



**POLITECNICO
MILANO 1863**



cmcc
Centro Euro-Mediterraneo
sui Cambiamenti Climatici

¿Puede la inteligencia artificial ayudarnos a comprender el cambio climático?

Programa de Ciencias 2026 · Biblioteca Nacional del Perú · CONCYTEC · 20 de octubre de 2026

Carlos Rodríguez-Pardo, PhD

Politecnico di Milano / EIEE / CMCC

¿Puede la inteligencia artificial ayudarnos a comprender el cambio climático?

Respuesta corta: sí... con tres peros.



No sola

Junto a la física, la economía y el debate democrático.



No para todo

Puede estimar qué pasará; no tomar tomar decisiones.



No gratis

Cuesta energía, agua y soberanía, sobre todo la IA agéntica.

La agenda de hoy

3

Parte

La pregunta

1

Fundamentos

¿Qué es la IA? ¿Qué busca la política climática?

2

Medir

¿Qué está pasando y a quién afecta?

3

Modelar futuros

¿Qué podría pasar con cada política?

4

Evaluar y decidir

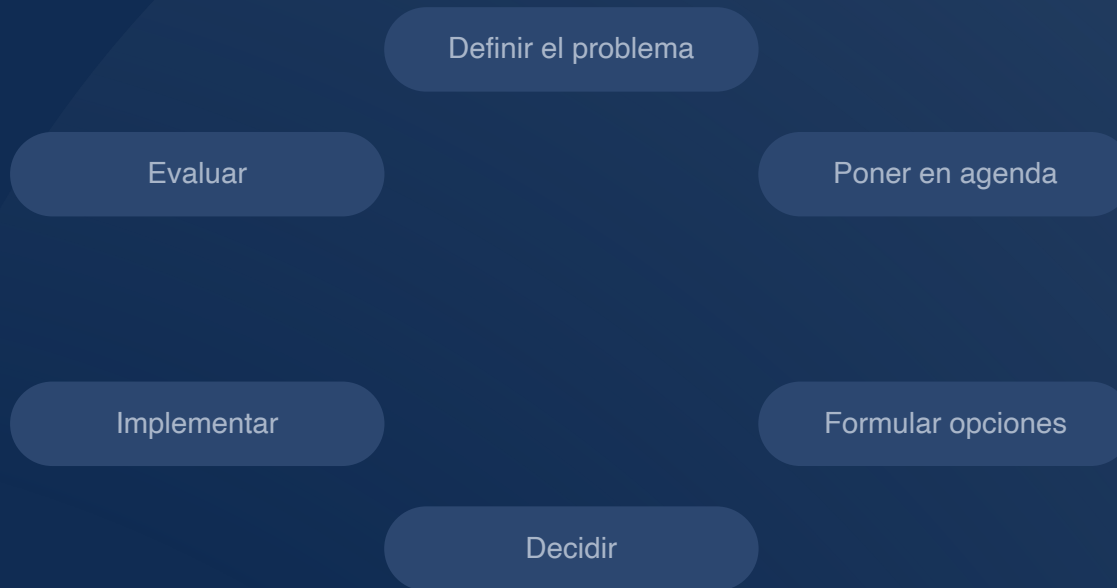
¿Funcionó la política? ¿Quién decide?

5

El precio de la IA

¿Cuánto cuesta y quién lo paga?

Fundamentos



01

¿Qué es la inteligencia artificial?

Programas que aprenden patrones a partir de ejemplos

5



IA predictiva

Estima algo a partir de datos del pasado.

Ej.: la lluvia de mañana



IA generativa

Produce texto, imágenes o código.

Ej.: ChatGPT



IA agéntica

Encadena acciones por sí sola, con poca supervisión.

Ej.: un agente que programa

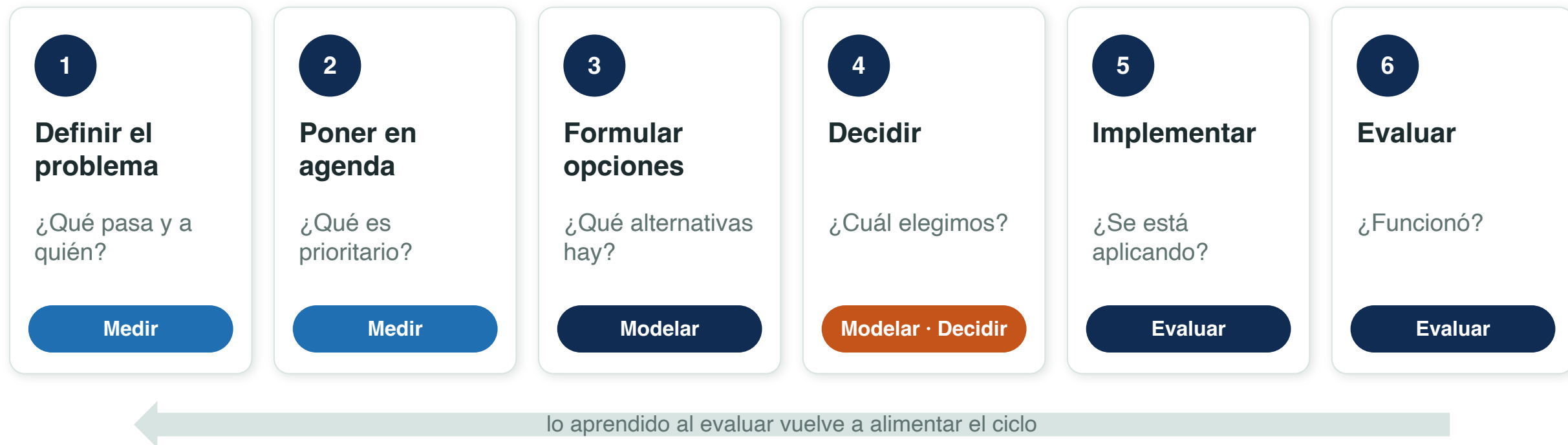


Modelo fundacional: entrenado una vez con muchísimos datos y reutilizado para muchas tareas. También los hay del clima y de la Tierra.

El ciclo de la política climática

Y dónde lo recorreremos hoy

6



¿Quién decide sobre el clima?

Muchos actores, con problemas, escalas y tiempos distintos

Internacional: ONU, EU, IPCC

Gobiernos nacionales y regionales

Municipios

Sectores: energía, transporte, agua, agricultura

Empresas, bancos, aseguradoras

- **Escalas:** continente, país, ciudad, barrio.
- **Tiempos:** décadas frente a trimestres.
- **Herramientas:** impuestos, normas, subsidios.
- **Capacidad:** no todos tienen datos ni capacidad de usar IA.

Tres respuestas al cambio climático

Compiten por los mismos presupuestos

8



Mitigación

Reducir emisiones.

- Renovables
- Transporte eléctrico
- Precio al carbono



Adaptación

Reducir el daño inevitable.

- Alerta temprana ante El Niño
- Defensas ante inundaciones
- Gestión del agua



Pérdidas y daños

Compensar lo que no se evitó.

- Financiación climática
- Seguros y fondos
- Atribución de daños

La caja de herramientas de la política climática

9



Precio al carbono

Impuestos y mercados



Normas

Eficiencia, prohibiciones



Subsidios e inversión

Renovables, I+D



Política industrial

Industria verde



Adaptación

Riesgo y resiliencia



Financiamiento

Quién paga y quién recibe



Compensaciones

Créditos de carbono



Transparencia

Reportes obligatorios



¿Dónde entra la IA?



Datos

Extraer información de satélites, leyes y artículos.

Parte 2 · Medir



Modelos

Anticipar el clima, la energía y la economía.

Parte 3 · Modelar

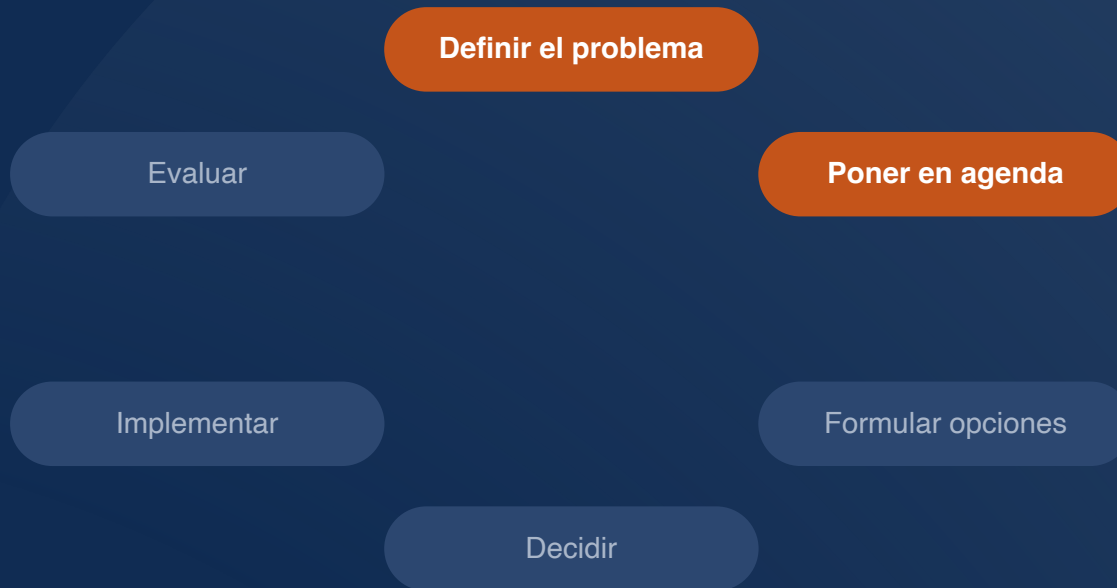


Decisiones

Evaluar políticas y apoyar a quien decide.

Parte 4 · Evaluar

Medir: ¿Qué está pasando?



02

Medir: ¿qué necesitamos observar?



¿Qué políticas existen?

Bases de datos y monitores de políticas



¿Dónde están las emisiones?

Inventarios y estimaciones



**¿Quién está expuesto?
¿Quiénes deciden?**

Mapas de vulnerabilidad y de actores



¿Qué dice la literatura?

Mapas de evidencia



¿Dónde faltan datos y evidencia?

Detección sistemática de vacíos

Medir: saber qué se ha probado ya

Antes de diseñar nada: ¿qué políticas existen en el mundo?

Armonizar bases de datos de políticas

ENTRADA

Bases de datos nacionales fragmentadas, con categorías y cobertura inconsistentes.

MÉTODO

Aprendizaje automático híbrido + reglas de expertos para unificar clasificaciones.

RESULTADO

Paneles comparables entre países: quién adoptó qué instrumento, y cuándo.

Wu et al., 2024

73.625

políticas de mitigación de 216 países y entidades, en una sola base

Y más

leer leyes y programas electorales para extraer metas y obligaciones

Medir: ¿qué dice la literatura?

Mapear la ciencia con modelos de lenguaje... y hacer visibles sus vacíos

Mapear la literatura

ENTRADA

Cientos de miles de artículos sobre impactos: más de lo que nadie puede leer.

MÉTODO

Personas etiquetan más de 2.000 estudios; un modelo de lenguaje (BERT) clasifica el resto.

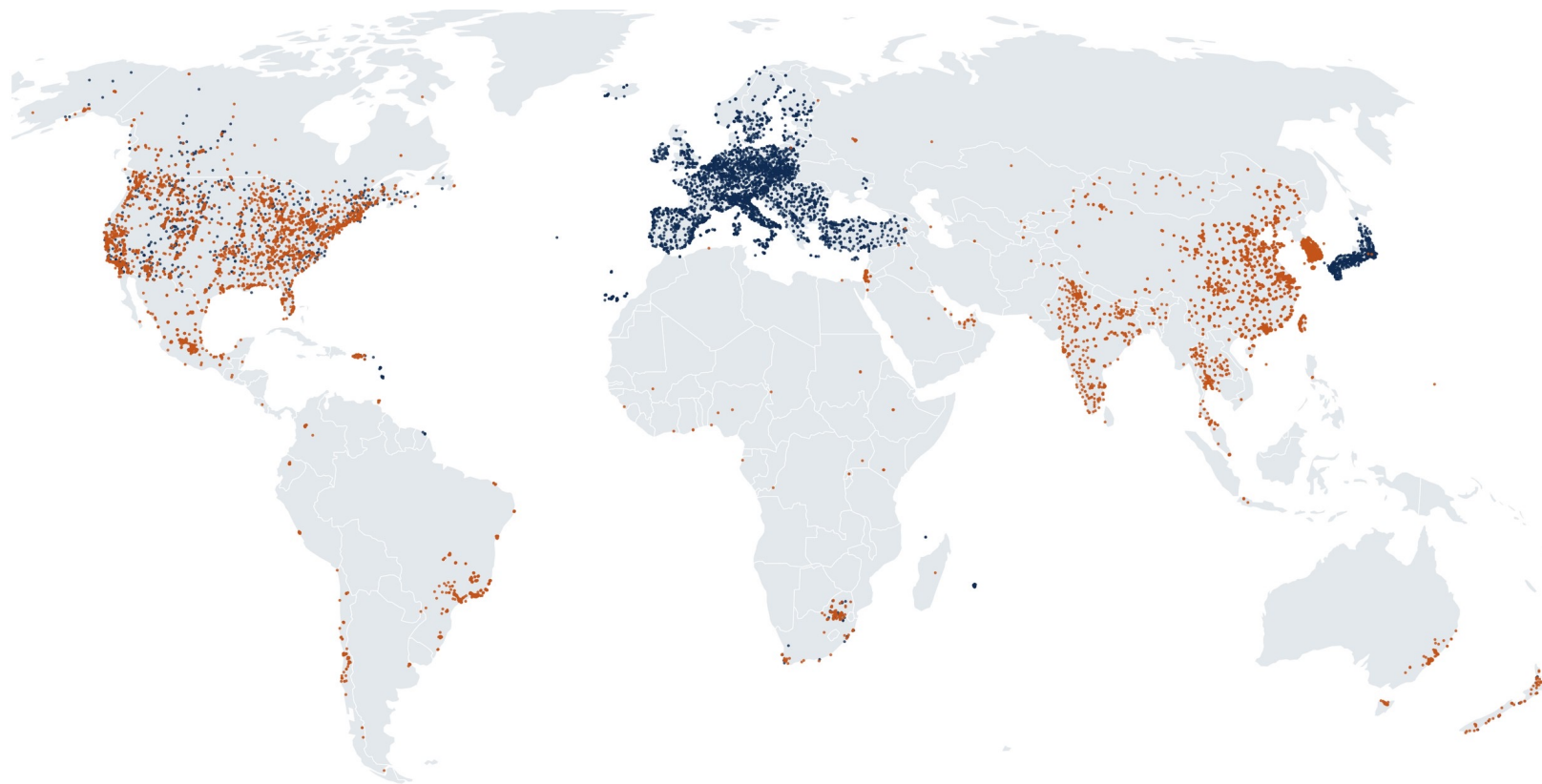
RESULTADO

Mapas de evidencia, con vacíos visibles donde la evidencia escasea.

Callaghan et al., 2021

Medir: ¿qué respiramos y dónde se mide?

Metair: un catálogo global de estaciones de calidad del aire, completado con IA



● tipo informado por el país

● tipo estimado por la IA

~15.000

estaciones de partículas en
106 países

8.193

sin tipo oficial: los estimó la
IA

Medir no es neutral

Los datos faltan justo donde más se necesitan



Falsa precisión

Un mapa de alta resolución parece exacto, pero esconde la incertidumbre acumulada. Los decimales no son evidencia.



Desiertos de datos

La cobertura es más débil donde la vulnerabilidad es mayor: los modelos extrapolan justo donde más importa.



Registrado ≠ efectivo

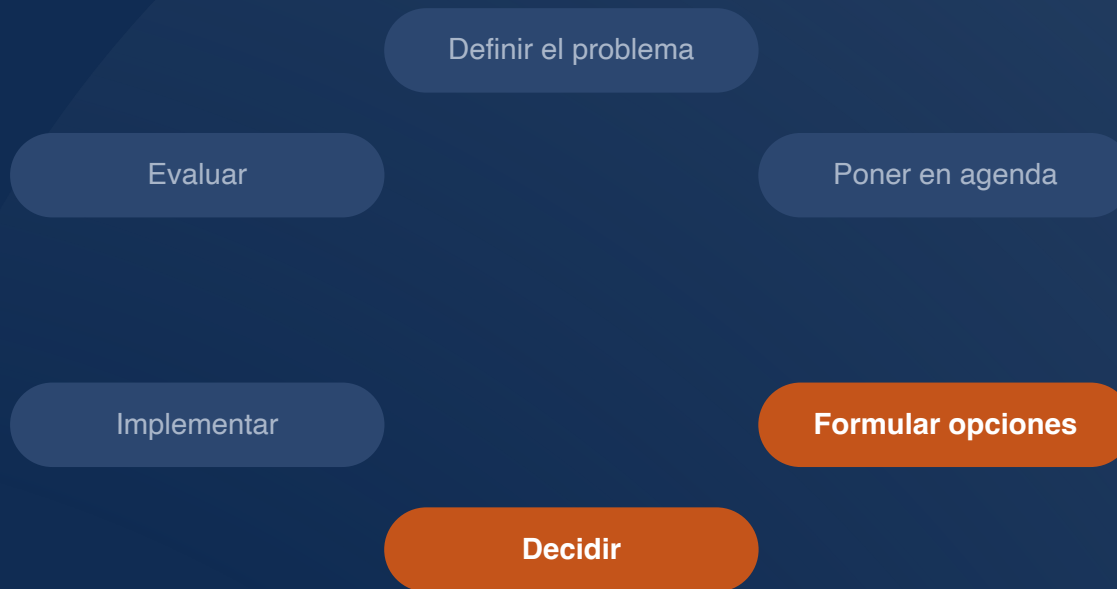
Las bases de políticas registran lo escrito, no lo que cambió en conductas o emisiones.



Pérdidas ocultas

Los daños culturales, ecológicos y distributivos escapan a las funciones de daño.

Modelar futuros: ¿qué podría pasar?



03

Modelar: el pronóstico del tiempo con IA

Una de las historias de éxito más claras de la última década



Datos

39 años de reanálisis del clima
(ERA5)



Red neuronal

aprende cómo cambia la atmósfera
cada 6 h



Pronóstico

global a 10 días en menos de un
minuto

90 %

de 1.380 objetivos en que GraphCast superó al mejor
modelo tradicional

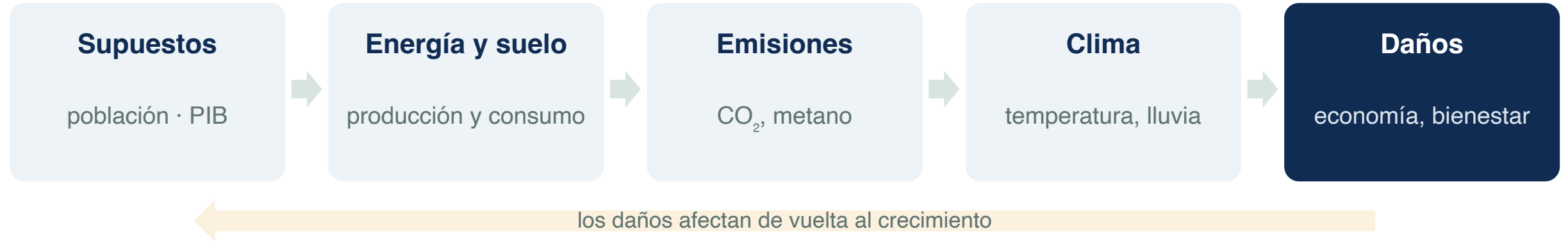
feb. 2025

el Centro Europeo (ECMWF) pone en operación su modelo
de IA, junto al físico

Pero: aprenden del pasado. Siguen necesitando observaciones y modelos físicos.

Modelar: economía, energía y clima en un solo modelo

Los modelos de evaluación integrada, detrás de los escenarios del IPCC



Limitaciones

Son costosos: se exploran pocos futuros.



Emuladores con IA

Imitan el modelo al instante: miles de escenarios.



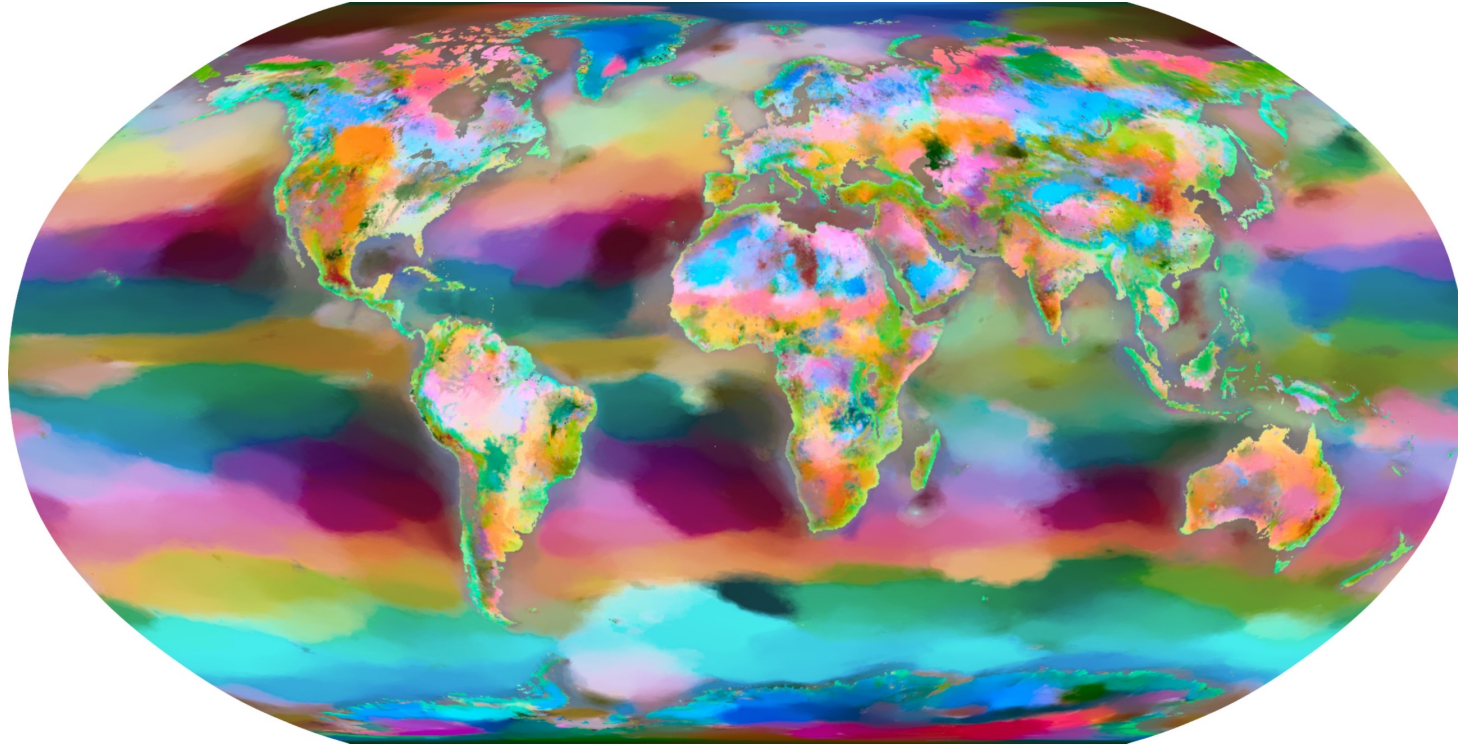
Aprendizaje por refuerzo

Busca secuencias de políticas nuevas.

Modelar: conectar clima y sociedad en un solo modelo

20

TerraNova: un modelo fundacional con 1.024 variables físicas y sociales



Multimodal

Aprendizaje a partir de muchos tipos de variables económicas y físicas

Eficiencia

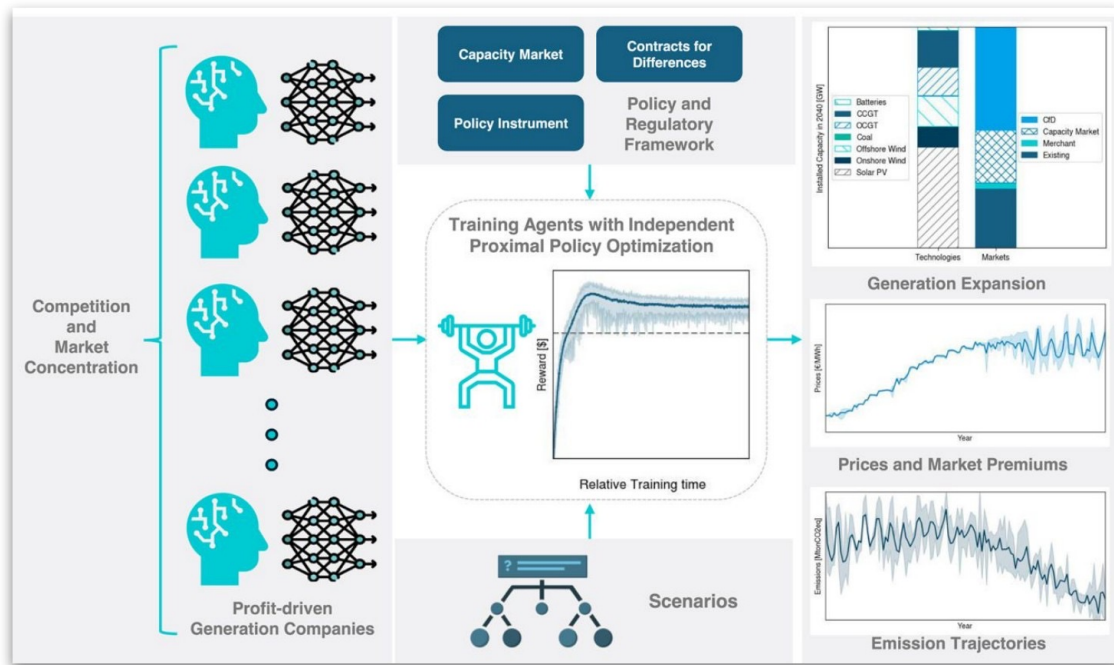
Minutos para aprender una variable nueva

Con incertidumbre

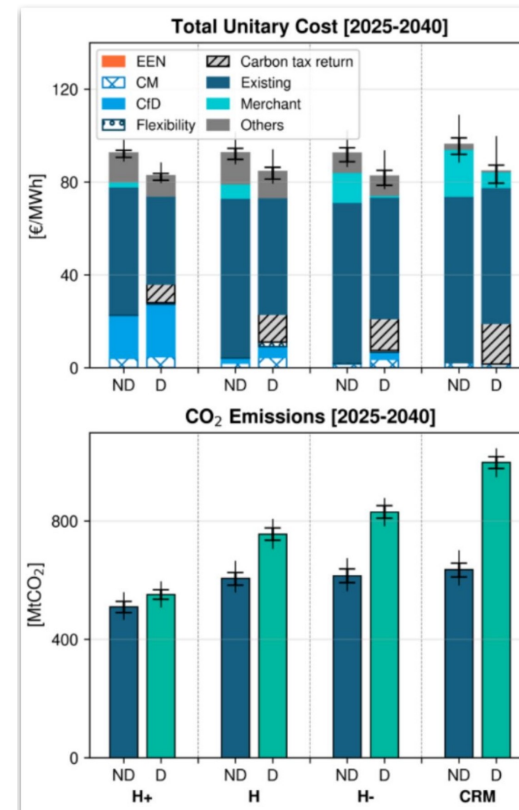
cada respuesta dice cuán segura es

Modelar: mercados eléctricos con agentes que aprenden

Cada empresa generadora es un agente de IA que puja e invierte



Aquí “agente” = un programa que aprende dentro de una simulación, no en el mundo real.

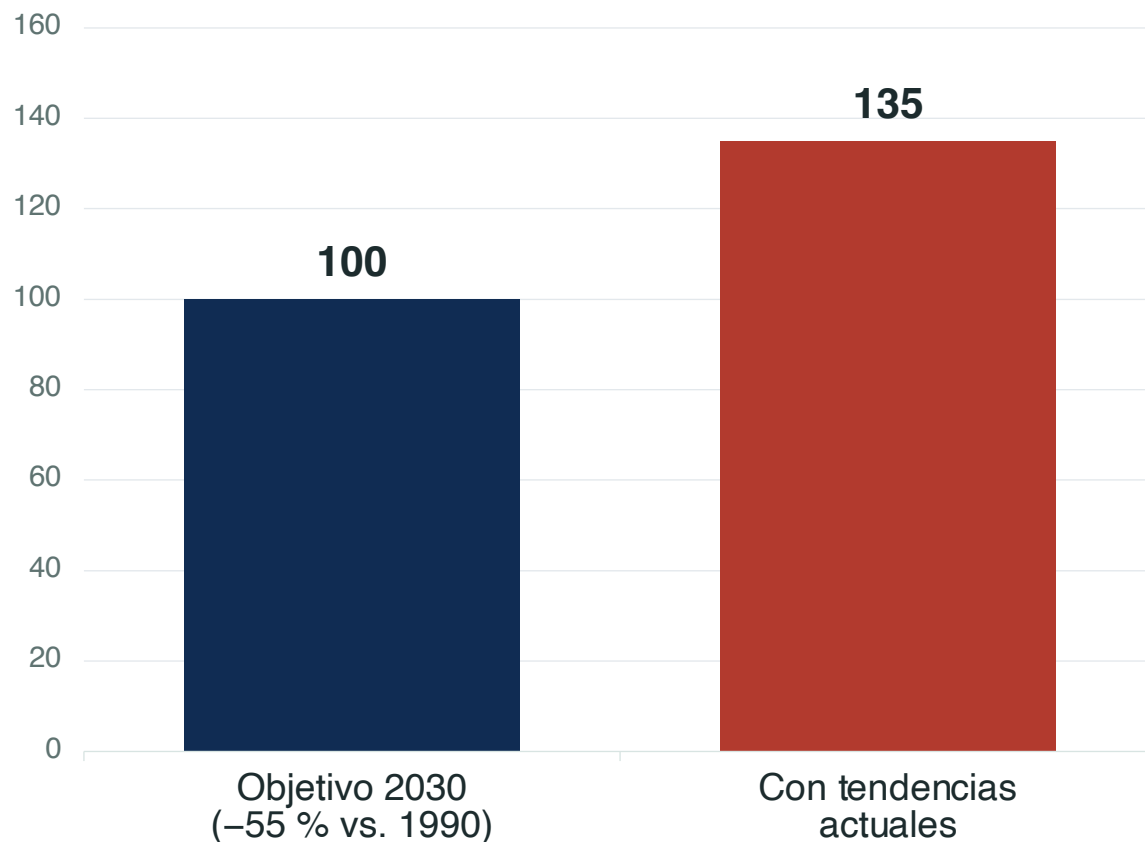


- Las reglas cambian precio y emisiones a la vez.
- Aparecen estrategias que el equilibrio no ve.
- **Italia:** sacar el CO₂ de las ofertas del gas abarata hoy, pero sube las emisiones.

Modelar: ¿va Europa camino de su objetivo climático?

Proyecciones con aprendizaje profundo, si siguen las tendencias actuales

Emisiones de CO₂ de la UE en 2030 (objetivo = 100)



+35 %

sobre el objetivo: ~620 Mt de CO₂ de brecha

> 1/3

de las emisiones de 2030, del transporte

Electricidad

el sector que sí va en camino, por las renovables

Lo que un modelo no puede decidir por nosotros

23



Los valores no salen de los datos

Qué es justo es una decisión política.



Un solo objetivo aplana el mundo

Optimizar costos deja fuera lo demás.



Solo ve lo que se mide

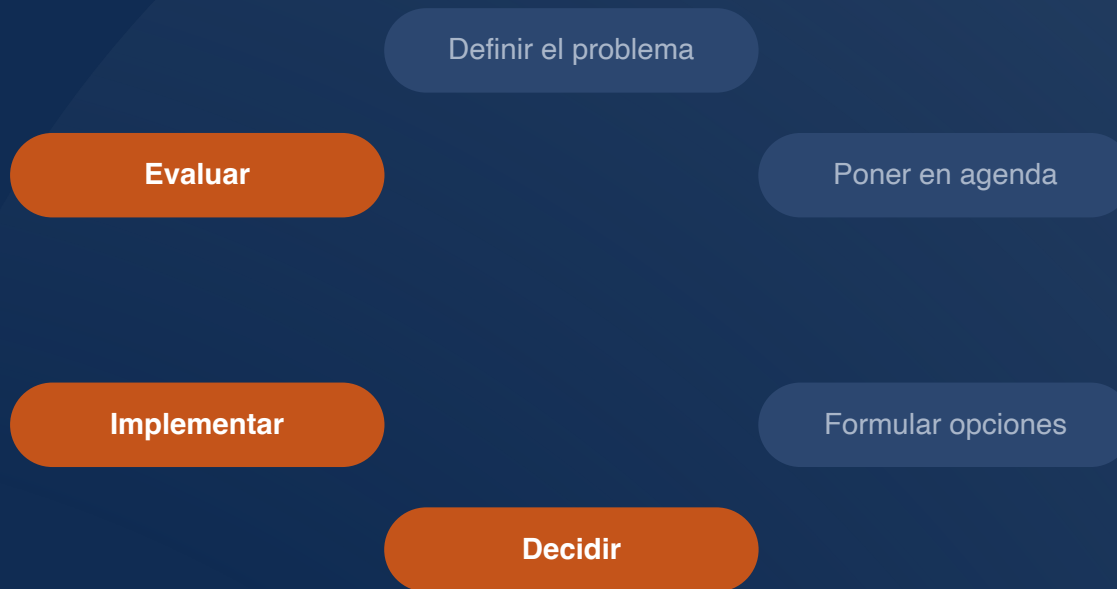
Y lo más importante a menudo no se mide.



Las restricciones no son matemáticas

Leyes, instituciones y aceptación social.

Evaluar y decidir



Evaluar: ¿funcionó la política?

Predecir no es lo mismo que evaluar

Predicción

“¿Cuánto emitiremos?” No dice si una política funcionó.

Evaluación causal

“¿Qué cambió gracias a ella?” Requiere un contrafactual.



Ejemplo: el impuesto al carbono de Suecia

- Una “Suecia sintética”, hecha con países sin impuesto.
- La diferencia estima el efecto de la política.
- El aprendizaje automático amplía estas herramientas.

≈ **-11 %**

CO₂ del transporte sueco (1990–2005); ~6 puntos, solo por el impuesto

Decidir: los chatbots en la política climática

Útiles para leer mucho; peligrosos si se les cree sin verificar



Dónde ayudan

- Leer y clasificar miles de documentos.
- Buscar y resumir, con citas verificables.
- Simular, con cautela, reacciones a una política.



Dónde fallan

- Inventan datos y citas con seguridad.
- Representan peor a mayores, pobres y no anglohablantes.
- Son privados y cambian sin aviso: difíciles de auditar.



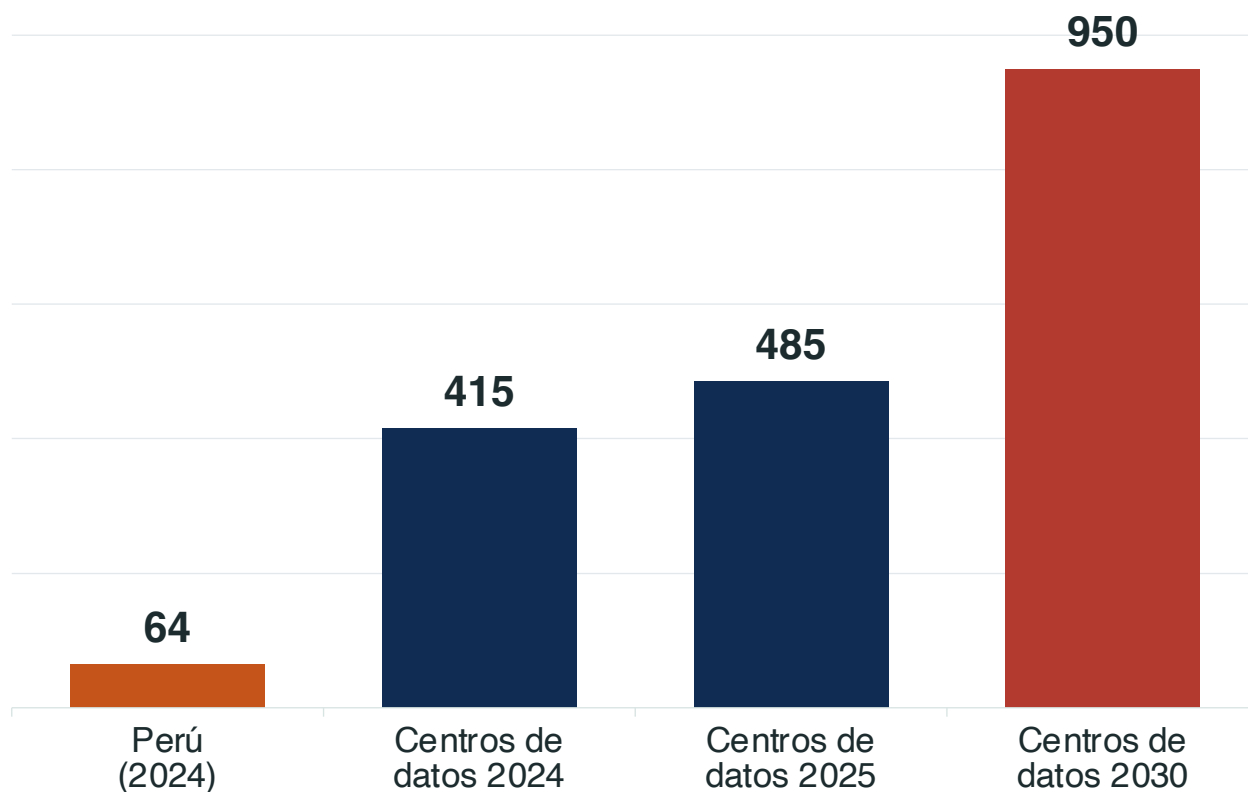
El precio de la IA

05

El precio: electricidad y emisiones

Los centros de datos casi duplicarán su consumo entre 2025 y 2030, por la IA

Electricidad al año (TWh)



Google +18 %

emisiones en 2025, sobre todo de su cadena de suministro ($\approx +80\%$ vs. 2019)

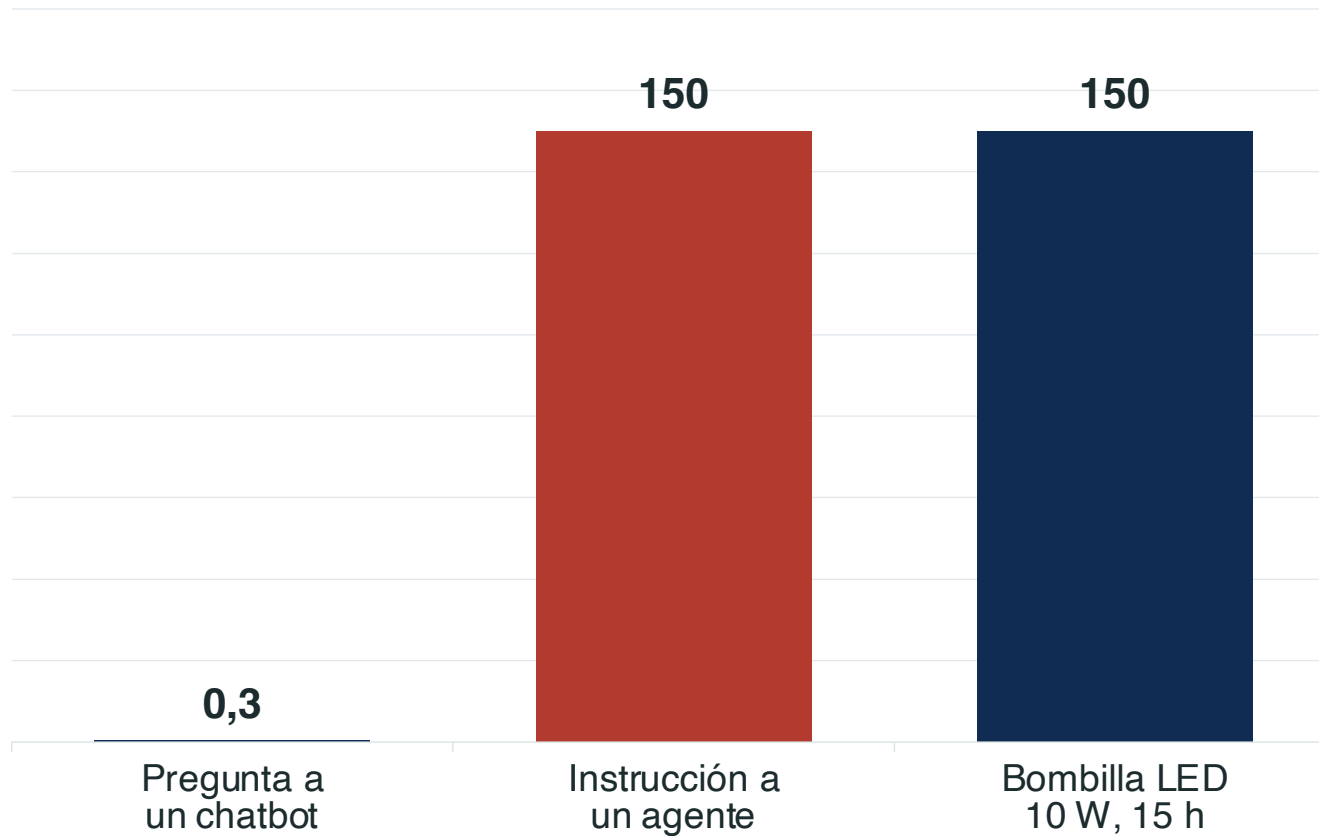
Microsoft +25 %

emisiones en su año fiscal 2025 (en parte, por un cambio contable)

Un agente gasta mucho más que una pregunta

La promesa: agentes que investigan y deciden por nosotros. El coste: cientos de veces más energía

Vatios-hora (Wh) por uso, estimaciones



~600x

más energía por instrucción (rango 250–1.200x)

0,24–0,34 Wh

por pregunta, según Google y OpenAI

63x

más energía por palabra en un agente

La alternativa

Modelos pequeños, específicos y abiertos frente a agentes siempre encendidos



IA predictiva

~1.000x

menos energía por pronóstico: IA del ECMWF frente al modelo físico

128 kWh

para entrenar TerraNova una vez: ≈ 850 instrucciones a un agente

Minutos

para adaptarlo a una variable nueva, en una laptop



IA agéntica

~150 Wh

por instrucción: cientos de llamadas al modelo

Día y noche

la promesa: millones de agentes trabajando sin parar

Transparencia

no hay cifras oficiales de consumo por tarea agéntica



Agua en Chile

Un tribunal anuló en parte el permiso de un centro de datos de Google (2024).



Agua en México

En Colón (Querétaro), en sequía: una concesión de Microsoft $\approx \frac{1}{4}$ del agua municipal.



Aire en EE. UU.

xAI alimenta sus centros de datos de Memphis con turbinas de gas; la NAACP la demandó en 2026 por operarlas sin permiso.

Tres niveles de impacto de la IA en el clima

32



Cómputo

Energía, agua y chips para entrenar y usar modelos.



Aplicaciones

Integrar renovables... o extraer más petróleo y gas.



Sistema

Efecto rebote, más consumo y dependencias.

57 Mt

habilitadas (estimación)

Dos contratos de Microsoft con Exxon y Chevron podrían habilitar más del triple de todo lo que emitió Microsoft en 2023.

Estas “emisiones habilitadas” no se declaran.

El precio político

La IA no es solo una tecnología; también es una industria con intereses

3.570

lobistas de IA en Washington en 2025: más de 1 de cada 4

> US\$ 105 M

en lobby federal de 11 tecnológicas (2025)

US\$ 125 M

recaudados por la red pro-IA “Leading the Future” (2.º sem. 2025)



Menos reglas

Una orden de dic. 2025 busca limitar leyes estatales.



Pocas manos

Pocas empresas controlan chips, nubes y modelos.



Soberanía

Lo público depende de modelos que no audita.



Dependencia

Delegar el pensamiento erosiona capacidades.

Invertir la pregunta

No “¿qué puede hacer la IA?”, sino “¿qué necesitamos para el clima?”

Hoy se parte de lo que los modelos saben hacer. **Debemos partir de lo que necesitan el clima y quienes deciden.**



Justicia

Priorizar la vulnerabilidad.



Rapidez

Acortar el tiempo entre saber y actuar.



Robustez

Comunicar la incertidumbre.

Entonces, ¿puede la IA ayudarnos a comprender el cambio climático?

Sí, para...

- Medir lo que antes no veíamos.
- Anticipar el tiempo, El Niño y los escenarios.
- Conectar el clima con la sociedad.

Pero...

- No decide qué es justo.
- Consume energía, agua y territorio.
- Concentra poder en pocas empresas.
- La IA agéntica multiplica esos costos.

Recursos abiertos

- **Climate Change AI:** cursos y comunidad (climatechange.ai).
- **AIE, “Energy and AI”:** datos sobre energía e IA.
- **Kaack et al. 2022:** los impactos de la IA en el clima.
- **Referencias completas:** al final de este documento.

Contacto

Carlos Rodríguez-Pardo

carlosrodriguezpardo.es

Politecnico di Milano · EIEE · CMCC





¡Muchas gracias!

carlosrodriguezpardo.es

Fundamentos

GAO (2020). Social Cost of Carbon: Identifying a Federal Entity to Address the National Academies' Recommendations Could Strengthen Regulatory Analysis. GAO-20-254.

Interagency Working Group on Social Cost of Greenhouse Gases (2021). Technical Support Document: Social Cost of Carbon, Methane, and Nitrous Oxide. Interim Estimates under EO 13990, febrero.

U.S. EPA (2023). Report on the Social Cost of Greenhouse Gases: Estimates Incorporating Recent Scientific Advances, noviembre.

Bilal, A. y Känzig, D. R. (2026). The Macroeconomic Impact of Climate Change: Global vs. Local Temperature. Quarterly Journal of Economics 141(2).

Orden ejecutiva 14154, “Unleashing American Energy” (20 de enero de 2025), que disolvió el grupo interagencias.

Medir

Callaghan, M. et al. (2021). Machine-learning-based evidence and attribution mapping of 100,000 climate impact studies. Nature Climate Change 11, 966–972. Cifras por grupo de ingreso: Callaghan, M. y Schleussner, C.-F., “What 100,000 studies tell us about climate impacts around the world”, Carbon Brief, 11 de octubre de 2021.

Wu, L. et al. (2024). Harmonizing existing climate change mitigation policy datasets with a hybrid machine learning approach. Scientific Data 11. doi:10.1038/s41597-024-03411-z.

Climate Policy Radar. Base de datos abierta de leyes y políticas climáticas (ficha del Perú: 184 documentos, consulta 18 oct. 2026): climatepolicyradar.org.

Renna, S., Rodríguez-Pardo, C. y Aleluia Reis, L. (2026). A dataset of harmonized global air quality monitoring metadata. Scientific Data 13, 466. doi:10.1038/s41597-026-06797-0. Datos: doi:10.5281/zenodo.15680868.

Rodríguez-Pardo, C. y Tavoni, M. (2026). A harmonised dataset for Earth system foundation models (WorldTensor). Scientific Data.

Yu, Y. et al. (2026). Machine learning estimates for G20 subnational urban GHG emissions from 2000–2020. Scientific Data. doi:10.1038/s41597-026-06691-9.

Natural Earth (población por país, 2019), para estaciones por millón de habitantes.

Modelar futuros

Lam, R. et al. (2023). Learning skillful medium-range global weather forecasting. Science 382, 1416–1421.

ECMWF (2025). Puesta en operación del sistema de pronóstico con IA AIFS, 25 de febrero de 2025.

NOAA Climate Prediction Center. Índices mensuales de temperatura del mar en las regiones Niño (sstoi.indices), consultados en octubre de 2026.

NOAA CPC (2026). ENSO: Diagnostic Discussion, 8 de octubre de 2026.

ENFEN (2026). Comunicado oficial del 16 de octubre de 2026 (vía RPP e Infobae).

Ham, Y.-G., Kim, J.-H. y Luo, J.-J. (2019). Deep learning for multi-year ENSO forecasts. Nature 573, 568–572.

Rodríguez-Pardo, C. y Tavoni, M. (2026). TerraNova: A Foundation Model for the Anthropocene. arXiv:2607.29527.

González-Ruiz, ..., Rodríguez-Pardo, C. et al. (2025). Assessing Long-Term Electricity Market Design for Ambitious Decarbonization Targets using Multi-Agent Reinforcement Learning. Energy and AI.

González-Ruiz, ..., Rodríguez-Pardo, C. et al. (2026). EU-ETS under attack? The impact of carbon price suppression on the decarbonization of the power sector. arXiv:2608.12363.

Ghirri, Rodríguez-Pardo, C., Aleluia Reis, L. y Tavoni, M. (2026). Europe's Climate Ambition Under Scrutiny: Evidence from Deep Learning Emission Projections. arXiv:2608.18690.

Mastropietro, Rodríguez-Pardo, C. y Tavoni, M. (2026). Human Development Burdens and Recovery of Climate Overshoot and Return. Research Square (preprint).

Evaluar y decidir

Andersson, J. J. (2019). Carbon Taxes and CO2 Emissions: Sweden as a Case Study. American Economic Journal: Economic Policy 11(4), 1–30.

Evaluar y decidir (cont.)

Manivannan, Spaiser, ..., Rodríguez-Pardo, C. et al. (2026). Generative AI for Climate Governance and Acceptability-Constrained Policy Design. npj Climate Action.

El precio de la IA

Agencia Internacional de la Energía (2025). Energy and AI. París: AIE. — (2026). Key Questions on Energy and AI, abril.

MINEM (2025). Estadística eléctrica del Perú, diciembre de 2024 (producción nacional 2024: 63.565 GWh).

Google (2026). Environmental Report (emisiones “ambition-based”). Microsoft (2026). Environmental Sustainability Report (año fiscal jul. 2024–jun. 2025). ESG Dive (2 y 13 de julio de 2026).

Hausfather, Z. (2026). The real energy use of agentic AI. The Climate Brink, 5 de agosto.

Elsworth, C. et al. (2025). Measuring the environmental impact of delivering AI at Google scale. arXiv:2508.15734.

Altman, S. (2025). The Gentle Singularity (blog), 10 de junio.

Luo et al. (2026). Where Does the Energy Go? Profiling LLM Agent Inference. arXiv:2609.29707 (preprint).

Chile: Segundo Tribunal Ambiental (2024), proyecto de centro de datos de Google en Cerrillos; cobertura de Pauta y BioBioChile (27 de febrero de 2024) y Meganoticias (17 de septiembre de 2024).

México: Baptista, D. y McDonnell, F., “Thirsty data centres spring up in water-poor Mexican town”, Thomson Reuters Foundation / Context, 6 de septiembre de 2024.

EE. UU.: aviso de demanda de la NAACP y el SELC contra xAI (17 de junio de 2025); demanda de la NAACP por la planta de Southaven, Misisipi (Earthjustice y SELC, 14 de abril de 2026).

El precio de la IA (cont.)

Kaack, L. H. et al. (2022). Aligning artificial intelligence with climate change mitigation. Nature Climate Change 12, 518–527.

Global Witness (2026). Enabled emissions: how AI helps to supercharge oil and gas production, 27 de enero; estimaciones de Holly y Will Alpine.

Public Citizen (2026). Generative Influence, 24 de febrero. Sludge (2026), “AI boom on K Street”, 24 de febrero (cifra de Axios).

Leading the Future: recaudación del 2.º semestre de 2025 según la propia red; el super PAC principal declaró 50,3 M a la FEC (NOTUS, 30 de enero de 2026).

Orden ejecutiva 14365, “Ensuring a National Policy Framework for Artificial Intelligence” (11 de diciembre de 2025).

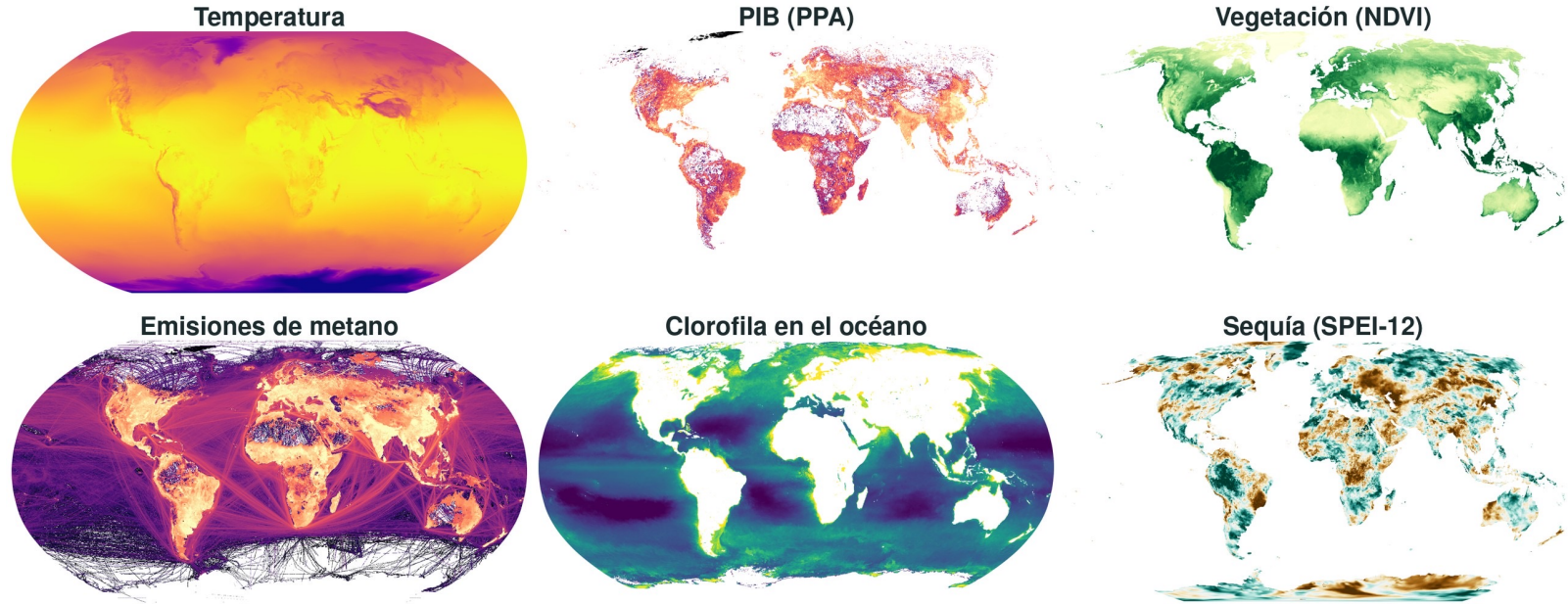
Cierre

Rodríguez-Pardo, C. y Tavoni, M. (2026). Correspondencia. Nature 649, 289.

Rodríguez-Pardo, C. et al. (2026). A Blueprint for Integrated Climate Intelligence. EarthArXiv (eartharxiv.org/repository/view/13019).

Medir: unirlo todo

40



757

variables del clima y de la sociedad

Año a año

en una misma cuadrícula global,
según la fuente

Abierto

datos y código libres

¿Qué intenta lograr la política climática?

Cinco tareas que veremos durante la charla

41



Estimar daños y riesgos

¿Cómo de grave y para quién?



Comparar opciones

¿Mitigar, adaptarse o asumir pérdidas?



Diseñar instrumentos

Impuestos, normas, mercados.



Evaluar qué funcionó

¿Cambió algo la política?



Decidir con incertidumbre

Elegir bien sin saberlo todo.

¿Cuánto cuesta una tonelada de CO₂?

El coste social del carbono

+1 tonelada de CO₂ hoy



Más calentamiento por siglos



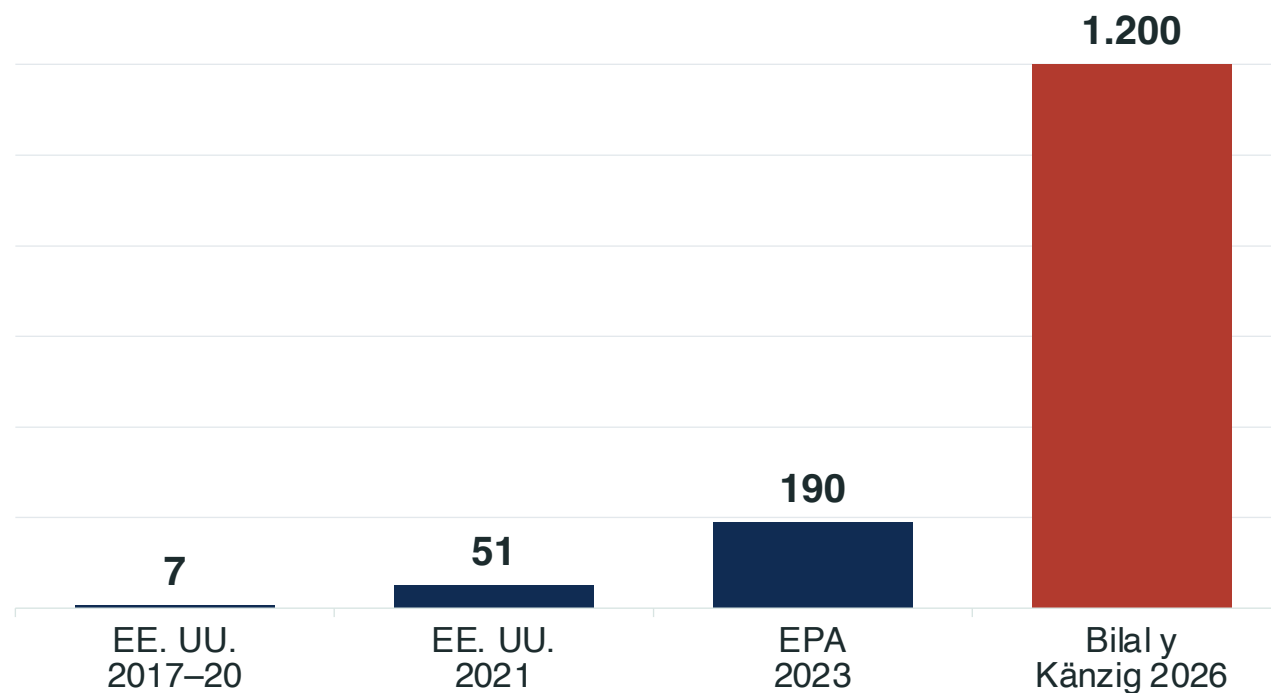
Daños: salud, cosechas, ciudades



Dinero de hoy (descuento)

Cada paso: un modelo y un juicio de valor.

US\$ por tonelada de CO₂ emitida en 2020



Desde 2025, EE. UU. no tiene una cifra oficial.