\mu_j$  y  $\sigma_j$  respectivamente, son calculados a través de la máxima verosimilitud, es decir, si  $x_i = (x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^M)$  con  $i \in \{1, \dots, N\}$  los datos, entonces  $\mu_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^j$  y  $\sigma_j = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i^j - \mu_j)^2}$ . Notar que esto se debe calcular utilizando los datos de la clase respectiva  $y$ .



La definición anterior funciona bien con tipos de data numéricos.

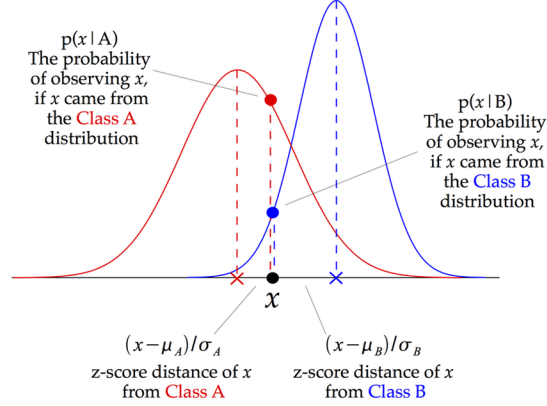


Figure 10: Gaussian Naive Bayes Diagram

## 2.5.2 Multinomial Naive Bayes

Aquí consideramos que  $x^j|y$  sigue una distribución multinomial donde los parámetros  $(p_{j_1}, \dots, p_{j_k})$  de esta distribución son calculados según

$$p_{j_k} = \frac{N_{j_k} + \alpha}{N_j + \alpha}$$

Donde  $N_{j_k}$  es la cantidad de veces que la categoría  $k$  de la feature  $j$  aparece en los datos con clase  $y$  del conjunto de entrenamiento y  $N_j = \sum_k N_{j_k}$ . El parámetro  $\alpha$  es un *Smoothing Prior* para estabilidad numérica.

La definición anterior funciona bien con tipos de datos categóricos.

## 2.6 Support Vector Machines

Las *Support Vector Machines* o SVM, son modelos de aprendizaje **supervisados** que pueden ser usados para problemas de clasificación y regresión. Se construyen a partir de la búsqueda de un hiper-plano separador y vectores de soporte que maximizan la distancia entre las clases.

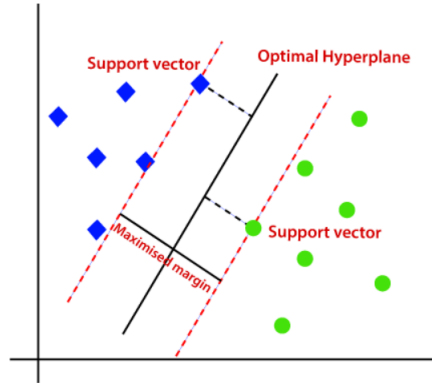


Figure 11: SVM Diagram

Consideremos el caso binario donde  $Y \in \{0, 1\}^n$ . El hiper-plano separador está definido por

$$H = \{x \in \mathbb{R}^n | w^\top x + b = 0\}$$

Donde  $w$  es el vector perpendicular al hiper-plano y  $b$  un *offset*. De esta forma si  $w^\top x + b > 0$  quiere decir que  $x$  pertenece a la clase 1 y  $w^\top x + b < 0$  que  $x$  pertenece a la clase 0, escrito de otra forma

$$y_i(w^\top x + b) \geq 1 \quad \forall i \in \{1, \dots, N\}$$

En el caso de un problema de clasificación linealmente separable, existen infinitos hiper-planos que satisfacen las condiciones anteriores (basta con rotar ligeramente el hiper-plano) por lo que vamos a exigir además las siguientes condiciones sobre vectores de soporte  $x_-$  y  $x_+$ .

$$\begin{aligned} w^\top x_+ + b &= 1 \\ w^\top x_- + b &= -1 \end{aligned}$$

Notar entonces que con esta condición, es posible calcular el ancho  $m$  de la separación entre el hiper-plano y el vector de soporte. Recordemos que la distancia  $m$  de un vector  $x$  a un hiperplano con vector normal  $w$  viene dada por

$$m = \frac{|\langle w, x \rangle|}{\|w\|}$$

Considerando la definición de los vectores de soporte, se tiene que

$$2m = \frac{|\langle w, x_+ \rangle|}{\|w\|} + \frac{|\langle w, x_- \rangle|}{\|w\|} = \frac{|1 - b|}{\|w\|} + \frac{|-1 - b|}{\|w\|}$$

Además el *offset*  $b \in [0, 1]$  por la definición anterior, así

$$m = \frac{1}{\|w\|}$$

Finalmente, el problema de optimización quedaría de la siguiente forma

$$\begin{aligned} \max_{\omega, b} \quad & \frac{1}{\|w\|} \\ \text{s.t.} \quad & y_i(w^\top x_i + b) \geq 1, \forall i \in \{1, \dots, N\} \end{aligned}$$

Equivalente a

$$\begin{aligned} \min_{\omega, b} \quad & \frac{1}{2} \|w\|^2 \\ \text{s.t.} \quad & y_i(w^\top x_i + b) \geq 1, \forall i \in \{1, \dots, N\} \end{aligned}$$

Este problema se resuelve utilizando el **dual** (*quadratic programming*) y es fundamental para la extensión no-lineal de la SVM (*Kernel Trick*).

### 2.6.1 Soft Margin

Los datos son usualmente no linealmente separables, por lo que hay que permitir un error en la clasificación de ciertos puntos (*soft margin*). Este cambio en el problema de optimización se reduce a la siguiente regularización:

$$\begin{aligned} \min_{\omega, b} \quad & \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^N \xi_i \\ \text{s.t.} \quad & y_i(w^\top x_i + b) \geq 1 - \xi_i, \forall i \in \{1, \dots, N\}, \xi_i \geq 0 \end{aligned}$$

### 2.6.2 Kernel Trick

En la formulación del problema dual, la función objetivo requiere el cómputo del producto interno entre todos los puntos del conjunto de entrenamiento. Si buscamos proyectar nuestra data a una dimensión mayor (aplicar algún mapeo  $\phi$  para hacer la separación posible), esto se puede realizar calculando los productos  $\langle \phi(x_i), \phi(x_j) \rangle$  para todo  $i$  y  $j$ .

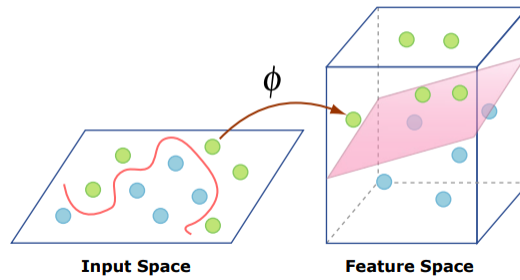


Figure 12: Kernel Trick

El paso fundamental del truco del kernel es que no es necesario conocer el mapeo  $\phi$  explícitamente pues por el teorema de *Mercer*

$$K(x_i, x_j) = \langle \phi(x_i), \phi(x_j) \rangle$$

donde  $K : X \times X \rightarrow \mathbb{R}$  es un kernel de *Mercer* en un espacio de *Hilbert* (posiblemente de dimensión infinita), por lo que solo basta que definamos  $K$  para tener un posible mapeo de las características.

### 2.6.3 Kernels

Para que un *kernel* pueda utilizarse en el contexto de las SVM, es importante que cumpla con las condiciones de *Mercer*:

- Symmetry:  $K(x, y) = K(y, x) \quad \forall x, y$
- Positive Semi-Definiteness: Para cualquier vector  $c \in \mathbb{R}^n$ , y  $x_1, \dots, x_n$  una cantidad finita de puntos, se debe satisfacer que

$$\sum_{i,j} c_i c_j K(x_i, x_j) \geq 0$$

Algunos ejemplos de *kernels* que se pueden utilizar son:

1. **Linear Kernel:**  $K(x, y) = \langle x, y \rangle$ .

El más útil cuando la data es linealmente separable.

2. **Polynomial Kernel:**  $K(x, y) = (x^\top y + c)^d$ .

El parámetro  $d$  controla el nivel de complejidad del kernel pero valores muy altos podrían llevar a *overfitting*.

3. **Gaussian Radial Basis Function (RBF) Kernel:**  $K(x, y) = e^{-\gamma \|x-y\|^2}$ .

Este kernel es el más popular pues **mapea los datos a un espacio de dimensión infinita**. El parámetro  $\gamma$  controla la complejidad de los *decision boundaries* al agregar mayor o menor *spread* al kernel.

4. **Sigmoid Kernel:**  $K(x, y) = \tanh(ax^\top y + b)$

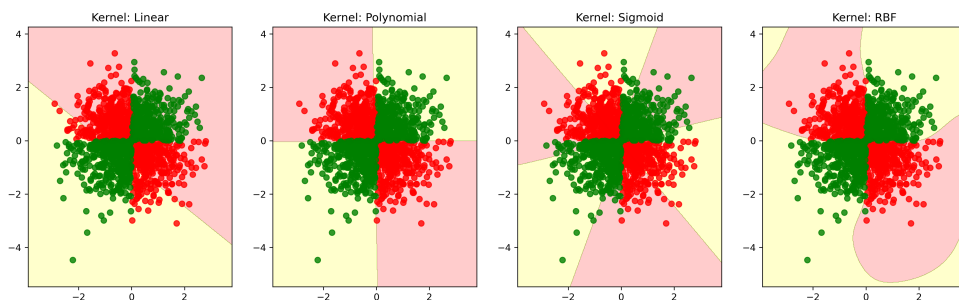


Figure 13: Kernel Decision Boundaries

## 2.7 ARIMA

ARIMA es la abreviación de *Auto-Regressive Integrated Moving Average* y es un método estadístico para realizar *forecasting* sobre series de tiempo que integra los siguientes conceptos:

1. Toma en consideración patrones de crecimiento/decrecimiento en la serie de tiempo (*Auto-Regressive*).
2. Estima tasa de crecimiento/decrecimiento (*Integrated*).
3. Controla el ruido entre datos consecutivos en el tiempo (*Moving Average*).

La fórmula general para este tipo de modelos viene dada por

$$Y_t = c + \phi_1 y_{t-1}^d + \dots + \phi_p y_{t-p}^d + \theta_1 e_{t-1} + \dots + \theta_q e_{t-q} + e_t$$

Aquí  $c$  es una constante y  $e$  es un término de error. Los modelos de este tipo son escritos como  $ARIMA(p, d, q)$  donde:

- $p$  es la cantidad de tiempos en que la variable es mirada al pasado (*Lag*).

- $d$  es la cantidad de veces que la variable es diferenciada para producir una señal estacionaria.  $d = 0$  refiere a que la señal ya es estacionaria,  $d = 1$  es que la señal crece/decrece linealmente y  $d = 2$  es que la señal crece exponencialmente.
- $q$  representa la cantidad de *lag* para el término de error  $e$ , esto captura el *Moving Average*.

### 2.7.1 P Value

En la práctica, es posible determinar el valor de  $p$  a través del *Partial Autocorrelation Plot*. Este gráfico muestra la relación de un valor en la serie de tiempo con **un solo lag** (eliminando relaciones de tiempos intermedios ajustando una regresión lineal y quedándose sólo con el parámetro correspondiente).

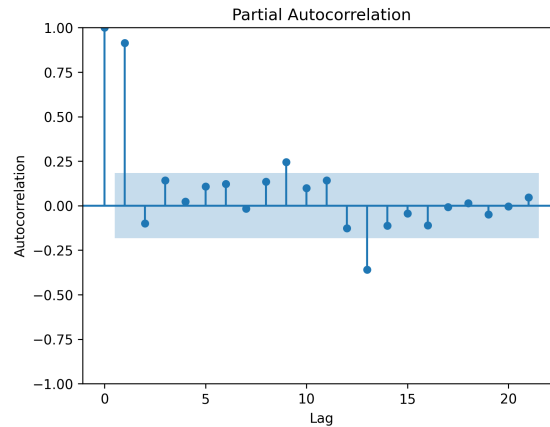


Figure 14: Partial Autocorrelation Plot

El valor óptimo es el último punto después del cual todos los lags están dentro de las bandas azules (intervalos de confianza), en este caso  $p = 13$ .

### 2.7.2 D Value

El valor de  $d$  se puede calcular diferenciando la serie de tiempo hasta encontrar una serie estacionaria. Esto lo podemos medir con un test estadístico de estacionalidad (*Augmented Dickey Fuller Test*).

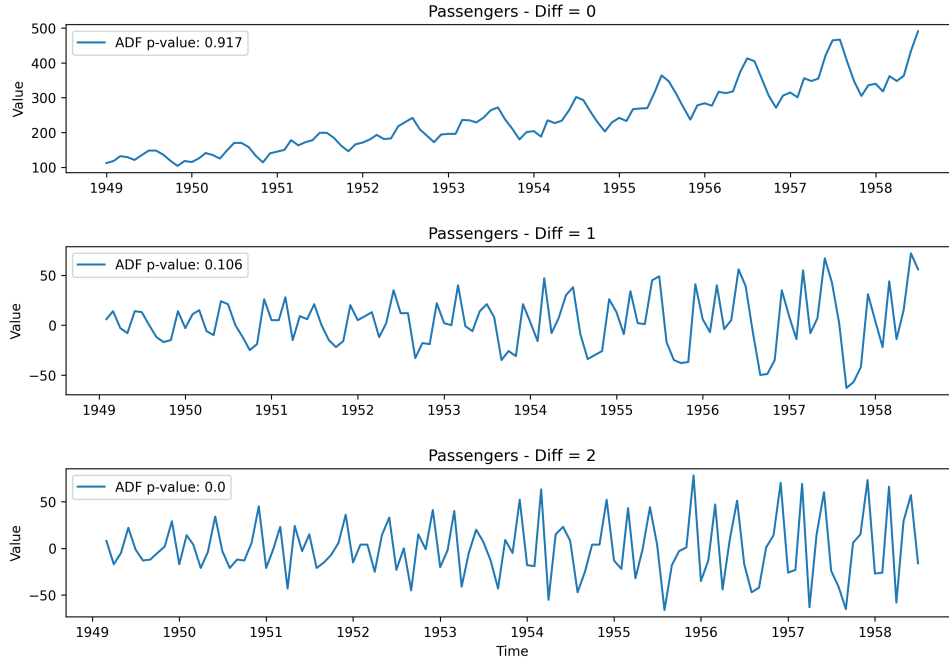


Figure 15: Time Series Differentiation Plot

Vemos que el  $p$ -valor en la segunda diferenciación ya es lo suficientemente pequeño para asumir estacionalidad en la serie de tiempo, así  $d = 2$ .

### 2.7.3 Q Value

Finalmente, para determinar el valor  $q$  es posible ver el *Autocorrelation Plot* que muestra la relación de un valor en la serie de tiempo con **todos los  $p$  lags** anteriores.

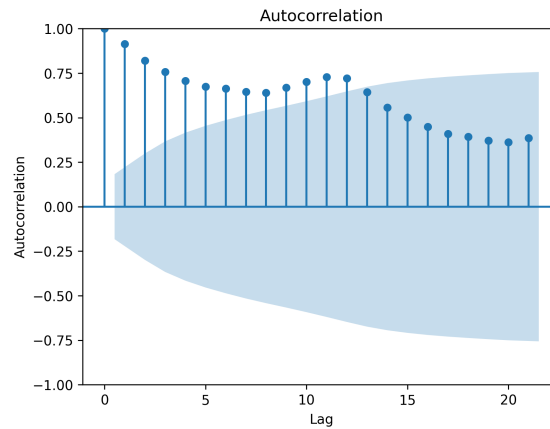


Figure 16: Autocorrelation Plot

En este caso, el último valor anterior a que todos los  $lag$  caigan en la zona azul, es  $q = 12$ .

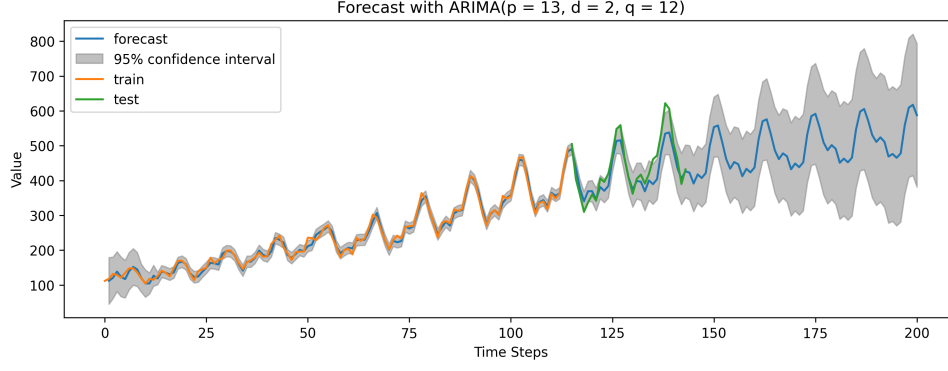


Figure 17: ARIMA over Flight Passengers Forecasting

### 3 K-Means

El algoritmo de *K-Means* es un algoritmo **no supervisado de clustering**.

### 4 Principal Component Analysis (PCA)

El análisis de componentes principales (PCA) es un método no supervisado de **reducción de dimensionalidad**. Consideremos la matriz con los datos  $X \in \mathcal{M}_{N \times M}$ , es decir, el dataset con  $N$  filas y  $M$  columnas. Se define la matriz de covarianza  $K = (K_{ij})_{ij} \in \mathcal{M}_{M \times M}$  donde

$$K_{ij} = \text{Cov}(X_i, X_j) = \mathbb{E}((X_i - \mathbb{E}(X_i))(X_j - \mathbb{E}(X_j))) = \mathbb{E}(X_i X_j) - \mathbb{E}(X_i)\mathbb{E}(X_j)$$

Cuando las features  $i, j$  son linealmente independientes, entonces  $K_{ij} = 0$ . Si ambas crecen conjuntamente, entonces su covarianza será positiva y de caso contrario, será negativa. A continuación, se calculan los **valores y vectores propios**, es decir, los valores  $(\lambda_i)_i$  y  $(v_i)_i$  que cumplen para todo  $i$  la relación

$$K v_i = \lambda v_i$$

Los componentes principales serán aquellos vectores propios  $(v_i)_i$  cuyo valor propio asociado  $(\lambda_i)_i$  es mayor, es decir, la **dirección de máxima varianza**. Para obtener la transformación de los datos a  $k$  dimensiones, basta juntar los  $k$  vectores propios con mayor valor propio en una matriz  $V \in \mathcal{M}_{M \times k}$  y calcular

$$\hat{X} = X V \in \mathcal{M}_{N \times k}$$

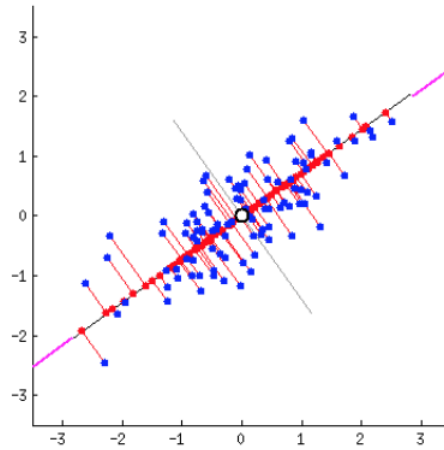


Figure 18: PCA Diagram

En problemas de clasificación o *clustering*, este enfoque puede ser útil para **visualizar etiquetas/clusters** en un gráfico de 2 o 3 dimensiones, o bien, puede ser utilizado para disminuir y condensar la información de un dataframe.

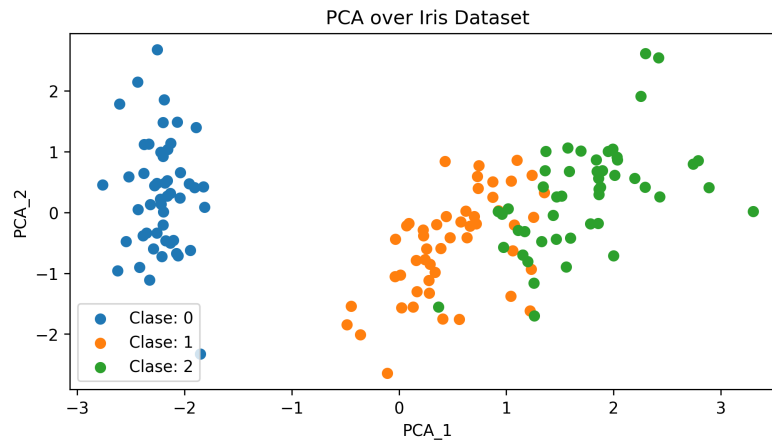


Figure 19: PCA over Iris Dataset

## 5 Others

### 5.1 Performance Metrics

### 5.2 Bias vs Variance

### 5.3 Oversampling and Undersampling

### 5.4 SHAP Values



## 6 REMOVE

**Theorem 6.1.** This is a theorem.

**Proposition 6.2.** This is a proposition.

**Principle 6.3.** This is a principle.

### 6.1 Pictures

### 6.2 Citation

This is a citation [1].

## References

- [1] H. Ren, “Template for math notes,” 2021.