

# Selección de Variables, Regularización y Validación

Víctor Aceña - Isaac Martín

DSLAB

2025-09-11



En modelos de regresión con gran número de variables predictoras enfrentamos el desafío crítico de identificar qué variables son realmente relevantes

Los problemas principales:

- Inclusión de demasiadas variables → **sobreajuste**, pérdida de **interpretabilidad**, complejidad innecesaria
- Exclusión de variables importantes → **modelos subóptimos**
- Con  $p$  variables explicativas:  $2^p$  modelos diferentes posibles
- Exploración exhaustiva **computacionalmente inviable** cuando  $p$  es grande

**El objetivo del tema:** Seleccionar el subconjunto óptimo de variables predictoras y validar la calidad del modelo resultante

## Seis enfoques sistemáticos:

### 1. Filtrado basado en información básica

- Eliminación preliminar de variables irrelevantes
- Criterios: variabilidad, correlación, VIF

### 2. Criterios de bondad de ajuste

- Métricas para comparar modelos: AIC, BIC, Cp de Mallows

### 3. Métodos de selección exhaustiva

- Evaluación sistemática: Best Subset Selection

### 4. Métodos automáticos paso a paso

- Selección iterativa: forward, backward, stepwise

### 5. Métodos basados en regularización

- Penalización de complejidad: Ridge, Lasso, Elastic Net

### 6. Validación del modelo

- División train/test y validación cruzada

## Etapas del proceso sistemático:

1. Definición del problema y variables de interés
2. Recogida de datos (fiabilidad, validez, ética, control de sesgos)
3. Análisis Exploratorio de Datos (EDA)
4. Ajuste del modelo inicial
5. Evaluación del modelo ( $R^2$ , ANOVA, significancia)
6. Diagnóstico del modelo (residuos, observaciones atípicas)
7. Reducción de variables ← Enfoque principal del tema
8. Validación del modelo ← Enfoque principal del tema

Este tema se centra en las etapas 7 y 8

## Clasificación según el diseño:

- **Experimentos controlados:** Manipulación deliberada de variables independientes
- **Estudios observacionales exploratorios:** Sin intervención, registro natural
  - Transversales (un momento temporal)
  - Longitudinales (seguimiento temporal)
- **Estudios observacionales confirmatorios:** Testear hipótesis específicas
- **Encuestas y cuestionarios:** Datos estructurados sobre actitudes/comportamientos
- **Experimentos naturales:** Fenómenos naturales como intervención
- **Estudios de simulación:** Modelos matemáticos/computacionales
- **Datos secundarios:** Bases de datos existentes

**Objetivo:** Filtrado preliminar antes de métodos sofisticados

**Criterios de eliminación básicos:**

## 1. Variabilidad de las variables predictoras

$$\text{Var}(X_j) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2 < \epsilon$$

(típicamente  $\epsilon = 0.01$ )

## 2. Correlación con la variable respuesta

$$r_{X_j, Y} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

Umbral mínimo:  $|r_{X_j, Y}| > \delta$  (ej:  $\delta = 0.1$ )

**Detectar y eliminar variables redundantes:**

**3. Multicolinealidad extrema** Si  $|r_{X_j, X_k}| > 0.95 \rightarrow$  eliminar una variable

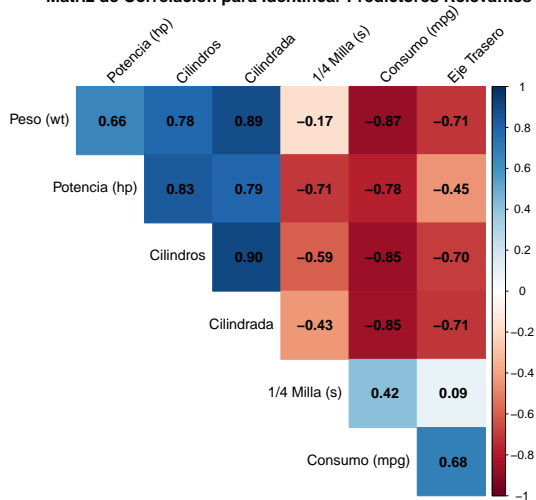
**4. Factor de Inflación de la Varianza (VIF)**

$$VIF_j = \frac{1}{1 - R_j^2}$$

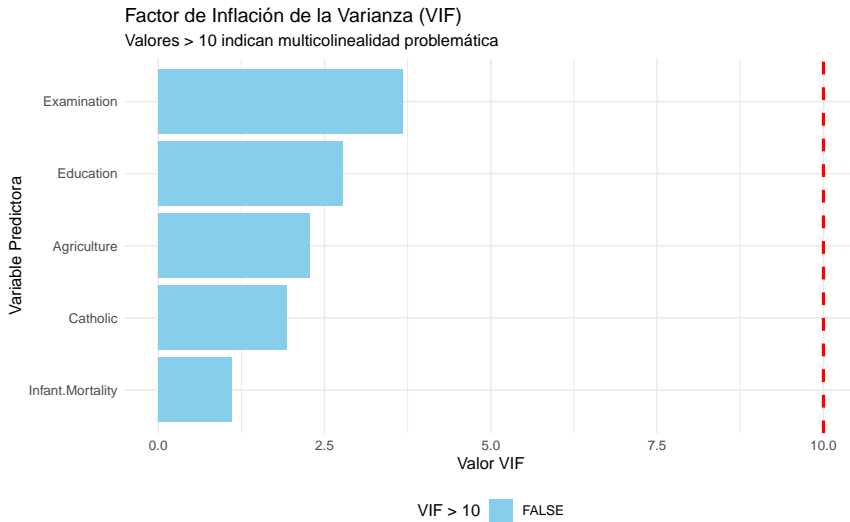
Valores  $VIF_j > 10$  indican multicolinealidad problemática

**Estrategia:** Eliminar variables con mayor VIF iterativamente hasta que todos los VIF sean aceptables

Matriz de Correlación para Identificar Predictores Relevantes







**Problema:** Equilibrar capacidad explicativa vs complejidad del modelo

**Subajuste vs Sobreajuste:** - Muy pocas variables  $\rightarrow$  subajuste (underfitting) - Demasiadas variables  $\rightarrow$  sobreajuste (overfitting)

**Tres criterios principales:**

1. Criterio de Información de Akaike (AIC)
2. Criterio de Información Bayesiano (BIC)
3. Estadístico  $C_p$  de Mallows

**Estrategia:** Seleccionar el modelo que minimice el criterio elegido

**Fundamento:** Teoría de la información de Hirotugu Akaike

**Objetivo:** Estimar la pérdida de información del modelo

**Fórmula:**

$$AIC = n \ln \left( \frac{SSE}{n} \right) + 2(p + 1)$$

**Componentes:**

- $n \ln(SSE/n)$ : **Bondad de ajuste** (relacionado con log-verosimilitud)
- $2(p + 1)$ : **Penalización por complejidad** (aumenta 2 unidades por parámetro)

**Interpretación:**

- Menor AIC = mejor modelo
- Asintóticamente eficiente
- **Orientado a predicción**

**Fundamento:** Estadística bayesiana (Gideon Schwarz)

**Objetivo:** Encontrar el modelo más probable de ser el “verdadero”

**Fórmula:**

$$BIC = n \ln \left( \frac{SSE}{n} \right) + (p + 1) \ln(n)$$

**Diferencia clave con AIC:**

- Penalización:  $(p + 1) \ln(n)$  en lugar de  $2(p + 1)$
- Más restrictivo cuando  $n > 7$  (ya que  $\ln(n) > 2$ )

**Características:**

- **Consistencia:** Si el modelo verdadero está entre candidatos,  $P(\text{selección}) \rightarrow 1$
- **Orientado a explicación**
- Favorece modelos más simples (parsimonia)

**Fundamento:** Error cuadrático medio de predicción

**Objetivo:** Modelo con bajo sesgo y baja varianza

**Fórmula:**

$$C_p = \frac{SSE_p}{MSE_{full}} - n + 2(p + 1)$$

donde  $MSE_{full}$  es el error cuadrático medio del modelo completo

**Interpretación:**

- **Modelo bien especificado:**  $C_p \approx p + 1$
- $C_p > p + 1$ : modelo sesgado (variable importante omitida)
- $C_p \leq p + 1$ : buen ajuste

**Estrategia:** Buscar modelos donde  $C_p \approx p + 1$ , elegir el menor entre ellos

## Si el objetivo principal es la predicción:

- **AIC** es la opción preferida
- Diseñado para minimizar error de predicción
- Penalización más moderada
- Ideal en contextos de pronóstico

## Si el objetivo es la explicación/inferencia:

- **BIC** es la elección más sólida
- Identifica el modelo más parsimonioso
- Penalización más fuerte contra sobreajuste
- Propiedad de consistencia en muestras grandes

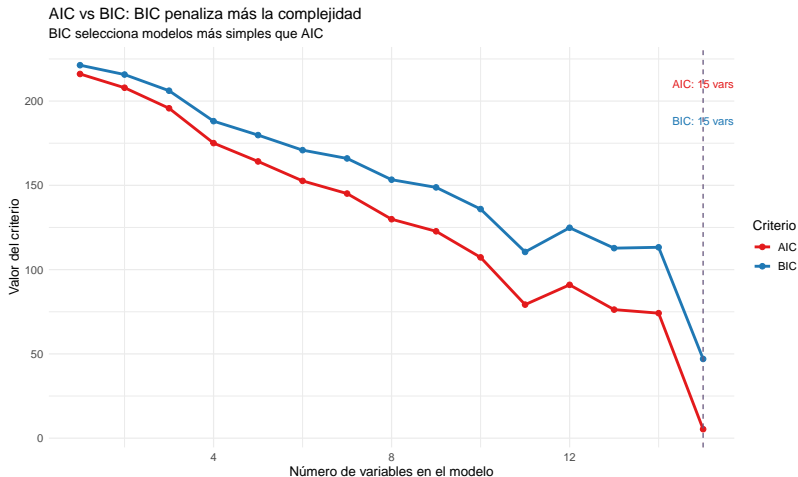
## Para análisis exploratorio:

- **Cp de Mallows** es especialmente valioso
- Compromiso explícito entre sesgo y varianza
- Visualización clara del “codo” de complejidad óptima

## Resumen práctico:

- **Predicción** → AIC (menos restrictivo)
- **Explicación** → BIC (más parsimonioso)
- **Exploración** → Cp de Mallows (balance visual)
- **Muestras grandes** → BIC preferible
- **Muestras pequeñas** → AIC o Cp

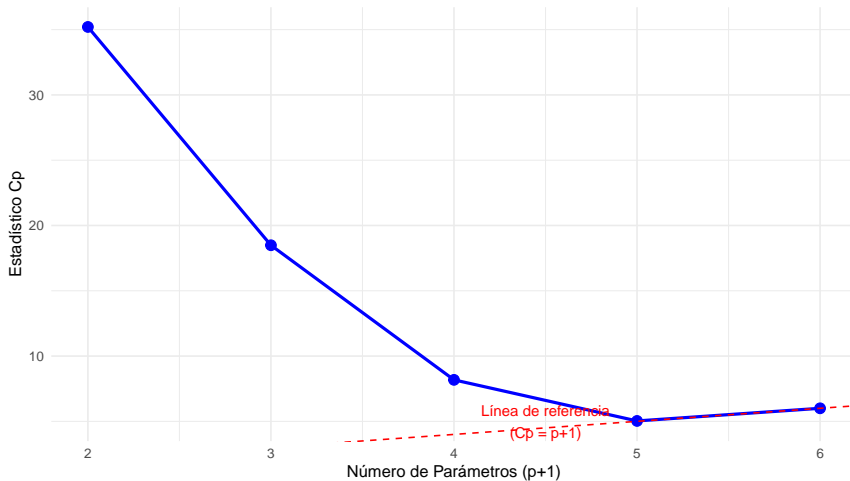
# Visualización: Criterios de Información (AIC vs BIC)



# Visualización: Selección con $C_p$ de Mallows

## Gráfico $C_p$ de Mallows

Buscamos modelos donde  $C_p$  es pequeño y cercano al número de parámetros ( $p+1$ )





**Best Subset Selection:** Evalúa **todos** los subconjuntos posibles

**Proceso:**

- Para  $k = 1, 2, \dots, p$  variables
- Construir todos los modelos posibles con  $k$  variables
- Seleccionar el mejor modelo de cada tamaño según criterio elegido

**Ventajas:**

- Garantiza encontrar el modelo óptimo según el criterio
- Evaluación completa de todas las combinaciones
- Estándar para comparar otros métodos

**Limitaciones:**

- Complejidad computacional:  $2^p$  modelos posibles
- Impracticable para  $p > 15 - 20$
- Puede seleccionar modelos sobreajustados sin validación cruzada

**Principio:** Construir modelo iterativamente, añadiendo o quitando predictores uno a uno

## Forward Selection:

1. Comenzar con modelo nulo (solo intercepto)
2. Añadir variable que más mejora el criterio
3. Repetir hasta que ninguna variable mejore significativamente
4. **Problema:** No puede eliminar variables una vez incluidas

## Backward Elimination:

1. Comenzar con modelo completo (todas las variables)
2. Eliminar variable menos significativa
3. Repetir hasta que todas las variables sean significativas
4. **Problema:** Requiere  $n > p$

## Stepwise Regression:

1. Combina forward + backward
2. Puede añadir y eliminar variables
3. **Problema:** Solo encuentra óptimo local

## Limitaciones importantes de métodos automáticos:

- **Inestabilidad:** Pequeños cambios en datos pueden alterar el modelo
- **Invalidez de p-valores:** Múltiples comparaciones sesgan la inferencia
- **Óptimo local:** No garantizan la mejor combinación
- **Inflación del error tipo I:** Sin corrección para comparaciones múltiples

**Uso recomendado:** Como herramientas exploratorias, no para inferencia final

**Principio:** Introducir penalización en la función de ajuste del modelo

**Objetivos:**

- Controlar el sobreajuste reduciendo complejidad
- Forzar selección de subconjunto más parsimonioso
- Mejorar estabilidad y precisión del modelo

**Tres métodos principales:**

- **Ridge Regression:** Penalización  $L_2 = \lambda \sum \beta_j^2$
- **Lasso:** Penalización  $L_1 = \lambda \sum |\beta_j|$
- **Elastic Net:** Combina  $L_1 + L_2$

**Ventaja clave:** Control automático del balance sesgo-varianza

**Fundamento:** Penalización  $L_2$  en la estimación de coeficientes

**Formulación:**

$$SSE_{ridge} = \|\mathbf{y} - \mathbf{X}\boldsymbol{\beta}\|^2 + \lambda \sum_{j=1}^p \beta_j^2$$

**Estimación:**

$$\hat{\boldsymbol{\beta}}_{ridge} = (\mathbf{X}^T\mathbf{X} + \lambda\mathbf{I})^{-1}\mathbf{X}^T\mathbf{y}$$

**Interpretación del parámetro  $\lambda$ :**

- $\lambda = 0$ : equivalente a regresión lineal tradicional (OLS)
- $\lambda$  aumenta: coeficientes se reducen en magnitud
- $\lambda$  muy grande: coeficientes se acercan a cero

**Propiedades:**

- Manejo de multicolinealidad
- Menor varianza en predicciones
- **No realiza selección de variables** (no anula coeficientes)

**Fundamento:** Penalización  $L_1$  que permite eliminación de variables

**Formulación:**

$$SSE_{\text{lasso}} = \|\mathbf{y} - \mathbf{X}\boldsymbol{\beta}\|^2 + \lambda \sum_{j=1}^p |\beta_j|$$

**Diferencia clave con Ridge:**

- Ridge reduce magnitud de coeficientes
- **Lasso puede eliminar variables por completo** (coeficientes = 0)

**Interpretación del parámetro  $\lambda$ :**

- $\lambda = 0$ : regresión lineal tradicional
- $\lambda$  aumenta: más coeficientes  $\rightarrow 0$
- $\lambda$  muy grande: elimina demasiadas variables

**Propiedades:**

- Selección automática de variables
- Manejo de multicolinealidad
- Simplicidad e interpretabilidad
- Reduce sobreajuste

**Fundamento:** Combinación de penalizaciones Ridge ( $L_2$ ) y Lasso ( $L_1$ )

**Formulación:**

$$SSE_{\text{Elastic Net}} = \|\mathbf{y} - \mathbf{X} \boldsymbol{\beta}\|^2 + \lambda \left[ \alpha \sum_{j=1}^p |\beta_j| + (1 - \alpha) \sum_{j=1}^p \beta_j^2 \right]$$

**Parámetro  $\alpha$  controla la mezcla:**

- $\alpha = 1 \rightarrow$  Comportamiento como Lasso
- $\alpha = 0 \rightarrow$  Comportamiento como Ridge
- $0 < \alpha < 1 \rightarrow$  Combinación de ambos métodos

**Ventajas principales:**

- Manejo superior de multicolinealidad
- Selección de variables más estable
- Evita selección arbitraria cuando hay grupos correlacionados

## Ridge Regression:

- Todas las variables aportan información
- Fuerte multicolinealidad presente
- Objetivo: reducir varianza sin eliminar variables

## Lasso:

- Muchas variables irrelevantes esperadas
- Selección sparse deseable
- Interpretabilidad prioritaria

## Elastic Net:

- Variables correlacionadas en grupos
- Balance entre selección y estabilidad
- Rendimiento predictivo como objetivo principal

**Estrategia práctica:** Optimizar  $\alpha$  mediante validación cruzada junto con  $\lambda$



**El problema:** ¿Cómo elegir el valor óptimo de  $\lambda$ ?

**La solución:** Validación cruzada

**Proceso:**

1. Definir secuencia de valores  $\lambda$  candidatos
2. Para cada  $\lambda$ , calcular error de validación cruzada
3. Seleccionar  $\lambda$  que minimiza el error

**Dos criterios principales:**

- **$\lambda_{\min}$ :** Valor que minimiza el error de CV
- **$\lambda_{1SE}$ :** Valor más grande cuyo error está dentro de 1 error estándar del mínimo

**Regla 1-SE:** Preferir modelo más simple (mayor  $\lambda$ ) si su error es comparable al mínimo

## **Partición inicial (paso obligatorio):**

Antes de cualquier análisis, dividir datos originales en:

1. **Datos de modelado (80%):** Para todo el proceso de construcción
2. **Conjunto de prueba final (20%):** Guardado para evaluación final

**Dentro de los datos de modelado, tres estrategias principales:**

1. División Train/Test simple
2. Validación cruzada k-fold
3. Leave-One-Out Cross-Validation (LOOCV)

**Cada estrategia tiene sus ventajas e inconvenientes según el contexto del problema**

**Concepto:** División única de los datos de modelado

**Proceso:**

- **Conjunto de entrenamiento (70-80%):** Ajustar el modelo
- **Conjunto de test (20-30%):** Evaluar rendimiento

**Ventajas:**

- Computacionalmente muy eficiente
- Fácil de implementar y entender
- Apropiado para datasets grandes

**Desventajas:**

- **Alta variabilidad:** Resultados dependen de la división específica
- Puede ser optimista o pesimista según qué observaciones caigan en test
- Menos datos disponibles para entrenamiento

**Cuándo usar:** Datasets grandes ( $n > 1000$ ), recursos limitados, evaluación rápida

**Concepto:** Múltiples evaluaciones para obtener estimación más estable

**Proceso de k-fold CV:**

1. Dividir datos en  $k$  particiones de tamaño similar
2. Para cada partición  $i = 1, 2, \dots, k$ :
  - Usar partición  $i$  como conjunto de test
  - Usar las  $k - 1$  particiones restantes como entrenamiento
  - Calcular métrica de error
3. **Error de CV:**  $CV_{(k)} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \text{Error}_i$

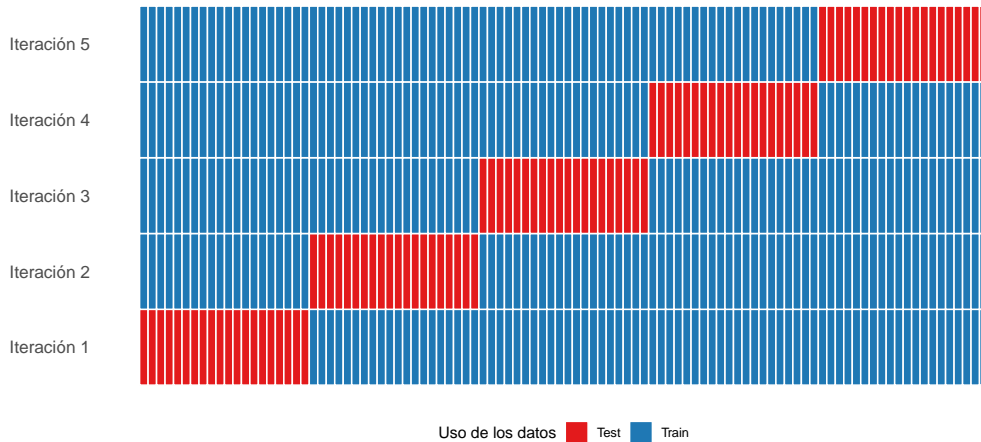
**Valores típicos:**  $k = 5$  o  $k = 10$

**Ventajas:**

- Estimación más estable y menos sesgada
- Todos los datos se usan para entrenamiento y test
- Reduce variabilidad de la estimación

## Proceso de Validación Cruzada con k=5 Folds

En cada iteración, un 'fold' se usa para test y el resto para entrenamiento



**Concepto:** Caso extremo donde  $k = n$  (número de observaciones)

**Proceso:**

- Para cada observación  $i$ :
  - Entrenar modelo con  $n - 1$  observaciones
  - Predecir la observación  $i$  excluida
  - Calcular error de predicción
- **Error LOOCV:**  $CV_{(n)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{y_i - \hat{y}_i}{1 - h_{ii}} \right)^2$

**Ventajas:**

- Estimación prácticamente insesgada
- Determinística (no depende de divisiones aleatorias)
- Máximo uso de datos para entrenamiento

**Desventajas:**

- Computacionalmente costoso
- Alta varianza en la estimación

## Train/Test Split:

- Dataset grande ( $n > 1000$ )
- Recursos computacionales limitados
- Necesidad de evaluación rápida
- Primera aproximación al problema

## Validación Cruzada k-fold:

- Dataset de tamaño moderado ( $100 < n < 1000$ )
- Balance entre eficiencia y precisión
- Estimación robusta del rendimiento
- **Más recomendado en general**

## LOOCV:

- Dataset pequeño ( $n < 100$ )
- Necesidad de estimación menos sesgada
- Recursos computacionales abundantes
- Regresión lineal (fórmula rápida disponible)

## Guía de decisión rápida:

- **$n > 1000$**  → Train/Test Split
- **$100 < n < 1000$**  → k-fold CV
- **$n < 100$**  → LOOCV
- **Tiempo limitado** → Train/Test Split
- **Máxima precisión** → k-fold CV

Una vez obtenidas las predicciones, necesitamos “calificar” el modelo

**Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE):**

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}$$

**Características del RMSE:**

- Penaliza desproporcionadamente errores grandes
- Sensible a valores atípicos
- Mismas unidades que la variable respuesta
- Interpretación: “desviación típica de los residuos”



## Error Absoluto Medio:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|$$

## Características del MAE:

- Trata todos los errores proporcionalmente
- Más robusto frente a valores atípicos
- Interpretación directa: “error promedio en valor absoluto”

## ¿Cuándo usar cada métrica?

- **RMSE:** Cuando errores grandes son especialmente problemáticos
- **MAE:** Cuando se prefiere robustez frente a valores atípicos
- **Ambas:** Para análisis completo del rendimiento predictivo

**La comparación clave:** Error en entrenamiento vs Error en validación

## Sobreajuste (Overfitting):

- **Síntoma:** Error entrenamiento bajo + Error validación mucho más alto
- **Causa:** Modelo memoriza ruido específico de los datos de entrenamiento
- **Solución:** Simplificar modelo, usar regularización, más datos

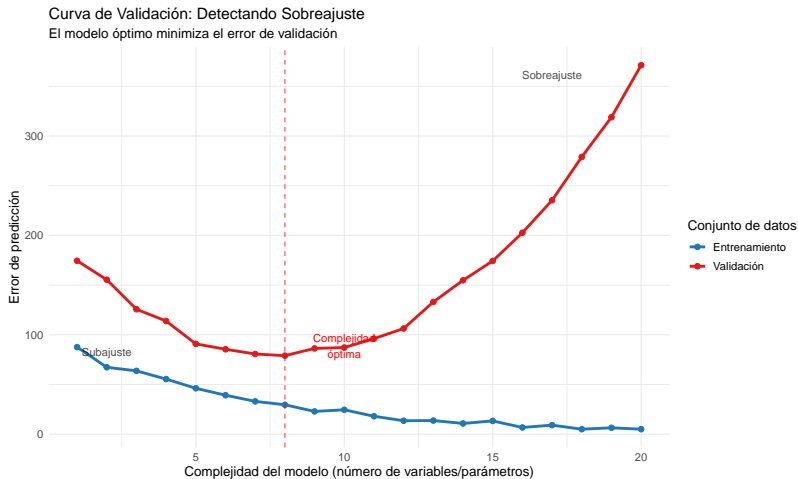
## Subajuste (Underfitting):

- **Síntoma:** Error entrenamiento alto + Error validación alto y similar
- **Causa:** Modelo demasiado simple, no captura estructura subyacente
- **Solución:** Aumentar complejidad, añadir variables, términos de interacción

## Modelo bien calibrado:

- **Síntoma:** Error entrenamiento y validación similares y bajos
- **Interpretación:** Buen equilibrio entre sesgo y varianza

**Resultado esperado:** El modelo correcto tendrá mejor rendimiento en validación cruzada, demostrando la importancia de la selección de variables.



## Después de todo el proceso de modelado:

1. Filtrado de variables
2. Selección del mejor método
3. Optimización de hiperparámetros
4. Validación cruzada para elegir modelo final

**El paso final:** Evaluar el modelo seleccionado en el conjunto de prueba final

## ¿Por qué es necesario?

- La validación cruzada se usó para **tomar decisiones** sobre el modelo
- Existe riesgo de sobreajuste al proceso de validación mismo
- Necesitamos una evaluación completamente independiente

## Interpretación:

- Error similar a validación cruzada → modelo robusto
- Error mucho mayor → posible sobreajuste al proceso de modelado

**Los métodos stepwise (forward, backward, stepwise) requieren precaución especial**

**Problemas fundamentales:**

1. **Invalidez de p-valores:** Los p-valores y errores estándar están sesgados
2. **Inestabilidad:** Pequeños cambios en datos pueden cambiar radicalmente el modelo
3. **Óptimo local:** No garantizan encontrar la mejor combinación de variables
4. **Inflación del error tipo I:** Múltiples comparaciones sin corrección

**Uso recomendado:**

- Como herramientas **exploratorias** únicamente
- Generar modelos candidatos para evaluación posterior
- Siempre validar con técnicas robustas
- No reportar p-valores del modelo final como definitivos

## Flujo de trabajo recomendado:

- 1. Partición inicial:** Separar conjunto de prueba final (20%)
- 2. En datos de modelado (80%):**
  - Filtrado básico de variables
  - Aplicar métodos de selección (exhaustivos, stepwise, regularización)
  - Comparar modelos con validación cruzada
  - Seleccionar modelo final
- 3. Evaluación final:** Probar modelo seleccionado en conjunto de prueba
- 4. Reportar:** Error de validación cruzada Y error en conjunto de prueba

## Criterios de decisión:

- Número de variables vs tamaño de muestra → método de selección
- Objetivo (predicción vs explicación) → criterio de información
- Multicolinealidad → regularización vs selección clásica

## Antes del modelado:

- EDA completo para entender los datos
- Conocimiento del dominio para variables importantes
- Objetivo claro: ¿predicción o explicación?
- Relación entre tamaño muestral y número de variables

## Durante la selección:

- Usar validación cruzada para todos los hiperparámetros
- Comparar múltiples métodos de selección
- No guiarse solo por métricas: considerar interpretabilidad
- Documentar todas las decisiones tomadas

## Después de la selección:

- Diagnóstico completo de residuos del modelo final
- Análisis de sensibilidad a observaciones influyentes
- Intervalos de confianza para coeficientes importantes
- Validación en el conjunto de prueba final

## Checklist de buenas prácticas:

- **Datos** → EDA + conocimiento del dominio
- **Método** → Múltiples enfoques + validación cruzada
- **Selección** → Criterios objetivos + interpretabilidad
- **Validación** → Diagnóstico + evaluación

## Lo aprendido en este tema:

1. **Filtrado inicial:** Elimina problemas básicos de forma eficiente
2. **Criterios de información:** Guían comparación objetiva de modelos
3. **Métodos exhaustivos:** Garantizan óptimo pero son computacionalmente costosos
4. **Regularización:** Controla sobreajuste y realiza selección automáticamente
5. **Validación:** Indispensable para evaluar capacidad de generalización

## Recomendaciones principales:

- **Combinar métodos:** Ningún método es perfecto en todas las situaciones
- **Validar siempre:** Con datos que el modelo no ha visto
- **Preferir simplicidad:** Cuando el rendimiento es comparable
- **Incorporar conocimiento del dominio:** Los datos no lo dicen todo

El mejor modelo es aquel que resuelve el problema con la mayor simplicidad.