

Coordinación Académica del Posgrado  
Dirección de Desarrollo de Talento

## **EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO**

Trabajo de Investigación de Doctorado

Desarrollo de una metodología para la detección de  
daño en plataformas marinas fijas por medio de análisis  
de vibraciones

**M. I. Francisco Cisneros**

Directores: Dr. Iván Félix González y Dr. Rolando Salgado Estrada

Periodo: Invierno 2025

# Introducción y Alcance

- **Contexto:** Avances finales previos a la defensa de tesis (Evaluación de 7º Semestre).
- **Problemática:**
  - Crisis de mantenimiento en infraestructura envejecida.
  - "Data Scarcity": Escasez de datos reales de daño que inviabiliza el uso puro de algoritmos de Deep Learning.
- **Solución Propuesta:**
  - Hibridación de Algoritmos Genéticos (AG) con Modelos de Elemento Finito (FEM).

# Metodología Propuesta (1/3): Flujo General

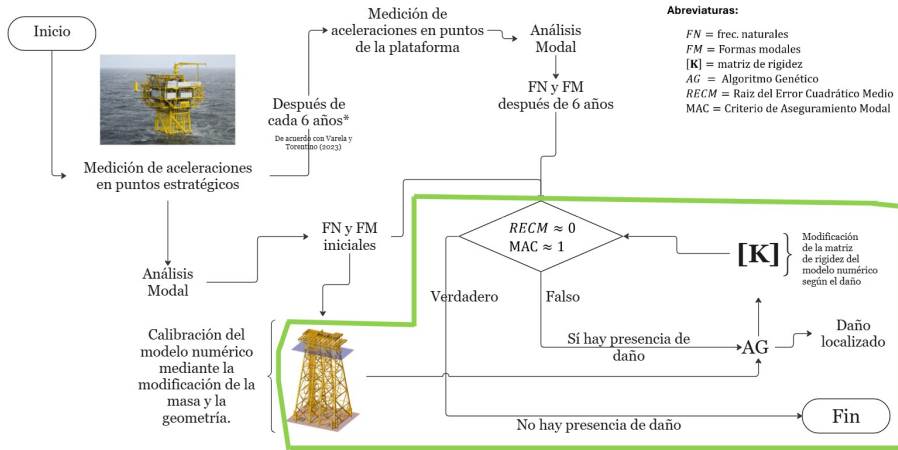


Figura: Flujo de identificación en plataformas reales.

# Metodología Propuesta (2/3): Esquema Computacional

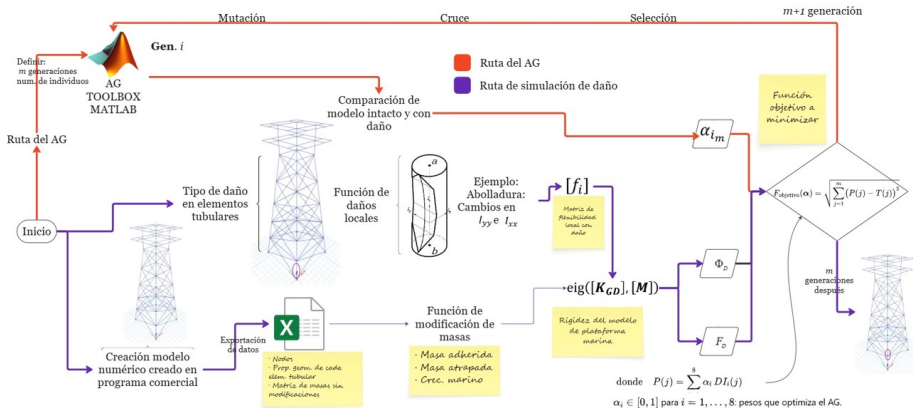


Figura: Esquema computacional del AG.

# Metodología Propuesta (3/3): El Algoritmo Genético

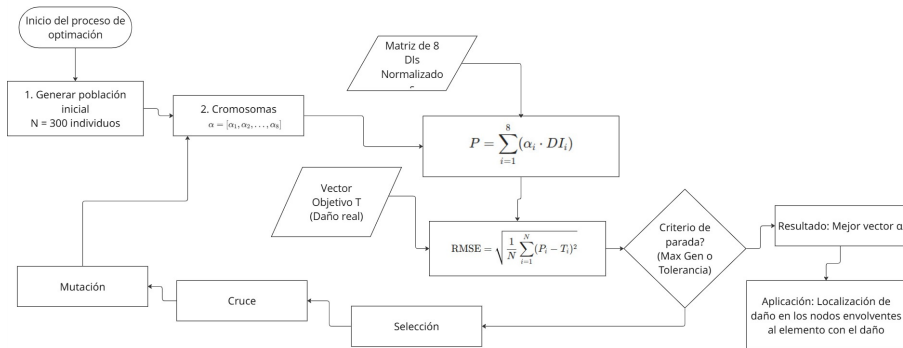


Figura: Mecánica del AG: función objetivo y operadores genéticos.

# Fusión de Datos: Indicadores Vibratorios (DIs)

**Estrategia de Fusión:** El AG no evalúa un solo parámetro, sino que optimiza un vector de pesos  $\alpha$  para minimizar el error mediante una **suma ponderada** de 8 indicadores distintos:

$$\text{Función Objetivo} \approx \min \sum_{j=1}^8 \alpha_j \cdot DI_j \quad (1)$$

## Basados en Modos ( $\phi$ )

- $DI_1$  (**COMAC**): Correlación de vectores modales.
- $DI_2$  (**Diff Abs**): Diferencia absoluta de formas modales.
- $DI_3$  (**Razón Rel**): Relación entre vectores dañados e intactos.

## Basados en Flexibilidad ( $F$ )

- $DI_4$  (**Diff Flex**): Cambio en la diagonal de la matriz.
- $DI_5$  (**Razón Flex**): Relación de flexibilidades.
- $DI_6$  (**Var %**): Porcentaje de variación.
- $DI_7$  (**Z-Score**): Estandarización estadística.
- $DI_8$  (**Probabilidad**): T. Gaussiana

# Formulación Matemática: Indicadores Modales ( $DI_1 - DI_3$ )

**1. COMAC ( $DI_1$ ):** Evalúa la correlación punto a punto de los modos. (1 = Correlación perfecta, 0 = Sin correlación).

$$DI_1(j) = 1 - \sqrt{\frac{\left(\sum_{i=1}^{N_m} |\phi_{u,ij}| |\phi_{d,ij}|\right)^2}{\sum_{i=1}^{N_m} \phi_{u,ij}^2 \sum_{i=1}^{N_m} \phi_{d,ij}^2}} \quad (2)$$

**2. Diferencia Absoluta ( $DI_2$ ) y Razón Relativa ( $DI_3$ ):** Cuantifican el desplazamiento de los vectores modales  $\phi$ .

$$DI_2(j) = \mathcal{R}_j \left( \sum_{i=1}^{N_m} |\phi_{u,i} - \phi_{d,i}| \right) \quad (3)$$

$$DI_3(j) = \mathcal{R}_j \left( \sum_{i=1}^{N_m} \left| \frac{\phi_{d,i}}{\phi_{u,i} + \epsilon} - 1 \right| \right) \quad (4)$$

*\*Donde  $u$  es estado intacto,  $d$  dañado y  $\epsilon$  es un factor de regularización.*

# Formulación Matemática: Flexibilidad y Estadística ( $DI_4 - DI_8$ )

Basados en la Matriz de Flexibilidad ( $\mathbf{F} \approx \Phi \Omega^{-2} \Phi^T$ ):

- **Diferencia ( $DI_4$ ):**  $|\text{diag}(\mathbf{F}_d) - \text{diag}(\mathbf{F}_u)|$
- **Razón ( $DI_5$ ):**  $\left| \frac{\text{diag}(\mathbf{F}_d)}{\text{diag}(\mathbf{F}_u) + \epsilon} - 1 \right|$
- **Variación % ( $DI_6$ ):** Versión porcentual de la razón ( $DI_5 \times 100$ ).

---

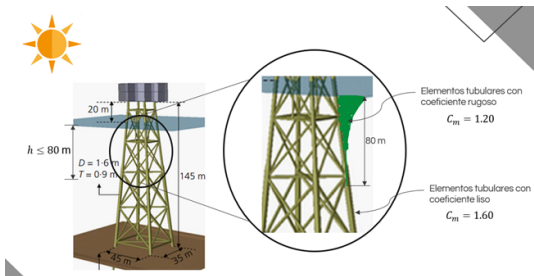
**Estandarización Estadística ( $DI_7$  y  $DI_8$ ):** Normalizan el daño asumiendo una distribución Gaussiana para resaltar anomalías (outliers).

$$DI_7(j) = \frac{\Delta F_j - \mu_{\Delta F}}{\sigma_{\Delta F}} \quad \rightarrow \quad DI_8(j) = 1 - 2(1 - \Phi_{\text{cdf}}(|DI_7|)) \quad (5)$$





## Efectos Inerciales y Ambientales (2/2)

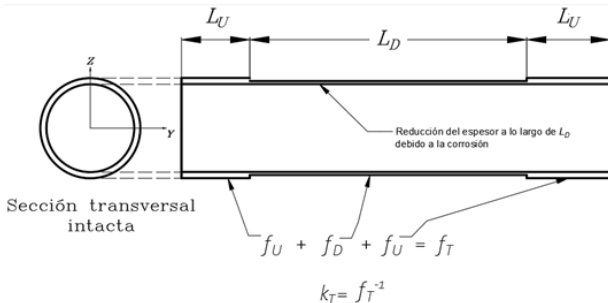


**Figura:** Modelado del Crecimiento Marino (Biofouling) y coeficientes rugosos.

**Fuente:** American Petroleum Institute. (2014). *Planning, designing, and constructing fixed offshore platforms - working stress design*. Washington, Estados Unidos.

# Modelado de Daño: Corrosión Longitudinal

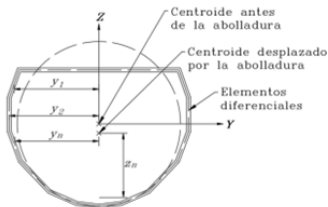
**Caracterización Geométrica:** Se modela como una reducción uniforme del espesor de pared ( $t$ ) aplicada en tramos discretos del elemento, simulando la pérdida de material en zonas críticas (ej. *Splash Zone*).



**Figura:** Perfil de reducción de espesor ( $t_{loss}$ ) a lo largo del elemento tubular.

# Modelado de Daño: Abolladura

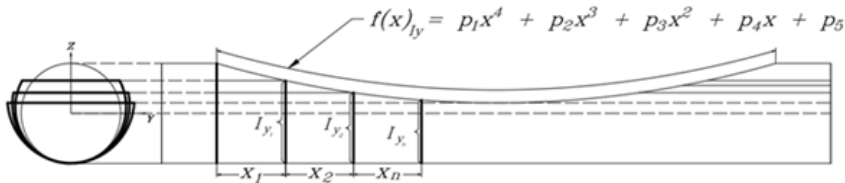
**Caracterización Geométrica:** Se modela como una imperfección geométrica local definida por la profundidad ( $d/D$ ) y la longitud del daño, alterando la inercia local del elemento.



**Figura:** Representación esquemática del elemento tubular con daño por abolladura.

# Modelado de Daño: Interpolación Longitudinal (Abolladura)

**Continuidad Numérica:** Para evitar discontinuidades abruptas en la matriz de rigidez global, la variación del momento de inercia ( $I$ ) a lo largo de la zona dañada se suaviza matemáticamente.



**Figura:** Interpolación de la reducción de inercia mediante polinomios de 4º grado.

# Justificación de Daños: Fenomenología Zonal (1/2)

¿**Por qué modelar Corrosión Uniforme?** Aunque la corrosión puede ser local, para efectos de rigidez global ( $EI$ ) en estructuras Jacket, la normativa (API/ISO) valida el modelo de **reducción uniforme de espesor** ( $t_{loss}$ ) como el mecanismo que gobierna la pérdida de capacidad de carga.

**Distribución Vertical de la Severidad:** La pérdida de espesor **no es constante** en toda la altura. Se concentra drásticamente en la zona de humectación y secado (Splash Zone).

---

#### Fuentes Normativas:

- ISO 19902:2007: *Petroleum and natural gas industries – Fixed steel offshore structures*. (Sec. 16.3 Structural Integrity).
- API RP 2A-WSD: *Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms*.

## Justificación de Daños: Fenomenología Zonal (2/2)

**Evidencia Forense:** Tasas de corrosión medidas en campo.

**Tabla:** Tasas de Pérdida de Espesor por Zona

Zona Vertical	Tasa Real (mm/año)	Riesgo Estructural
<b>Splash Zone</b>	<b>0.8 - 1.2</b>	<b>CRÍTICO (Máx <math>\Delta t</math>)</b>
Marea (Tidal)	0.4 - 0.6	Alto
Atmosférica	0.1 - 0.3	Medio
Sumergida	< 0.1	Bajo (Controlado por CP)

**Fuente:** Health and Safety Executive (HSE). *Offshore installations: Guidance on design, construction and certification*. Reino Unido.

# Justificación de Daños: Etiología y Severidad

**Caracterización Forense:** El origen del impacto (etiología) define la morfología del daño.

**Tabla:** Clasificación de Daños por Causa Raíz

Causa Raíz	Morfología del Daño	Ubicación Típica
<b>Colisión Buque</b>	<b>Abolladura Alargada</b>	<b>Splash Zone (<math>\pm 10\text{m}</math>)</b>
Objetos Caídos	Abolladura Aguda	Miembros Horizontales*
Instalación	Abolladura Interna	Piernas / Elem. diagonales**

\* *Ubicación de mayor incidencia estadística reportada.*

\*\* *Incidencia significativa, aunque menor respecto a los miembros horizontales.*

**Fuentes de Datos:** **WOAD:** *Worldwide Offshore Accident Databank*; **HSE:** *Health and Safety Executive*.



# Aportación Novedosa: Formulación Matemática del ICD

## Contribución Metodológica: Ecuación General

Se propone una **métrica inédita** que integra tres factores normalizados para evaluar la calidad de la solución:

$$\text{ICD} = D \times C_{\text{norm}}(\delta) \times P_{\text{FP}}(N_{\text{FP}}) \quad (6)$$

**Interpretación:**  $\text{ICD} \in [0, 1]$  (Donde 1.0 = Detección perfecta).

### 1. Éxito ( $D$ )

- **1.0:** Exacta.
- **0.5:** Adyacente.
- **0.0:** Fallo.

### 2. Confianza ( $C_{\text{norm}}$ )

- Escalamiento logarítmico ( $\alpha = 0.1$ ).

$$\frac{\ln(1 + \alpha\delta)}{\ln(1 + \alpha\delta_{\text{máx}})}$$

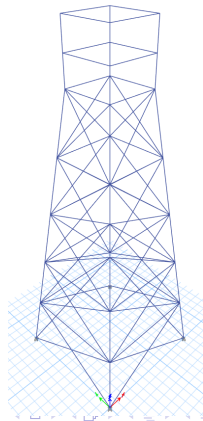
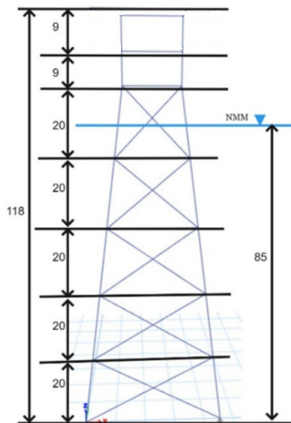
### 3. Penalización ( $P_{\text{FP}}$ )

- Decaimiento exp. ( $\beta = 0.15$ ).

$$e^{-\beta N_{\text{FP}}}$$

## Caso de Estudio: Plataforma Tipo Jacket

- Plataforma marina fija discretizada mediante elementos viga.



# Resultados: Detección de Abolladura (1/2)

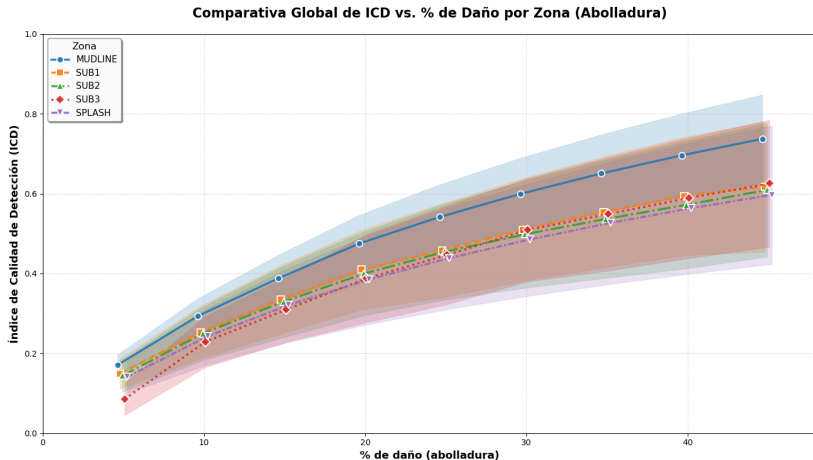


Figura: Comparativa Global ICD vs Daño

# Resultados: Detección de Abolladura (2/2)

Análisis de ICD por Zona, desglosado por Tipo de Elemento (Abolladura)

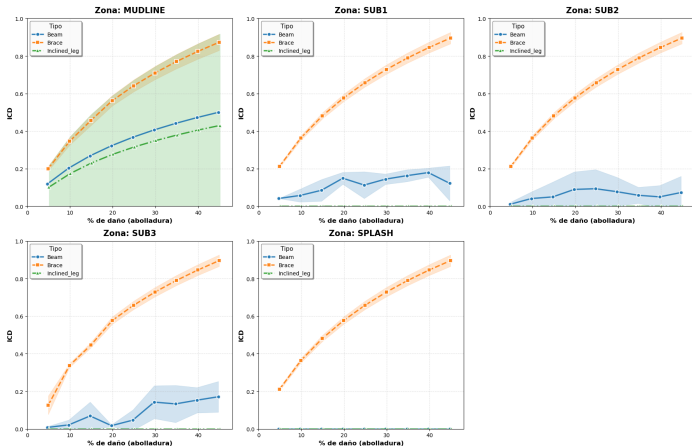


Figura: Desglose por Zona y Tipo de Elemento

# Resultados: Detección de Corrosión (1/2)

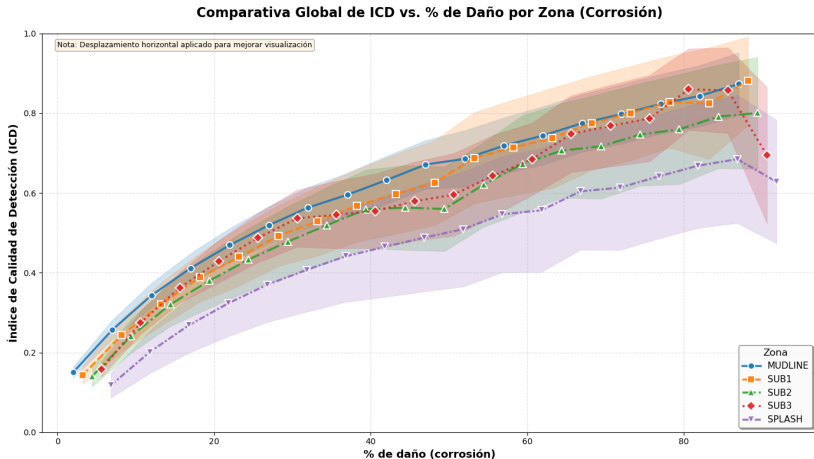


Figura: Comparativa Global ICD vs Corrosión

# Resultados: Detección de Corrosión (2/2)

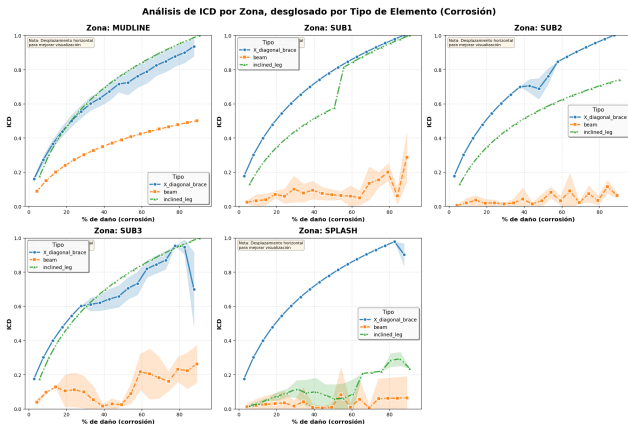


Figura: Desglose por Zona

# Conclusiones Preliminares (1/4): Enfoque Metodológico

## Eficacia de la Optimización Inversa

La investigación valida al ICD como una métrica robusta para el monitoreo de salud estructural (SHM).

- **Independencia del Modelo Base:** A diferencia de la actualización de modelo tradicional (*Model Updating*), esta estrategia basada en optimización estocástica (AG) no requiere un modelo de elementos finitos perfectamente calibrado desde el origen.
- **Eficiencia:** Al centrarse en cambios relativos de patrones modales, reduce significativamente la carga computacional asociada a la identificación de parámetros físicos exactos.

## Conclusiones Preliminares (2/4): Robustez y Hallazgos

### Penalización de Falsos Positivos

La formulación matemática del ICD penaliza severamente las soluciones que generan residuos distribuidos, favoreciendo la localización precisa y evitando **falsas alarmas** costosas.

### Hallazgo: Sensibilidad Diferencial

Los resultados revelan una jerarquía clara en la detectabilidad del daño:

- **Diagonales ("Fusibles"):** Elementos de alta sensibilidad. El sistema detecta reducciones de rigidez a partir del **30 % de severidad**.
- **Piernas Principales:** Alta redundancia estructural. Requieren daños severos (**> 50 %**) para ser identificados mediante vibraciones globales.



## Conclusiones Preliminares (3/4): Implicación Operativa

### Propuesta de Estrategia Híbrida

La disparidad de sensibilidad detectada sugiere un cambio de paradigma en la gestión de integridad:

- **Monitoreo Remoto (Vibraciones):** Ideal para la vigilancia continua de las diagonales, donde el riesgo de impacto de buques es alto.
- **Inspección Visual (ROV/Buzos):** Debe enfocarse prioritariamente en **vigas y piernas principales**, ya que el monitoreo global es ciego a daños incipientes en estos elementos masivos.

# Conclusiones Preliminares (4/4): Validación Forense

El desempeño del algoritmo coincide con las zonas de mayor riesgo estadístico reportadas en la industria (HSE/WOAD), validando su utilidad práctica:

## 1. Coherencia en Corrosión

- **Realidad:** La *Splash Zone* sufre la corrosión más agresiva (0.8–1.2 mm/año) según HSE.
- **AG:** El ICD mostró su **máxima sensibilidad** precisamente en esta zona, garantizando detección temprana donde el riesgo crítico es mayor.

## 2. Coherencia en Abolladuras

- **Realidad:** Las diagonales en la zona de marea son estadísticamente vulnerables a colisiones de buques (WOAD).
- **AG:** Al identificar a las diagonales como fusibles altamente detectables, el sistema cubre el riesgo de impacto accidental.

---

*Conclusión: El algoritmo prioriza correctamente las amenazas físicas reales.*

# Estatus de Publicación y Solicitud de Prórroga

## ● Estatus de Publicación (7º Semestre):

- Se realizó el envío del manuscrito a la revista *Ocean Engineering* a mediados del semestre.
- **Resultado:** El artículo fue rechazado.
- **Acción Inmediata:** Se realizó un análisis detallado de los comentarios de los revisores para identificar las áreas de mejora críticas.
- **Nueva Opción:** Se ha seleccionado a la revista *Applied Ocean Research* como el nuevo objetivo de publicación.

## ● Necesidad de Prórroga:

### Ajuste de Cronograma de Graduación

Debido a los tiempos de gestión editorial para el nuevo envío a *Applied Ocean Research* y la escritura final, se solicitará una extensión de tiempo.

- **Ventana Estimada de Defensa:** Octubre – Diciembre 2026.

# Redefinición de Alcances y Estrategia Técnica

## Recorte de Alcances

Para viabilizar la nueva fecha de defensa y garantizar la calidad de la publicación, se proponen transferir los análisis de **grietas por fatiga** y **deflexiones excesivas** a *Trabajo Futuro*. El 8º Semestre se dedicará 100 % a Escritura y Validación.

## Fortalecimiento del ICD (Estrategia de Aceptación)

En respuesta al rechazo previo, se implementarán 5 mejoras para blindar el artículo:

- 1 **Estabilidad del AG:** Reporte del vector  $\alpha$  óptimo y su dispersión.
- 2 **Benchmark:** Comparativa (Mejor DI individual vs. ICD Fusionado).
- 3 **Robustez:** Simulación de ruido experimental.
- 4 **Métricas:** Análisis de Verdaderos Positivos / Falsos Positivos.