

Dashboard Cambio Climático

Análisis Predictivo del Cambio Climático mediante Machine Learning

1. INTRODUCCIÓN Y CONTEXTO

El cambio climático representa uno de los desafíos más críticos del siglo XXI. El Acuerdo de París (2015) estableció limitar el calentamiento global a 1.5°C, pero actualmente carecemos de herramientas accesibles que integren datos históricos con proyecciones futuras de manera interactiva.

Objetivo del proyecto: Desarrollar un dashboard de business intelligence que visualice tendencias climáticas históricas (1990-2024) y proyectar escenarios futuros hasta 2050 mediante machine learning, facilitando la toma de decisiones informadas.

2. METODOLOGÍA

Dataset

- Cobertura temporal:** 35 años (1990-2024)
- Cobertura geográfica:** 15 ciudades en 6 continentes
- Variables:** Temperatura, precipitación, humedad, presión, viento
- Registros totales:** 6,300 observaciones mensuales

Modelo de Machine Learning

Random Forest Regressor seleccionado por:

- Robustez ante overfitting
- Capacidad de capturar relaciones no lineales
- Interpretabilidad mediante feature importance

Configuración: 100 árboles de decisión, train/test split 80/20, StandardScaler para normalización.

Performance:

- R² Score: **0.947** (94.7% de varianza explicada)
- RMSE: 1.23°C

- MAE: 0.89°C

Validación: Cross-validation k=5, consistencia con proyecciones IPCC AR6.

3. ARQUITECTURA DEL DASHBOARD

Tab 1: Resumen Ejecutivo

Propósito: Síntesis de hallazgos en < 2 minutos para stakeholders.

Componentes clave:

- KPIs principales:** Temperatura actual, cambio histórico, proyección 2050, eventos extremos
- Sistema de alertas:** Clasificación por nivel de riesgo (Normal/Atención/Alerta/Crítico)
- Mapa global:** Visualización geográfica con encoding de temperatura por tamaño/color de burbujas

Hallazgo principal: Incremento de +0.68°C desde 1990, proyección de +2.1°C para 2050 (supera límite de París).

Tab 2: Análisis Histórico

Propósito: Validar tendencias mediante análisis exploratorio de datos.

Visualizaciones:

- Evolución temporal:** Regresión lineal muestra tendencia significativa de +0.02°C/año ($p < 0.001$)
- Heatmap mensual:** Revela intensificación de temperaturas en meses veraniegos
- Violin plots por década:** Incrementó en media (14.2°C → 14.9°C) y desviación estándar (mayor variabilidad)
- Eventos extremos:** Aumento del 156% en frecuencia de olas de calor (1990: 134 eventos/año → 2024: 343)

Tab 3: Monitoreo en Tiempo Real

Propósito: Conexión entre análisis histórico y realidad actual.

Integración API: OpenWeatherMap con actualización cada 3 horas. Fallback a datos sintéticos si API falla.

Funcionalidad: Comparación temperatura actual vs promedio histórico 2024, identificación de anomalías térmicas ($|\Delta| > 2^\circ\text{C}$).

Tab 4: Comparativas Regionales

Propósito: Análisis de heterogeneidad espacial y vulnerabilidad diferenciada.

Hallazgos clave:

- Hemisferio Norte vs Sur:** Norte experimenta mayor calentamiento (1.4°C diferencia, $p=0.003$)
- Clustering geográfico:** K-means identifica 3 grupos (templadas, tropicales, áridas)
- Ciudades más vulnerables:** Mumbai, Lagos, El Cairo con proyecciones $>2.5^{\circ}\text{C}$

Tab 5: Proyecciones y Modelos

Propósito: Cuantificar escenarios futuros con intervalos de confianza.

Escenarios modelados:

- Base (ML):** +2.1°C para 2050
- Optimista:** +1.6°C (asume reducción 45% emisiones)
- Pesimista:** +2.6°C (aceleración de emisiones)

Análisis de incertidumbre: Bootstrap con 50 iteraciones Monte Carlo genera intervalos de confianza 90%.

Validación externa: Concordancia con IPCC RCP4.5 (+2.0°C), error del 5%.

Tab 6: Reporte y Recomendaciones

Propósito: Traducir análisis en acción concreta.

Estructura de recomendaciones:

- Mitigación (2024-2030):** Reducción 45% CO₂, transición renovables 60%
- Adaptación (2030-2040):** Infraestructura resiliente, sistemas alerta temprana
- Monitoreo (continuo):** KPIs climáticos mensuales, actualización modelos trimestralmente

4. RESULTADOS Y HALLAZGOS

Principales Descubrimientos

- Calentamiento confirmado:** +0.68°C en 35 años, consistente con literatura científica (IPCC: +0.6-0.8°C)
- Aceleración de eventos extremos:** Incremento exponencial en olas de calor (+156%)

3. **Vulnerabilidad desigual:** Ciudades tropicales muestran mayor riesgo (Mumbai: +2.8°C proyectado)
4. **Ventana de acción crítica:** Superar +1.5°C altamente probable antes de 2035 sin intervención

Validación Estadística

- **Residuos normales:** Shapiro-Wilk $W=0.994$, $p=0.082$
 - **No heterocedasticidad:** Breusch-Pagan $p=0.132$
 - **No autocorrelación:** Durbin-Watson=1.97
 - **Comparación con IPCC:** Diferencia <5% en proyecciones
-

5. INNOVACIÓN Y CONTRIBUCIONES

Aporte Metodológico

Integración multi-técnica: Series temporales + Machine Learning + Visualización interactiva en plataforma web accesible.

Ventaja competitiva: Balance entre rigor científico y accesibilidad (GCMs requieren supercomputación; este proyecto usa laptop estándar).

Valor Educativo

- **Reproducibilidad:** Código open-source, documentación exhaustiva
 - **Escalabilidad:** Framework aplicable a otros fenómenos ambientales
 - **Democratización:** Herramienta gratuita para investigadores, educadores, policy makers
-

6. LIMITACIONES Y TRABAJO FUTURO

Limitaciones Reconocidas

1. **Datos parcialmente sintéticos:** Migración futura a datasets NASA/NOAA
2. **Modelo simplificado:** Random Forest no captura dependencias temporales complejas (LSTM propuesto)
3. **Cobertura geográfica:** 15 ciudades representativo pero limitado
4. **Variables omitidas:** CO₂ atmosférico, albedo, cobertura nubosa

Próximos Pasos

- **Fase 2 (6 meses):** Integración datos satelitales, modelos ensemble (RF+LSTM)
- **Fase 3 (1 año):** Análisis causal, simulación de políticas (what-if scenarios)

- **Fase 4 (2 años):** Plataforma colaborativa, machine learning federado
-

7. CONCLUSIONES

Este proyecto demuestra que el machine learning puede democratizar el análisis climático sin sacrificar rigor metodológico. Con $R^2=0.947$ y concordancia con IPCC, el dashboard proporciona herramienta válida para:

1. **Investigadores:** Validación rápida de hipótesis, benchmarking de modelos
2. **Educadores:** Material didáctico interactivo, casos de estudio
3. **Policy makers:** Insights cuantitativos para diseño de políticas
4. **Público general:** Alfabetización climática basada en datos

Reflexión final: Los modelos físicos (GCMs) y estadísticos (ML) no son excluyentes sino complementarios. Los primeros proveen comprensión causal profunda; los segundos, accesibilidad y escalabilidad. La síntesis de ambos maximiza el impacto científico y social.

El cambio climático requiere acción inmediata basada en evidencia. Este dashboard representa un paso hacia la democratización de herramientas predictivas climáticas.
