Introduzione alle politiche e alla regolamentazione climatiche nel contesto delle applicazioni di IA

Vaibhav Chugh
Pallavi Das

5 agosto 2026

© Council on Energy, Environment and Water, 2026

Struttura della lezione

(15 min) Parte 1: comprensione di base, ambito e implicazioni

- perché esistono le politiche, a cosa mirano, la battaglia per l'equità, i compromessi ricorrenti

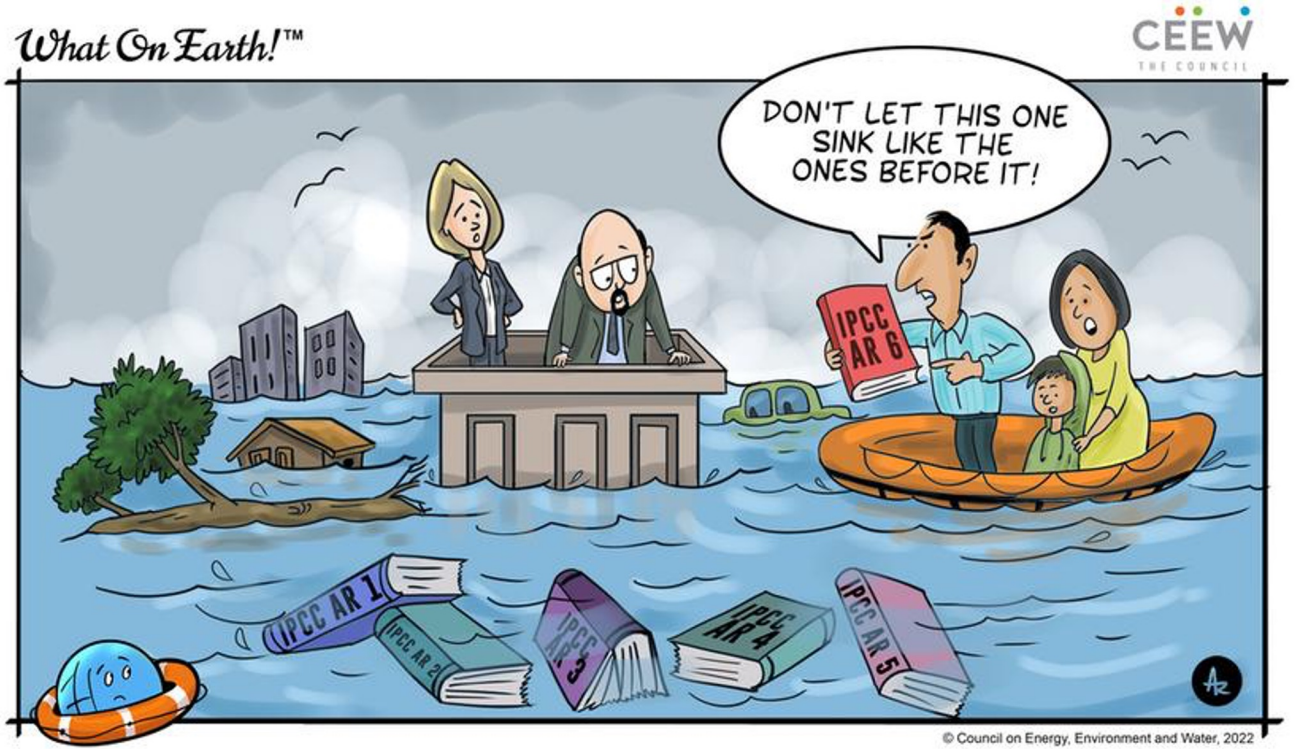
(10 min) Parte 2: panorama, attori, sviluppi e quadri in diversi contesti globali.

- Grandi accordi globali, istituzioni multilaterali e meccanismi di finanziamento e attuazione
- Politiche climatiche nazionali in India

(25 min) Parte 3: implicazioni per innovazione, implementazione e processi decisionali

- Capire come politiche e regolamentazione climatiche plasmano innovazione, implementazione e processi decisionali, in teoria e in pratica, in particolare nell'ambito IA e clima.

Parte 1: un modello mentale delle politiche climatiche



Perché esistono le politiche?

Per tutelare un bene pubblico globale
Un clima stabile è un bene pubblico globale. Nessuno può esserne escluso e il beneficio di un paese non riduce quello degli altri.



Dare un prezzo a un'esternalità negativa
Le emissioni di chi inquina danneggiano altri (caldo, perdita di raccolti), ma quel costo ricade su terzi, non sull'inquinatore, e quindi non entra mai nelle sue decisioni.

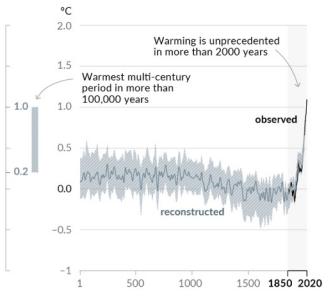


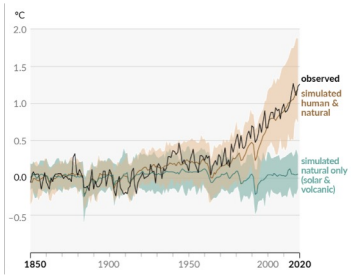
Azione collettiva / problema del free rider
tutti ci guadagnano quando gli altri agiscono, quindi ciascuno aspetta che agisca qualcun altro.



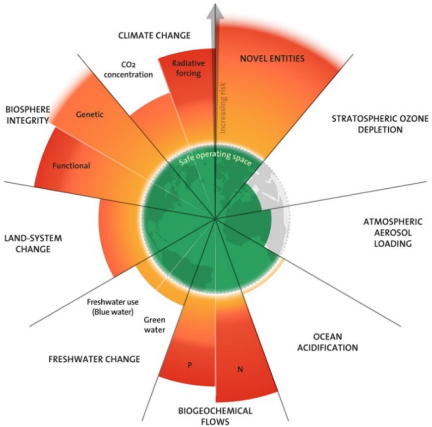
Perché servono politiche climatiche?

Cambiamenti osservati

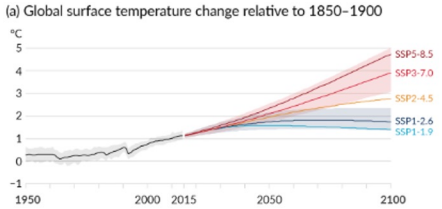


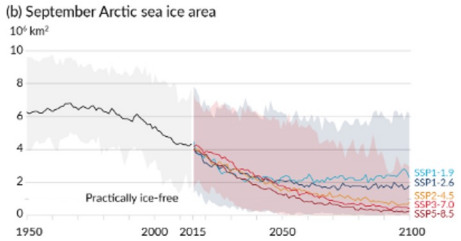


Limiti di sicurezza



Cambiamenti previsti





https://www.stockholmresilience.org/research/planetary-boundaries.html; https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/summary-for-policymakers/

A cosa mirano le politiche sul cambiamento climatico?

Mitigazione

Ridurre/evitare le emissioni

Rinnovabili, efficienza, prezzo del carbonio

Storicamente l'impostazione predefinita del Nord globale

Adattamento

Gestire impatti inevitabili come l'aumento delle temperature e gli eventi estremi

Soluzioni basate sulla natura; assicurazione parametrica; piano d'azione contro il caldo

Una questione esistenziale per il Sud esposto

Mezzi di attuazione e strumenti delle politiche

Finanza

Tecnologia

Rafforzamento delle capacità

Strumenti delle politiche

- **Basati su mercato/prezzi** — tasse sul carbonio, sistemi di scambio di emissioni (ETS/cap-and-trade), eliminazione dei sussidi ai combustibili fossili.
- **Regolatori (comando e controllo)** — standard di emissione, norme di efficienza, divieti/eliminazione graduale (es. carbone, veicoli a combustione), codici edilizi.
- **Fiscali/finanziari** — sussidi, crediti d'imposta, green bond, finanza mista, tariffe incentivanti, incentivi legati alla produzione.
- **Informativi/volontari** — etichettatura, informativa (es. rendicontazione dei rischi climatici), impegni net zero delle imprese.

Compromessi delle politiche

- **Costo vs velocità**
  - Tassa sul carbonio = azione rapida, regressiva, politicamente fragile.
  - Standard = più lenti, duraturi, inseriti in calendari

- **Ampiezza vs profondità**
  - Parigi include tutti i paesi, ma l'applicazione è debole.
  - Gli obblighi locali (città, imprese) sono incisivi, ma non scalano

- ***Perché conta**:* i paesi scelgono strumenti diversi perché partono da condizioni diverse. Non esiste un'unica politica «giusta»

Governance delle politiche

Internazionale
Trattati e norme fissano la direzione

Nazionale
I governi assumono impegni vincolanti e progettano le politiche nazionali

Subnazionale
Stati, province e città spesso si muovono più in fretta e attuano sul territorio

Attori non statali
Imprese, investitori e società civile plasmano e attuano le politiche

Un budget di carbonio limitato, e chi può usarlo

~876 $GtCO_2$

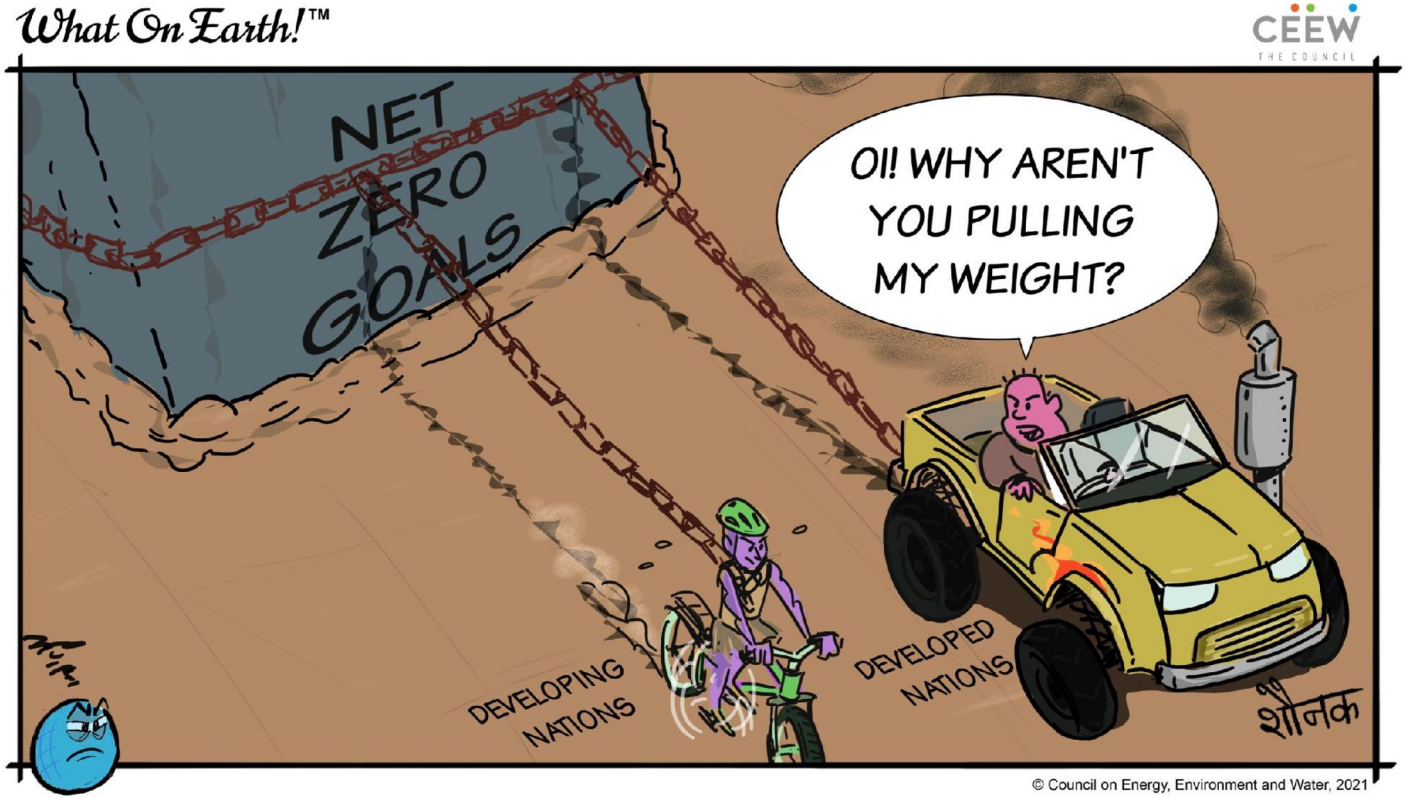
Budget di carbonio limitato per restare sotto i 2 °C

Chi può usare lo spazio rimanente è LA battaglia distributiva delle politiche climatiche

- **CBDR-RC:** responsabilità comuni ma differenziate e rispettive capacità (UNFCCC, 1992): problema condiviso, doveri differenziati per responsabilità e capacità
- **Responsabilità storica:** le emissioni cumulate contano. USA, UE e paesi in via di sviluppo hanno emissioni storiche molto elevate
- **Spazio di carbonio:** ripartire il budget per emissioni attuali? pro capite? cumulate? Ogni risposta implica obblighi radicalmente diversi

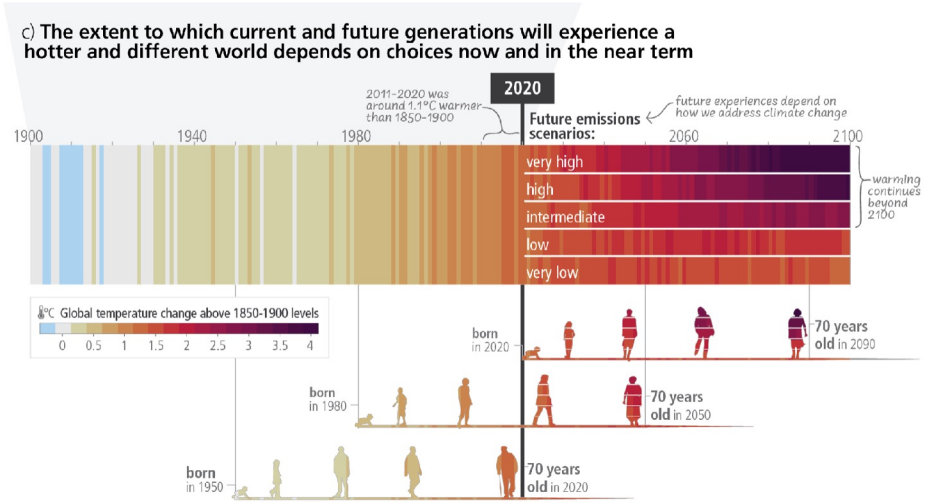
https://www.pik-potsdam.de/en/institute/departments/climate-economics-and-policy/carbon-clock/remaining-carbon-budget Consultato il 24 luglio 2026

Parte 2: il panorama delle politiche climatiche



Il Gruppo intergovernativo sul cambiamento climatico: tenere la scienza un passo avanti

- **Valuta, non fa ricerca**. L'IPCC non produce scienza nuova: esamina e sintetizza migliaia di studi pubblicati per stabilire cosa si sa, con quale grado di fiducia e dove sono le incertezze.
- **Governi e scienziati insieme**. I rapporti sono scritti da centinaia di autori esperti volontari, e la Sintesi per i decisori politici è approvata riga per riga da tutti i governi membri.
- **Tre gruppi di lavoro.** WG1 (basi fisiche), WG2 (impatti, adattamento, vulnerabilità), WG3 (mitigazione). I cicli di valutazione durano circa 6–7 anni; il Settimo rapporto di valutazione (AR7) è in corso



https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/figures/summary-for-policymakers/IPCC_AR6_SYR_SPM_Figure1.png

L’UNFCCC esiste per superare questo stallo portando tutti a impegnarsi insieme, pubblicamente e ripetutamente

Il compito dell’**UNFCCC** (e dell’Accordo di Parigi al suo interno):

- Porta **quasi tutti i paesi allo stesso tavolo,** così nessuno riduce da solo mentre gli altri se ne approfittano
- Rende gli **impegni visibili e pubblici** (NDC), dando certezza alle industrie e responsabilizzando i paesi
- Convoca **incontri ricorrenti** (le COP annuali e Bonn a metà anno) per mantenere il dialogo, sbloccare i negoziati e verificare gli impegni



Gruppi negoziali

- **Gruppo africano** – uno dei cinque gruppi negoziali regionali dell'ONU, con 54 Stati membri
- **Gruppo arabo** – formalmente la Lega degli Stati arabi, organizzazione regionale nata nel 1945
- **BASIC (Brasile, Sudafrica, India e Cina)** – una coalizione di quattro grandi economie emergenti
- **Unione europea (UE)** – i 28 Stati membri dell'UE, con negoziati condotti dalla DG Clima
- **Gruppo dei 77 + Cina (G77 + Cina)** – un'ampia alleanza di 134 paesi in via di sviluppo
- **Paesi meno sviluppati (PMA)** – un gruppo dei paesi più poveri del mondo, che cambia al mutare delle economie
- **Paesi in via di sviluppo affini (LMDC)** – un gruppo di paesi in via di sviluppo che rappresenta 3,5 miliardi di persone, impegnato perché i paesi ricchi si assumano la maggiore responsabilità nella lotta al cambiamento climatico
- **Alleanza dei piccoli Stati insulari (AOSIS)** – un gruppo di 44 piccole isole e Stati costieri a bassa quota
- **Gruppo Ombrello** – un gruppo transcontinentale di paesi, molti dei quali considerati poco entusiasti sul clima in passato, anche se spesso queste posizioni stanno cambiando

Fonte: https://www.carbonbrief.org/interactive-the-negotiating-alliances-at-the-paris-climate-conference/

Architettura internazionale: il cambio di regime (dalla coercizione alla pressione tra pari)

1992 UNFCCC

Il quadro. Fissa principi, tra cui CBDR-RC, ma nessun obiettivo vincolante

1997 KYOTO

Dall'alto: obiettivi vincolanti solo per i paesi dell'Allegato I (ricchi).

2015 PARIGI

Dal basso: ogni paese fissa il proprio NDC, rivisto tramite un meccanismo di rafforzamento e un bilancio globale quinquennale.

Come l'accordo vincola un paese: l'NDC dell'India

- Riduzione del 47% dell'intensità delle emissioni entro il 2035 rispetto al 2005
- 60% di capacità elettrica non fossile entro il 2035 rispetto al 2005
- Da 3,5 a 4,0 miliardi di tonnellate di CO_2 equivalente tramite copertura forestale e arborea entro il 2035 (rispetto al 2005)

https://www.pib.gov.in/PressReleasePage.aspx?PRID=2245209&reg=3&lang=1

Livello nazionale: economie diverse, strumenti diversi

Il punto chiave: non esiste un'unica «politica climatica». Ciò che un paese usa dipende dalla sua ricchezza, dal profilo delle emissioni e dalla sua politica.

Il modello «regolare + prezzare» dei paesi ad alto reddito

- **UE** — regolare + prezzare: Green Deal / Fit for 55, EU ETS (cap-and-trade), CBAM (tassa alla frontiera), Tassonomia UE

Il resto del Sud globale: stessa logica, pressioni diverse

- **Cina** — scala guidata dallo Stato: ETS nazionale (2021, settore elettrico), obiettivi «doppio carbonio» (picco prima del 2030, neutralità prima del 2060) e dominio manifatturiero in solare, batterie e VE
- **India** — sussidi + modalità missione (prima diffondere, poi prezzare): National Solar Mission, PM-KUSUM (pompe solari), PM Surya Ghar (tetti, 2024), FAME (VE), LT-LEDS.
- **Brasile** — il modello *uso del suolo*: la sua mitigazione dipende soprattutto dalla deforestazione amazzonica, non dall'energia; successo delle politiche = far rispettare la protezione delle foreste. Gestisce anche uno dei più antichi programmi di biocarburanti al mondo (etanolo).
- **Sudafrica** — il modello di *transizione giusta*: fortemente dipendente dal carbone e caso di prova della **Partnership per una transizione energetica giusta (JET-P)**, un accordo multi-donatore per finanziare un'uscita graduale dal carbone senza far crollare i mezzi di sussistenza delle regioni carbonifere.
- **Indonesia / Vietnam** — anch'essi beneficiari di **JET-P**: dipendenti dal carbone, in rapida crescita, negoziano transizioni finanziate dall'esterno, dove finanza climatica e politica nazionale si incontrano concretamente.
- **Kenya / Etiopia** — il modello del *salto tecnologico / ricchi di rinnovabili*: reti già quasi interamente rinnovabili (geotermia, idroelettrico), quindi la loro frontiera è l'accesso e la resilienza, non decarbonizzare una rete sporca.

Regimi trasversali: la frontiera che attraversa i confini

Che cosa fa il CBAM?

Il meccanismo di adeguamento del carbonio alle frontiere dell'UE tassa il carbonio incorporato nelle importazioni: acciaio, alluminio, cemento, fertilizzanti, elettricità, idrogeno.

La fase definitiva (a pagamento) è iniziata il 1° gennaio 2026; sanzione di 100 €/tonnellata in caso di ammanco. Estensione a ~180 prodotti a valle proposta per il 2028.

Scopo: evitare la «rilocalizzazione delle emissioni», cioè imprese che si spostano per sfuggire al prezzo dell'EU ETS.

Il dibattito che suscita…

Per gli esportatori indiani e degli altri paesi del Sud globale, il CBAM è un costo diretto alla frontiera UE.

Visto da Delhi:

«protezionismo verde»: un blocco ricco che scarica i propri costi climatici sui produttori più poveri.

Visto da Bruxelles:

una misura legittima contro la rilocalizzazione che livella il campo di gioco.

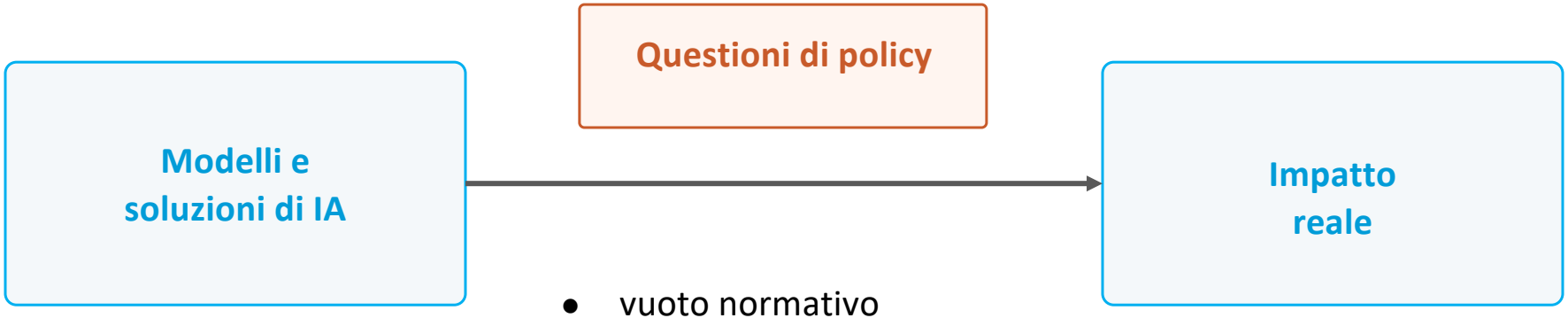
Il miglior esempio di strumento occidentale che ridisegna le scelte del Sud globale, oggi contestato all'OMC.

Parte 3: implicazioni per innovazione, implementazione e processi decisionali

Che ruolo hanno le politiche per clima e IA?

Le politiche sono strutturate e formali, lente ma responsabili, e funzionano meglio quando i problemi sono ben compresi e stabili

L'IA è esplorativa, iterativa e flessibile, adatta a sfide ambigue o in evoluzione



- vuoto normativo
- nell'infrastruttura dei dati
- responsabilità
- capacità di agire

La stessa IA proposta per tagliare le emissioni è essa stessa un emettitore non regolamentato

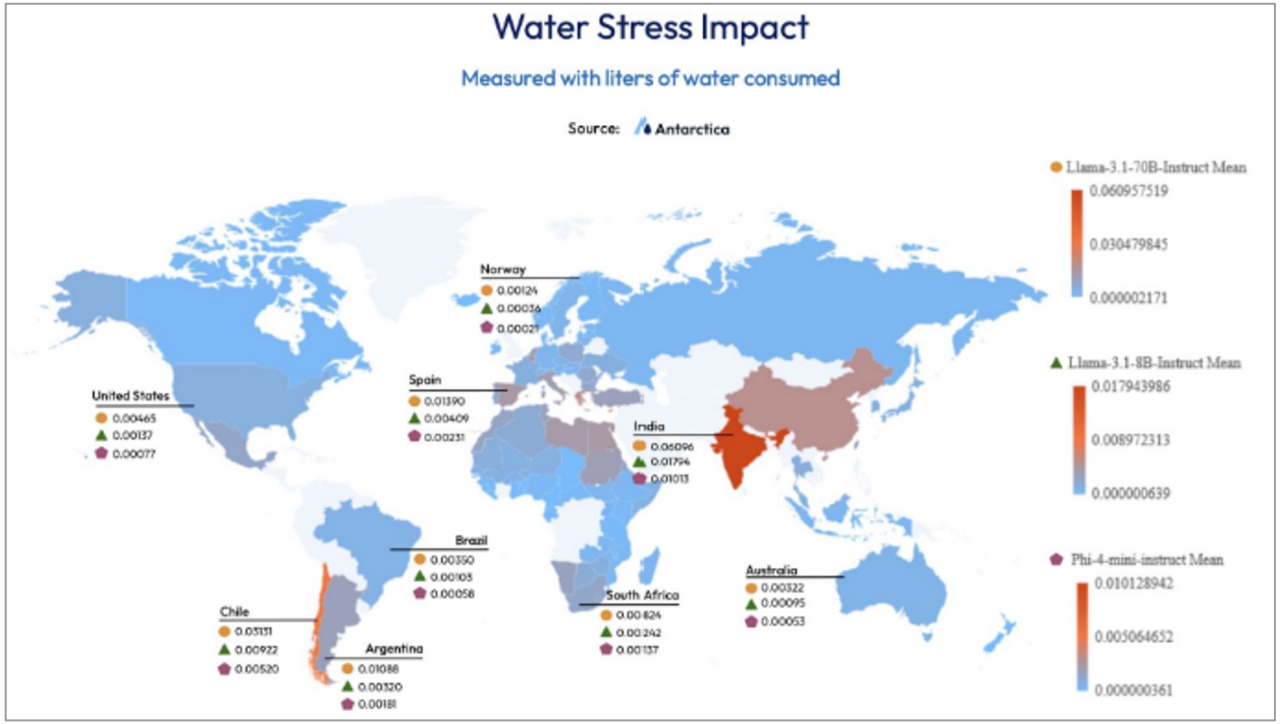
L'IA in energia, trasporti e alimentazione potrebbe ridurre da 3,2 a 5,4 miliardi di tonnellate di CO_2e l'anno entro il 2035, riduzioni superiori alle emissioni dei data center e dell'IA stessa. (Nature*)

Le politiche plasmano l'IA	**La moratoria di Singapore sui data center** - ha imposto una **moratoria sui nuovi data center nel 2019** per la pressione su energia e acqua - L'approvazione avviene ora tramite **assegnazione competitiva**: richiede efficienza ai massimi livelli e almeno il 50% di energia verde. - ~30% di energia in meno per le apparecchiature IT, spostando **l'onere dell'efficienza dall'edificio al livello di calcolo**
L'IA plasma l'attuazione delle politiche	**Il CCTS indiano partirà a ottobre 2026** - Il CCTS, primo mercato del carbonio regolamentato dell'India, parte con i primi scambi di certificati **per ~490 soggetti obbligati,** tra i più grandi ETS al mondo - I crediti sono emessi sulla base delle **emissioni verificate per unità di prodotto**: l'intero mercato dipende dalla qualità del MRV. - **L'MRV digitale** (satellite + IA) sostituisce i lenti audit manuali con dati continui e non manipolabili, con fornitori che segnalano fino al **70% di costi di verifica in meno**

*https://www.nature.com/articles/s44168-025-00252-3

La stessa query di IA inviata a un data center in India produce un impatto in termini di stress idrico 21 volte superiore rispetto alla Germania.

Mathieu François, CEO di Antartica (post LinkedIn)

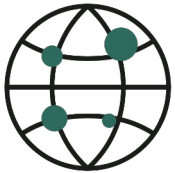


Una query di media lunghezza su **LLaMA 8B** consuma **8,96 mL d'acqua in India.** La stessa query consuma **3,26 mL in Germania.** Il divario in volume è inferiore a 3x.

Ma, ponderato per la scarsità regionale, **l'impatto di stress idrico è 17,1 in India e 0,8 in Germania.** Il divario diventa 21x.

Con il **modello 70B** su un prompt lungo, **l'impatto di stress in India arriva a 122, contro 5,7 in Germania.**

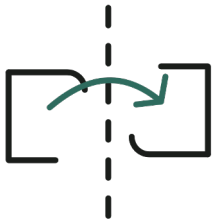
I costi di carbonio dell’IA: tre lacune di governance



La distribuzione geografica dei costi di carbonio dell’IA



Contabilità del carbonio obbligatoria per addestramento e inferenza dell’IA



Responsabilità transfrontaliera quando un’IA sviluppata in un paese danneggia persone in un altro

Che cosa distingue l'IA nell'azione climatica

Costruire soluzioni di IA per l'azione climatica richiede un approccio più ampio

	Convenzionale	Azione climatica
Scopo e motivazione	• Risultati aziendali: profitto, quota di mercato, PI	• Risolvere problemi comunitari o sistemici: l'IA è parte di un problema più ampio
Chi definisce il problema Stakeholder/coinvolgimento	• Manager aziendali, team operativi e dati	• Comunità interessate, enti pubblici, ONG: laboratori partecipativi, questionari, sessioni di co-progettazione
Questioni sociali ed etiche	• Più reattiva e orientata alla conformità (es. GDPR)	• Integrate fin dall'inizio: equità e inclusione, tutela della privacy
Dati e metodi	• Dati strutturati, puliti, interni	• Dati spesso incompleti e disordinati, che richiedono interpretazione, pulizia e comprensione del contesto
Responsabilità e successo	• KPI: vendite, riduzione dei costi, coinvolgimento degli utenti	• Benefici sociali, cambiamenti sistemici, responsabilità verso le comunità coinvolte

Uscire dalla trappola del «PILOTA» .

DATI / PROBLEMA

che cosa si costruisce

I dati devono essere **rappresentativi della popolazione** e delle **condizioni** locali

PULSOSSIMETRO

Dati verificati sul campo, **in mano alle istituzioni responsabili** dell'azione

BRASILE INPE (PRODES/DETER)

Individuare la **corretta formulazione del problema** fin dall'inizio

MODELLO DI EPIDEMIE DI DENGUE / MP

IMPLEMENTAZIONE

se raggiunge qualcuno

Integrare l'IA nei **flussi di lavoro esistenti** con meccanismi di azione

ALLUVIONE DI DERNA

Accuratezza e benchmark vanno stabiliti in **scenari di impiego reali,** non in laboratorio

SCREENING DELLA RD DI GOOGLE - THAILANDIA

PROCESSO DECISIONALE

se ci si può fidare

Per i sistemi critici, progettare con **l'essere umano nel ciclo**

PREVISIA - BRASILE

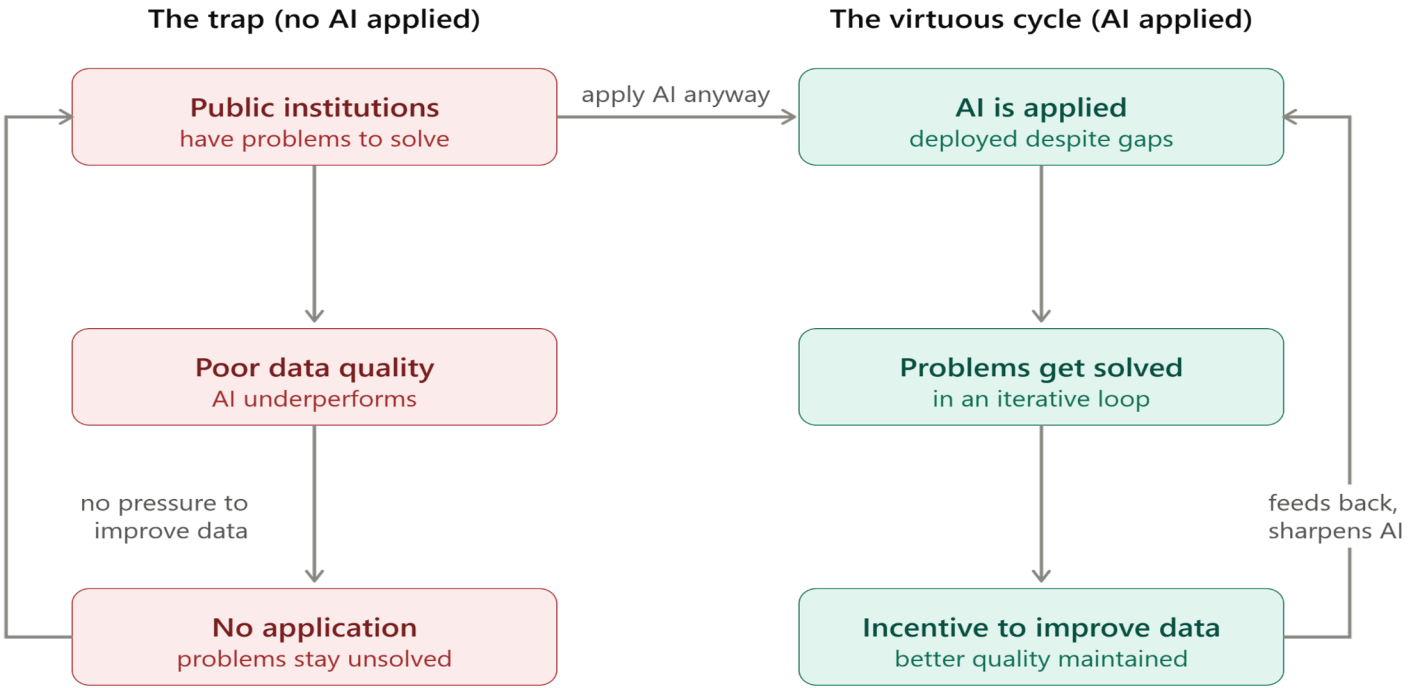
Titolarità istituzionale oltre i progetti pilota e per miglioramenti iterativi che consentano un'operatività progressiva

PIANO D'AZIONE CONTRO IL CALDO DI AHMEDABAD

Comunicare l'incertezza del modello è importante quanto il risultato

FULMINI - CASO DI STUDIO IN ODISHA

La qualità dei dati non è un prerequisito da attendere: è un prodotto dell'uso



Caso 1: dati rappresentativi

Il dispositivo di cui tutti si fidavano non vedeva la pelle scura

24,504

pazienti studiati

JAMA Internal Medicine, 2022



Contesto

- Durante il **COVID-19, i pulsossimetri** sono diventati lo strumento di prima linea per monitorare l'ossigeno nel sangue.
- **Usati con fiducia** senza alcun dubbio

Complicazione

- Calibrati dal 1989 su popolazioni prevalentemente di pelle chiara
- nei pazienti di pelle più scura sovrastimavano sistematicamente l'ossigenazione, facendoli sembrare stare bene quando non era così

Azioni

- La FDA riconosce il problema e chiede standard aggiornati.
- I dispositivi restano invariati: troppo radicati nella pratica clinica.

Il parallelo climatico: un'IA addestrata su dati del Nord globale interpreta male la realtà locale allo stesso modo. Dati rappresentativi e sovrani non sono un optional: sono la condizione della fiducia.

Caso 2: titolarità istituzionale di dati e risultati

L'INPE brasiliano (PRODES / DETER): dati sovrani, verificati sul campo, in mano all'istituzione responsabile

~95%

accuratezza del registro ufficiale PRODES dell'INPE



Contesto

- Proiezioni straniere sulla deforestazione hanno portato la Banca mondiale a congelare i prestiti al Brasile, tra continue dispute tra enti sui numeri reali.

Azione

- il governo ha incaricato il proprio istituto spaziale di produrre dati ufficiali sulla deforestazione a partire da osservazioni satellitari reali.
- PRODES fornisce il tasso annuo ufficiale (~95% di accuratezza); DETER emette allerte quotidiane su cui l'agenzia di controllo pianifica ispezioni e operazioni contro il disboscamento illegale

Risultato

- Con il rafforzamento dei controlli dal 2023, la quota del Brasile nella perdita globale di foresta tropicale primaria è scesa dal 43% al 30%, il minimo dal 2015

Il parallelo climatico: le informazioni sul rischio sono utilizzabili solo se l'istituzione responsabile possiede la verità sul campo

Caso 4: una previsione non è un risultato, qualcuno deve ancora agire

Derna, Libia · tempesta Daniel · settembre 2023

4,300+

morti, nonostante un preavviso di 3 giorni



Contesto

- Un'allerta meteorologica è stata emessa tre giorni prima della tempesta Daniel, e la previsione si è rivelata esatta.
- Il rischio di cedimento di una diga era stato segnalato in uno studio del 2022, ma nessun sistema operativo lo monitorava né vi rispondeva

Azione

- Quando le dighe hanno ceduto nelle prime ore del mattino, le autorità avevano dato ordini contraddittori e un coprifuoco che teneva i residenti in casa, sul percorso dell'acqua.
- Si sapeva che le vecchie dighe erano in cattivo stato, ma non erano state mantenute.

Risultato

- Sono morte oltre 4.300 persone. La previsione era giusta; ha fallito il sistema intorno: nessun mandato chiaro, nessuna evacuazione, nessuna risposta nell'ultimo miglio.

Il parallelo climatico: un sistema di allerta precoce basato sull'IA, per quanto accurato, è inutile senza i mezzi per agire: mandati chiari, logistica di evacuazione, comunicazione che raggiunga le persone. La previsione è la parte facile.

Caso 5: accuratezza dei modelli di IA in scenari di impiego reali

Screening della retinopatia diabetica · Thailandia, 2019

>90%

accuratezza in laboratorio · Beede et al., 2020



Contesto

- La Thailandia voleva **sottoporre a screening il 60% dei suoi 4,5 milioni di pazienti diabetici**, ma aveva solo **~200 specialisti della retina, un rapporto di 1:3.000.**
- Uno strumento di deep learning prometteva **letture da specialista in pochi minuti anziché settimane**.

Complicazione

- Negli ambulatori, la scarsa illuminazione ha portato il sistema a **scartare il 21% delle immagini** acquisite.
- **La connessione internet lenta** rendeva inaffidabili i caricamenti, da 60 a 90 secondi per immagine. Gli infermieri che facevano lo screening non erano mai stati coinvolti nella progettazione.

Conseguenza

- Gli infermieri p**otevano esaminare solo ~10 pazienti per sessione di due ore; lo strumento creava colli di bottiglia,** non rapidità.
- Rendeva il loro **lavoro più difficile**: lo hanno giudicato peggiore di ciò che sostituiva.

Il parallelo climatico: un modello brillante nei benchmark può fallire sul campo: eventi estremi reali e allerte precoci mettono alla prova l'IA climatica nelle condizioni e nei flussi reali in cui deve funzionare.

Caso 6: titolarità istituzionale per un impatto a lungo termine

Piano d'azione contro il caldo di Ahmedabad · istituzionalizzare una misura efficace

46,8 °C

Picco di maggio 2010 ad Ahmedabad



Contesto

- L'ondata di calore del maggio 2010 ha causato 1.344 decessi in eccesso ad Ahmedabad in un solo mese, un aumento del 43% rispetto alla norma.
- Il telerilevamento mostra che gli insediamenti informali a basso reddito sono più caldi di 5–10 °C rispetto alle zone più ricche della stessa città.

Azione

- Correlare la mortalità giornaliera con la temperatura ha rivelato una soglia (~41 °C) oltre la quale i decessi aumentavano bruscamente, base di un sistema di allerta a livelli.
- Ahmedabad ha creato il primo piano d'azione contro il caldo dell'Asia meridionale: allerte precoci, un programma di tetti freschi e ore di riposo obbligatorie per chi lavora all'aperto.

Risultato

- Uno studio successivo ha rilevato che il piano evita ~1.190 decessi l'anno (2.380 nelle estati 2014–2015 studiate).
- La NDMA lo ha adottato come modello nazionale: oggi piani d'azione contro il caldo sono attivi in oltre 20 Stati indiani.

Il parallelo climatico: l'impatto a lungo termine arriva quando un'istituzione responsabile adotta e finanzia lo strumento oltre il progetto pilota. Il piano di Ahmedabad è durato perché la NDMA ne ha fatto una politica nazionale

Caso 7: affidarsi a modelli di IA che richiedono l'essere umano nel ciclo

PrevisIA (Imazon, con la Procura dello Stato del Pará)

~70%

accuratezza per la supervisione umana



Contesto

- **Perdita di foresta in Amazzonia: i controlli reagiscono lentamente**, perché il monitoraggio convenzionale mostra solo il danno già fatto
- PrevisIA usa **l'IA sulle immagini satellitari per prevedere** dove colpirà la deforestazione illegale, soprattutto **rilevando prima le strade aperte**, poiché il 95% del disboscamento avviene entro 5,5 km da una strada

Azione

- **Allerte di rischio** tramite una dashboard pubblica, ma senza multe né sequestri
- La Procura esamina le previsioni e definisce protocolli d'azione: **l'IA prevede → le persone decidono → segue l'azione**

Risultato

- Ha segnalato circa 5.000 km² di foresta ad alto rischio per il 2024
- Con ~30% di falsi positivi, **l'accuratezza da sola non basta.** La supervisione umana e la titolarità istituzionale permettono all'IA di rafforzare la governance, non di sostituirla.

Il parallelo climatico: per decisioni climatiche ad alto rischio, l'accuratezza è necessaria ma non sufficiente. Mantenete un'istituzione umana responsabile nel ciclo: l'IA deve rafforzare la governance, non sostituirsi a essa.

Le politiche non decidono se l'IA si fa

Decidono

- **quali problemi vale la pena risolvere**,
- **con quali dati si possono risolvere**, e
- **che cosa bisogna dimostrare prima che qualcuno agisca sui vostri risultati**.

Caso da discutere: i fulmini

Il problema dell'«assuefazione agli allarmi» e dei falsi positivi (la sfida modellistica)

Per ogni aumento di 1 °C della temperatura ambiente globale, le proiezioni stimano un aumento del 12% dei fulmini

L'India sta registrando un aumento della frequenza dei fulmini, concentrato in alcuni Stati

- Il 96% dei decessi per fulmini in India avviene esclusivamente in aree rurali
- Il 77% delle vittime sono braccianti agricoli giornalieri nelle risaie aperte o pastori nei pascoli aperti
- La fascia oraria più letale va dalle 14:00 alle 19:00

- Il nowcasting dei fulmini riguarda nubi convettive rapide e molto instabili. Poiché questi sistemi cambiano velocemente, i modelli generano spesso «falsi positivi»: prevedono un fulmine localizzato e violento che poi si dissolve o cambia direzione.
- Se il vostro modello di IA attiva tre sirene di fila in un villaggio senza che cada alcun fulmine, la comunità svilupperà una forte «assuefazione agli allarmi» e ignorerà la quarta allerta, potenzialmente mortale.

Come data scientist, come regolate la soglia di sensibilità del modello? È meglio tollerare i falsi allarmi per massimizzare la sicurezza, o rischiare di non segnalare un fulmine per preservare la fiducia della comunità?

Caso d’uso reale: previsione delle epidemie di malattie trasmesse da vettori in Madhya Pradesh

Obiettivo: **un modello che prevede i casi settimanali da 1 a 8 settimane in anticipo per 51 distretti del Madhya Pradesh, con dati sui casi dal 2017 al 2025.**

2 domande per ogni distretto

FASE 1 — Ci saranno casi nelle prossime settimane?

Allerta sì / no

▼

FASE 2 — Se sì, quanti?

Classificare la settimana per livello di gravità

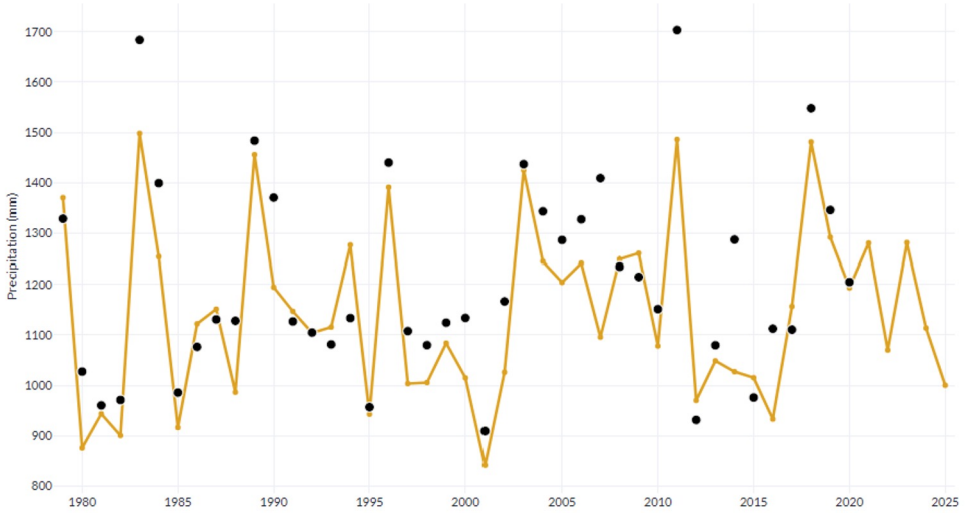
0	1–5	5–20	20+
Nessuno	Basso	Medio	Alto

Dati climatici: una fonte che copra ogni distretto e settimana

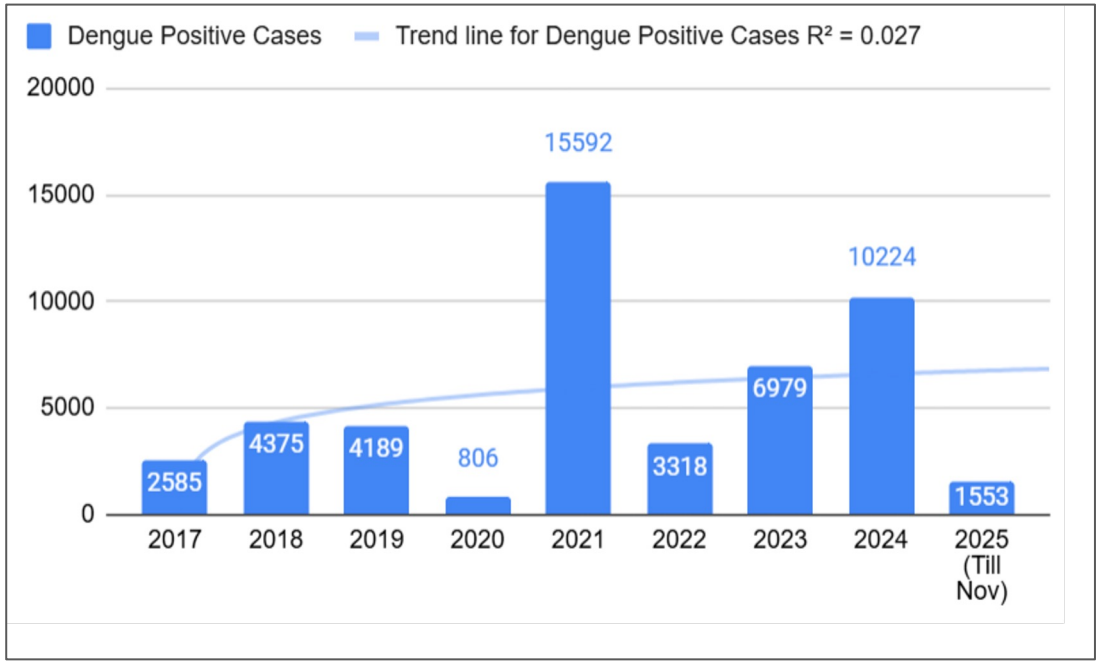
I dati delle stazioni sono considerati la verità sul campo

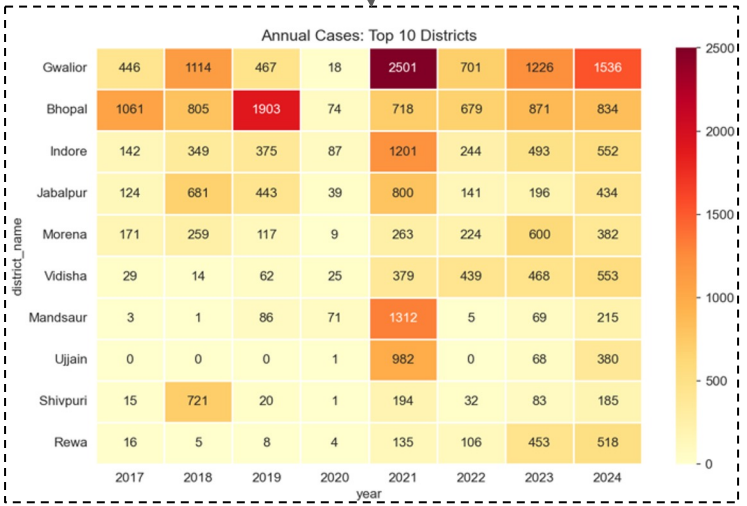


- Per ERA5 e i dati su griglia dell'IMD con dati delle stazioni
- Confrontando temperatura e umidità di entrambi con i dati giornalieri delle stazioni, sono quasi identici
- Le precipitazioni sono meglio correlate per l'IMD

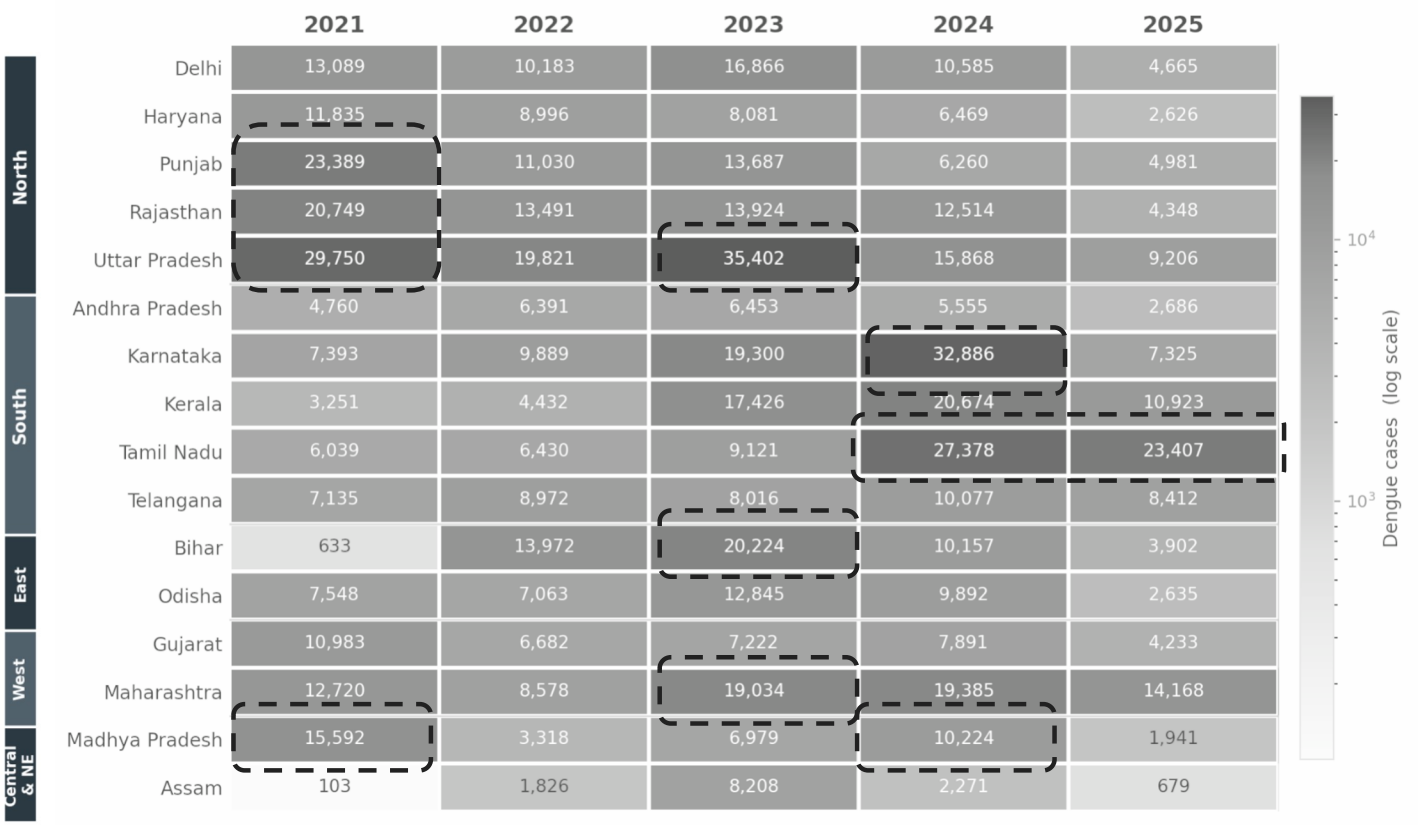


Analisi esplorativa dei dati del MP: picchi in regioni e anni che richiedevano approfondimenti





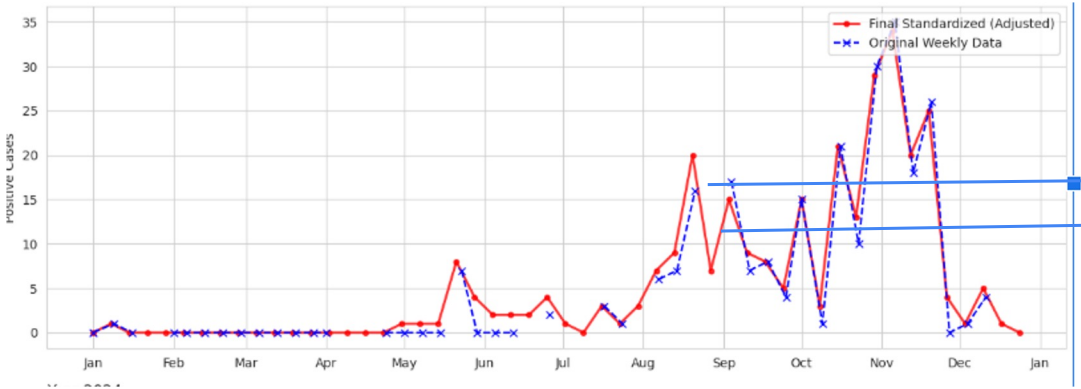
In India, regioni diverse registrano picchi in anni diversi



- Ciò significa che i picchi dipendono da fattori strettamente legati allo spazio, come entomologia e sierotipi
- Contraddice l'idea che i picchi siano dovuti solo al post-COVID o alla migrazione

In pratica (sul campo): i dati sui casi sono incompleti e sottostimati e vanno corretti prima della modellazione

Dati sui casi mancanti



Casi corretti con i totali mensili

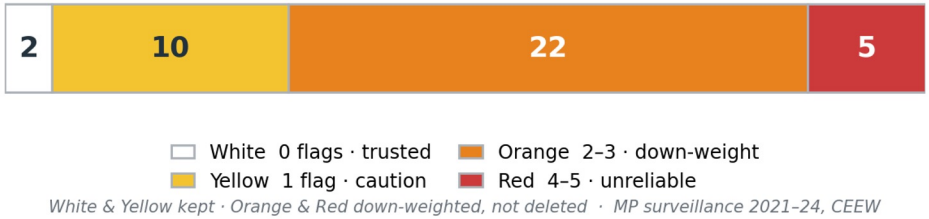
Casi settimanali segnalati

Dati sui casi sottostimati

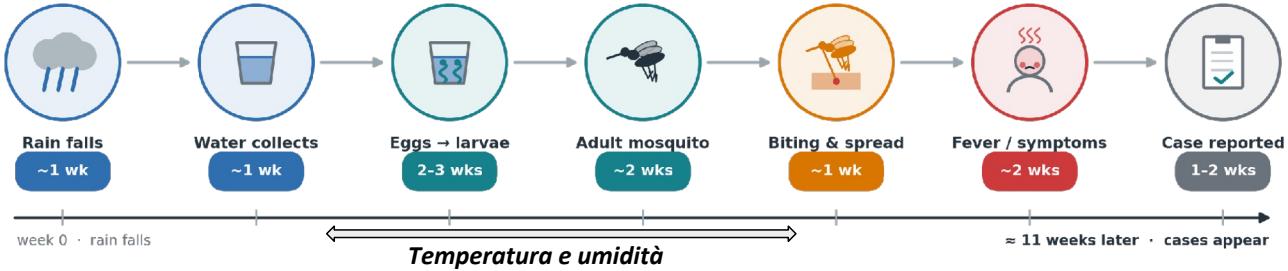
Ogni anno-distretto passa 4 controlli di qualità:

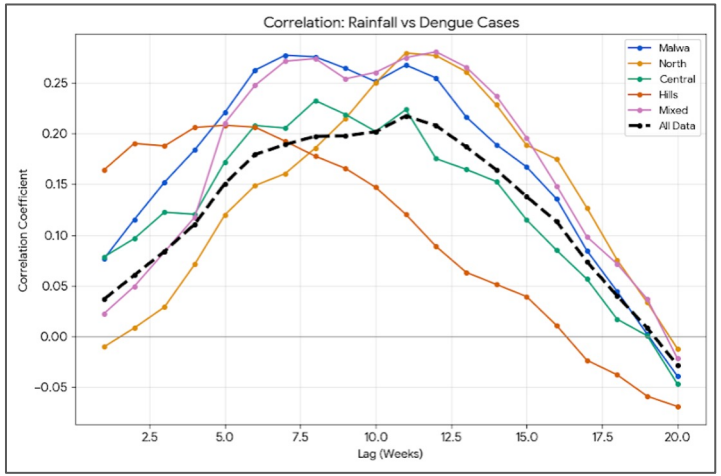
1. Numero di campioni nullo / implausibilmente basso
2. Settimane mancanti (nessuna segnalazione)
3. **Cali e picchi improvvisi inspiegati**
4. Incoerenze interne (es. positivi > campioni)

39 distretti attivi: e settimane-distretto



Variabili ritardate nel machine learning: i parametri climatici anticipano i casi di circa 8–12 settimane, secondo la firma di ogni regione





Regioni	Picco di precipitazioni Ritardi
Altopiano di Malwa: (es. Indore, Ujjain)	**8 settimane**
Nord/Gird: (es. Gwalior, Morena)	**11 settimane**
Centro/Narmada: (es. Jabalpur, Hoshangabad)	**8 settimane**
Colline/Satpura: (es. Balaghat, Chhindwara)	**9 settimane**
Misto/Bundelkhand: (es. Sagar, Rewa)	**12 settimane**

Modello di machine learning in due fasi: la fase 1 segnala le settimane con casi (ottimizzata per il recall); la fase 2 ne stima il numero

COSA ENTRA — 56 variabili (M6)

Pioggia e precipitazioni · 15
pioggia al ritardo ottimale, giorni piovosi e molto piovosi; somme a 4/8 sett., estremi

Temperatura e umidità · 11
temperatura e umidità in 3 blocchi; max/min a 12 sett.; settimane nella fascia 25–32 °C

Storico dei casi e riferimenti · 12
incidenza con ritardi 9–12; 7 riferimenti per distretto; ancoraggio SARIMA

Analisi di laboratorio e sorveglianza · 8
log dei campioni e positività, ritardi 5–8; medie mobili a 4 sett.

Vegetazione e interazioni · 10
habitat NDVI; pioggia×temperatura; idoneità per le zanzare; indicatore COVID

Rimossi i segnali del calendario stagionale: i picchi si spiegano con il clima, non con la data.

Come sono i conteggi dei casi · 5.616 settimane-distretto, 2021–24

Conteggio	Fascia	Quota di settimane
0 casi	Settimana tranquilla	3,243 · 57.7%
1–5	Sporadico	1,139 · 20.3%
6–20	Elevato	795 · 14.2%
>20	Epidemia	439 · 7.8%

FASE 1 — Ci saranno casi?

- Il classificatore analizza l'andamento dei casi e il clima ed emette un'allerta sì / no per ogni settimana-distretto

→ **Soglia di allerta fissata a 0,35 e non a 0,5: reagisce ai segnali deboli così che poche epidemie reali sfuggano**

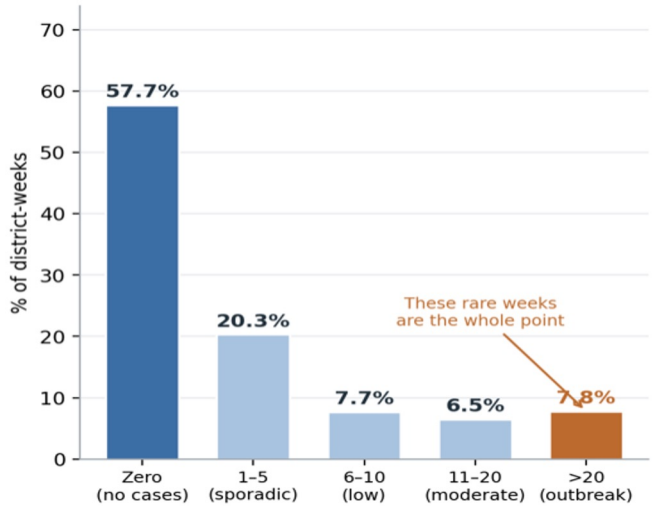
FASE 2 — Quanti casi?

- Si attiva solo se la fase 1 dice sì: un ensemble di 3 modelli stima il numero di casi
- Perdita di Tweedie: pensata per conteggi asimmetrici ricchi di zeri; le previsioni non sono mai negative
  - Errore assoluto medio asimmetrico

Due aggiunte che migliorano l’accuratezza

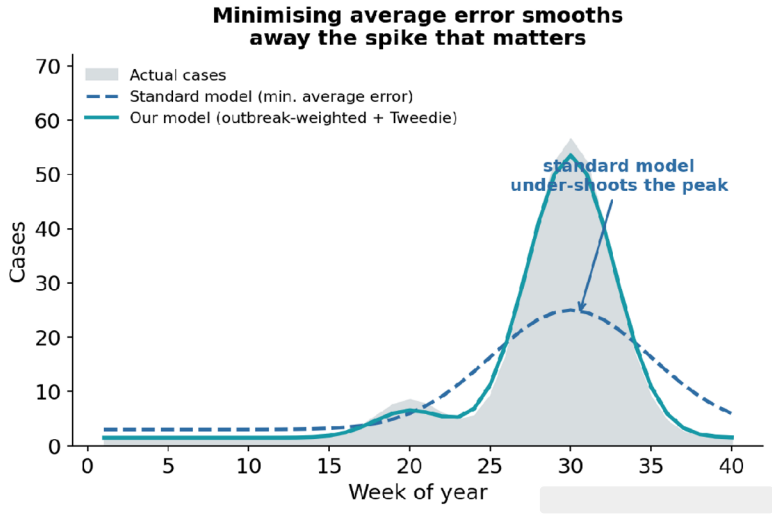
La distribuzione di perdita di Tweedie:

- Un modello che tratta tutte le settimane allo stesso modo impara solo il segnale dominante: «prevedere calma».
- Usiamo una perdita di Tweedie, pensata per conteggi ricchi di zeri e asimmetrici a destra, così le previsioni restano non negative e la perdita si concentra sulla coda pericolosa



Errore assoluto medio asimmetrico (AsymMAE):

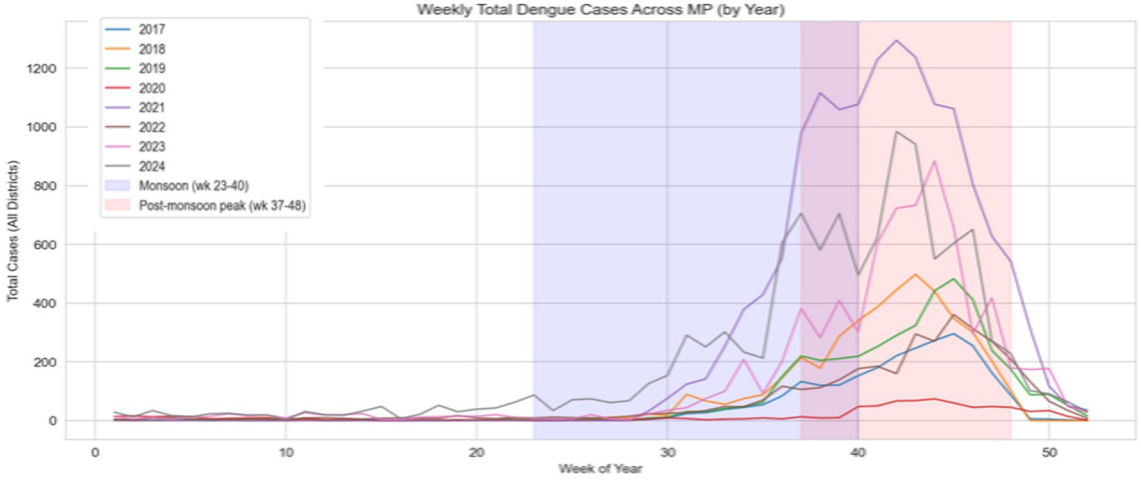
- Prevedere «la media» sembra corretto quasi sempre, anche se sappiamo che non lo è.
- Una funzione di perdita asimmetrica che penalizza molto più il mancato rilevamento di un’epidemia che la sovrastima di una settimana tranquilla: il modello è costretto a inseguire il picco, non la media.
- Le settimane epidemiche sono inoltre sovrappesate da 2 a 6 volte nell’addestramento, così il modello si esercita di più sugli eventi rari che fanno davvero scattare le allerte sanitarie.

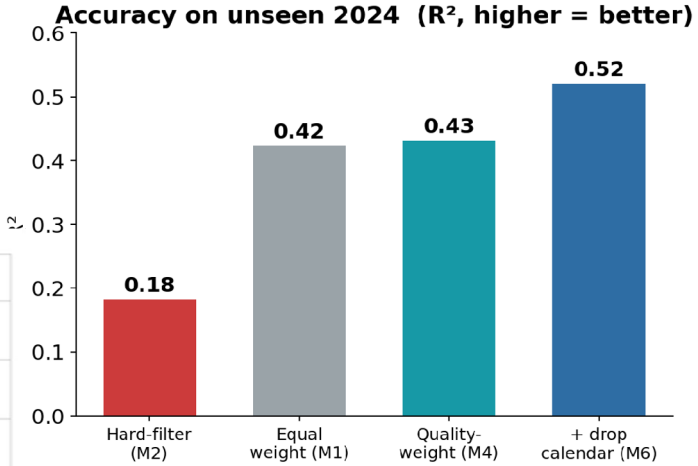


La dengue è stagionale, ma se il monsone arriva prima o dopo?

La forma della stagione è fissa; cambia solo l'ampiezza, quindi abbiamo verificato se il modello si limita a memorizzare la data

- La stagione **ha forma fissa**: **~78% dei casi tra sett. e nov.**, picco a ottobre, ogni anno. Cambiano solo **l'ampiezza** (≈8×) e **la durata** (≈8 vs ≈4 mesi).
- Questo rende il calendario una scorciatoia allettante: «prevedere un picco a settembre perché è settembre».
- Abbiamo quindi **rimosso tutte le variabili di calendario** (settimana dell'anno, indicatori del monsone) e rieseguito:
  - **modello ponderato per qualità → migliorato** (R^2 0,43 → **0,52**): impara il «perché» climatico.
  - **modello non ponderato → peggiorato** (0,32 → 0,26): aveva bisogno della stampella.
- Questo aiuta il modello a individuare i veri predittori dei casi di dengue, cioè i cambiamenti climatici.





M1 — Riferimento: dati completi, nessun filtro di qualità, recall più alto (0,85).
M2 — «White-only»: addestrato su dati puliti, elimina le distorsioni, il più debole
M4 — Ponderato per qualità: sovrappesa i dati puliti, solido e poco complesso
M6 — Migliore: ponderato per qualità, senza calendario, impara il clima

Esperimenti: confronto tra sei modelli (2024 di test, distretti puliti)

Che cosa conta come epidemia

- Settimana epidemica = più di 5 casi in un distretto in una settimana
- M6 è valutato rispetto a questa soglia sui dati di test del 2024.

Modello	Variabili	Stagione	MAE	RMSE	R^2	F1	Precisione	Recall
M1: tutti i dati mantenuti (nessun filtro)	60	Sì	4.28	9.85	0.42	0.85	0.85	0.85
M2: escluse le settimane sottostimate	25	Sì	4.85	11.73	0.18	0.80	0.80	0.81
M3: inclusi i ritardi per distretto	69	Sì	4.38	10.69	0.32	0.81	0.89	0.74
M4: settimane sottostimate ponderate	60	Sì	4.07	9.77	0.43	0.84	0.88	0.81
M5: inclusi i ritardi per distretto + rimosso il n° di settimana	65	No	4.64	11.16	0.26	0.84	0.87	0.81
M6: M4+M5	**56**	**No**	**4.03**	**8.97**	**0.52**	**0.85**	**0.87**	**0.84**

I nostri prossimi passi nel progetto

➔ **Aumentare la granularità:** passare dal livello distrettuale a quello sub-distrettuale (quartiere/centro sanitario di base) con dati e analisi geospaziale

➔ **Cambi di sierotipo:** quale ceppo circola (DEN-1/2/3/4). Un cambio, es. un aumento di DEN-2, può trasformare un anno tranquillo in un anno epidemico.

➔ **Sorveglianza delle zanzare:** entomologia sul campo, indagini larvali e densità dei vettori adulti (dove e quanti).

➔ **Implementazione pilota in MP e Tamil Nadu:** far funzionare il sistema in due Stati per testarlo con climi e sistemi di segnalazione diversi.

Lezioni per chi sviluppa…

1. **Le politiche non stabiliscono se si costruisce: decidono che cosa vale la pena costruire**
2. **Il vostro stesso calcolo è ora oggetto di policy**
3. **Dati rappresentativi e sovrani sono una condizione della fiducia, non un optional**
4. **L’accuratezza in laboratorio non è accuratezza sul campo**
5. **Una previsione non è un risultato; la titolarità istituzionale è la strategia di implementazione**
6. **Ottimizzate il capitale di fiducia, non solo la funzione di perdita**

Grazie