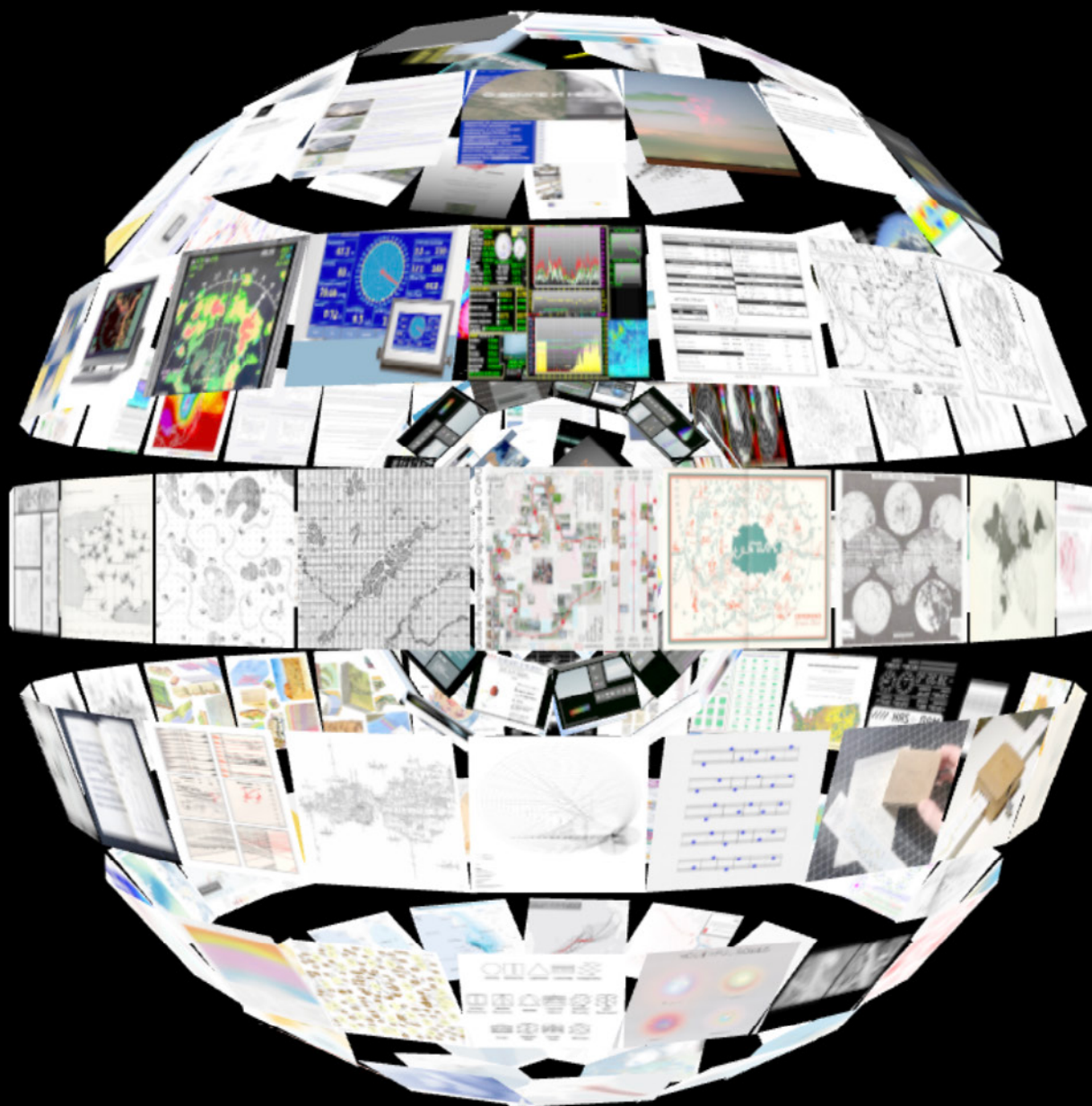




Fotograma del seminario "Counter-Modeling the Weather Machine" durante el ciclo "Indagaciones atmosféricas" en Matadero MediaLab, Madrid.

Still image from the Seminar 'Counter-Modeling the Weather Machine' during the Atmospheric Inquiries Series at MediaLab Matadero Madrid.

© Lucía Rebolino, 2024.

CONTRAMODELANDO LA MÁQUINA METEOROLÓGICA

COUNTER-MODELING THE WEATHER MACHINE

RESUMEN En un contexto crítico de crisis climática y cuestionamiento de las narrativas científicas, este ensayo reimagina la modelación climática a través de la estética digital, las contraprácticas y el pensamiento arquitectónico. Explora las tecnologías utilizadas para realizar pronósticos, desde los primeros métodos numéricos hasta las nuevas formas sintéticas de inteligencia, destacando las tensiones entre los avances computacionales y la imprevisibilidad del clima. Basándose en la arquitectura como herramienta de razonamiento espacial y crítica sistémica, propone un nuevo marco crítico para experimentar con prácticas alternativas de modelación ante condiciones inciertas. Al desplegar los modelos científicos tradicionales, el ensayo también revela las narrativas políticas y ecológicas ocultas que se encuentran integradas en las infraestructuras de predicción y control.

ABSTRACT Within the critical landscape of the climate crisis and contested scientific narratives, this essay reimagines climate modeling through digital aesthetics, counter-practices, and architectural thinking. It explores forecasting technologies from early numerical methods to new synthetic forms of intelligence, highlighting tensions between computational advances and climate unpredictability. Drawing on architecture as a tool for spatial reasoning and systemic critique, it proposes a new critical framework to experiment with alternative modeling practices amid uncertainty. By unfolding traditional scientific models, the essay also reveals hidden political and ecological narratives embedded within the infrastructures of prediction and control.

LUCIA REBOLINO

Goldsmiths, University of London
Londres, Reino Unido

l.rebolino@gold.ac.uk

<https://orcid.org/0009-0002-4658-5414>

PALABRAS CLAVE

atmósfera
pronóstico meteorológico
redes
infraestructuras energéticas
prácticas críticas

KEYWORDS

atmosphere
weather forecasting
grids
power infrastructures
critical practices

→ Existe una larga tradición artística, literaria, fotográfica y poética sobre la meteorología, que se nutre de las observaciones humanas del cielo. Pero, cuando cambiamos el enfoque, y en lugar de mirar al cielo examinamos las vastas máquinas¹ que lo observan, nos encontramos con un ámbito más novedoso, pero igualmente significativo: la historia de la meteorología en la cultura digital (Edwards, 2010). Después de milenios de especulaciones y teorías, hemos conectado la Tierra con satélites, sensores y computadoras, todos ellos interconectados mediante sistemas globales de telecomunicaciones que utilizan el tiempo atmosférico como parte de una infraestructura predictiva. Estos sistemas operan a través de los dos sentidos de la noción de “medios”: tanto en el sentido semiótico (por ejemplo, periodismo, radio, *web*) como en el sentido ontológico (por ejemplo, teledetección, supercomputación, simulación). Las “lecturas del cielo”² se han convertido así en un campo mediado digitalmente que requiere traducciones estéticas digitales a través de datos, archivos, mapas y, sobre todo, modelos (Peters, 2015). En este contexto, los modelos desempeñan un papel crucial en la forma en que los medios digitales formalizan el mundo: son dispositivos epistémicos que codifican la realidad en formas, patrones e imágenes específicas.

Los modelos configuran lo que se considera conocimiento, pero también excluyen otras formas de conocer. Este ensayo analiza cómo el pensamiento arquitectónico —históricamente sintonizado con el espacio, los sistemas y las escalas— podría utilizarse para cuestionar la lógica estructural de los modelos predictivos. Propone el contramodelado como una forma de crítica epistemológica y estética: una práctica que no solo expone las infraestructuras de pronóstico, sino que también interviene en los lenguajes visuales y espaciales a través de los cuales el futuro se vuelve cognoscible.

Por ejemplo, los modelos climáticos funcionan como representaciones simplificadas de la realidad que nos permiten investigar sistemas complejos. Son artefactos activos: constructos matemáticos o computacionales a

→ There is a long history of art, literature, photography, and poetry about the weather drawn from human observations of the sky. But when we shift focus from looking up at the sky to examining the vast machines¹ that observe it, we encounter a newer but equally significant domain: the history of weather in digital culture (Edwards, 2010). After millennia of wondering and theorizing, we have wired the Earth with satellites, sensors, and computers, all networked through global telecommunications systems that use weather as part of a predictive infrastructure. These systems operate across both media: the semiotic sense (e.g., journalism, radio, web) and the ontological sense (e.g., remote sensing, supercomputing, simulation). ‘Sky readings’² have thus become a digitally mediated field requiring digital aesthetic translations through data, archives, maps, and above all, models (Peters, 2015). In this context, models play a crucial role in how digital media formalize the world: they are epistemic devices that encode reality into specific forms, patterns, and images.

Models shape what counts as knowledge, but they also foreclose other ways of knowing. This essay considers how architectural thinking—long attuned to space, systems, and scales—might be used to contest the structural logics of predictive modeling. It proposes counter-modeling as a form of epistemological and aesthetic critique: a practice that not only exposes the infrastructures of forecasting, but also intervenes in the visual and spatial languages through which the future is rendered knowable.

For instance, climate models function as simplified representations of reality that allow us to investigate complex systems. They are active artifacts—mathematical or computational constructs through which knowledge is produced, tested, or simulated.

¹ La “vasta máquina” de pronóstico meteorológico fue la primera World Wide Web, como señala Edwards (2010). Se trata de una red global de intercambio de datos que no solo generó un proyecto genuinamente global, sino que también impulsó exponencialmente las tecnologías computacionales.

² En su libro *The Marvelous Clouds*

(2015), John Durham Peters describe el acto de leer el cielo como “un arte diagramático”, destacando cómo prácticas como la observación del cielo pueden ser consideradas formas de medios. Al hacerlo, Peters conecta técnicas ancestrales con prácticas mediáticas más amplias, que se extienden más allá de las tecnologías modernas.

¹ The ‘vast machine’ of weather forecasting was the first worldwide web, as Edwards (2010) argues. It is a global network for the exchange of data that not only generated a genuinely global project but also advanced computer technologies exponentially.

² In his book *The Marvelous Clouds* (2015), John Durham

Peters describes the act of reading the sky as ‘a diagrammatic art’ highlighting how practices such as weather observation can be viewed as forms of media. By doing so, Peters connects ancient techniques to broader media practices that extend beyond modern technologies.

través de los cuales se produce, se pone a prueba o se simula el conocimiento.

La atmósfera misma, al igual que un objeto arquitectónico, funciona como un centro de datos: contiene un registro geológico de sus transformaciones, sedimentando los rastros de los residuos tecnológicos a lo largo del tiempo. Se crea un bucle de retroalimentación³ entre la infraestructura tecnológica utilizada para detectar y predecir el clima y el propio tiempo atmosférico. En otras palabras, los mismos sistemas diseñados para observar y realizar pronósticos de la atmósfera están, a su vez, influyendo en ella y configurándola. Estas tecnologías no son neutrales: no solo miden el medio ambiente, sino que también interactúan con los territorios que pretenden capturar y los transforman.

Los centros de datos, las redes de sensores y las constelaciones de satélites —diseñados y distribuidos a lo largo de diversas zonas geográficas, moldeados por las agendas territoriales, la gobernanza medioambiental y la espacialización de los datos— no se limitan a registrar el clima, sino que constituyen una infraestructura a escala planetaria que participa en él. Estas arquitecturas forman parte de una “nube” más amplia, no solo en términos metafóricos, sino también termodinámicos: un sistema de calor, carbono y computación donde las emisiones y las partículas convergen con los modelos predictivos.

A medida que los patrones meteorológicos se vuelven cada vez más inestables, se acelera la necesidad imperiosa de realizar predicciones, lo que a su vez refuerza un ciclo tecnológico que requiere mejores herramientas para leer un mundo que cambia cada vez más rápido. Sin embargo, las propias infraestructuras construidas para modelar estos futuros —integradas en el espacio físico, dependientes de grandes cantidades de energía y a menudo situadas en terrenos disputados— intervienen en los sistemas que están llamadas a medir. Emiten calor, reconfiguran paisajes, informan las políticas y alteran los flujos atmosféricos. En

The atmosphere itself, much like an architectural object, functions as a data center: it holds a geological record of its transformations, sedimenting the traces of technological residues over time. A feedback loop³ is created between the technological infrastructure used to sense and predict the climate and the weather itself. In other words, the very systems designed to observe and forecast the atmosphere are, in turn, influencing and shaping it. These technologies are not neutral; they not only measure the environment but also interact with and transform the territories they aim to capture.

Data centers, sensor arrays, and satellite constellations—designed and distributed across diverse geographies, shaped by territorial agendas, environmental governance, and the spatialization of data—do not merely register the climate; they constitute a planetary-scale infrastructure that participates in it. These architectures form part of a larger ‘cloud,’ one not only metaphorical but thermodynamic: a system of heat, carbon, and computation where emissions and particles converge with predictive models.

As weather patterns become increasingly unstable, the imperative to predict accelerates, reinforcing a technological loop where better tools are called upon to read a faster-changing world. Yet the very infrastructures built to model these futures—embedded in physical space, reliant on vast energy, and often situated in contested terrains—intervene in the systems they measure. They emit heat, reshape landscapes, inform policy, and alter atmospheric flows. In this recursive logic, forecasting becomes a form of spatial production: a design practice inscribed into the weather itself.

³ Norbert Wiener (1948), una figura pionera en la cibernética, definió los bucles de retroalimentación como el mecanismo fundamental que permite a los sistemas autorregularse y adaptarse a nueva información o cambios en sus entornos.

³ Norbert Wiener (1948), a pioneering figure in cybernetics, defined feedback loops as the foundational mechanism that allows systems to self-regulate and adapt to new information or changes in their environments.

esta lógica recursiva, el pronóstico se convierte en una forma de producción espacial: una práctica de diseño inscrita en el propio tiempo atmosférico.

Incluso los sistemas de predicción más complejos son contruidos por personas situadas en geografías específicas y evolucionan según intenciones humanas (Blum, 2019). Controlar el tiempo atmosférico ha sido uno de los deseos más antiguos y perdurables de la humanidad, en particular, poder modelarlo y pronosticarlo. Sin embargo, resulta fácil dejarse llevar y creer demasiado en el poder y el refinamiento de la modelación. Cuanto más conectamos la Tierra, más crece esta infraestructura y, con ella, también se expanden las promesas inmateriales de lo que la modelación puede ofrecer.

Aunque estos temas son científicos en esencia, la predicción climática depende inevitablemente de conceptos como la escala y los modelos, profundamente arraigados en el pensamiento de la arquitectura y el diseño. Como herramientas representacionales, la escala y los modelos permiten establecer conexiones profundas entre la ciencia y el diseño, y los modelos computacionales han facilitado la colaboración interdisciplinaria.

Durante mucho tiempo, los modelos utilizados en la predicción meteorológica se han cruzado con las prácticas arquitectónicas, revelando una relación de múltiples capas entre la observación y la proyección. Estos modelos están diseñados dentro de restricciones espaciales —de escala, resolución y geografía— para traducir los cambios medioambientales en evidencias que puedan informar la planificación espacial. De esta manera, los modelos dejan de ser dispositivos abstractos para convertirse en dispositivos operativos y espaciales, haciendo que la atmósfera sea rastreable y, por lo tanto, gobernable a través de distintas escalas de diseño y de política.

Desde las primeras formas usadas por la humanidad para observar el cielo hasta las redes contemporáneas de sensores, los cambios en el “sujeto observador” han configurado la forma en que se mapea, simula y comprende la meteorología. Estos modelos (ya sean ecuaciones o simulaciones) no se limitan a representar la atmósfera, sino que construyen activamente realidades. Incorporan ciertas suposiciones y bucles de retroalimentación en los sistemas que intentan predecir. Desde una perspectiva histórica, este entrelazamiento entre el observador y el modelo pone de relieve cómo las tecnologías de pronóstico climático no solo miden fenómenos atmosféricos, sino que también configuran la manera en que se interpretan y representan.⁴

Even the most complex prediction systems are built by people in specific geographies and evolve according to human intentions (Blum, 2019). Weather control has always been one of humanity’s oldest desires—particularly the ability to model and foresee the weather. However, it is easy to get carried away, to believe too much in the power and elegance of modeling. The more we wire the Earth, the larger this infrastructure grows, and with it, the immaterial promises of what modeling can deliver also expand.

Although these topics are scientific at their core, climate prediction inevitably relies on concepts like scale and models, which are deeply embedded in design and architectural thinking. As representational tools, scale and models allow for deep connections between science and design, and computational models have enabled interdisciplinary collaboration.

Models used in climate prediction have long intersected with architectural practices, revealing a layered relationship between observation and projection. They are designed within spatial constraints—of scale, resolution, and geography—to translate environmental changes into evidence that can inform spatial planning. In this way, models move from abstraction to operative, spatial devices, making the atmosphere traceable and, thereby, governable across design and policy scales.

From early forms of human sky-watching to contemporary sensor networks, shifts in the ‘observing subject’ have shaped how weather is mapped, simulated, and understood. These models—whether equations or simulations—do not merely depict the atmosphere; they actively construct realities. They embed certain assumptions and feedback loops into the systems they aim to predict. Through a historical lens, this entanglement between observer and model highlights how the technologies of climate forecasting not only measure atmospheric phenomena but also shape their interpretation and representation.⁴

Through spatial and visual evidence embedded in the power structures that have shaped modeling since the rise of numerical thinking, we can begin to trace a shift in scale and perspective (Coen, 2018). This shift reveals the need for counter-modeling: critical practices that resist the normative,



Fábrica de pronósticos meteorológicos, de Stephen Conlin, basada en la descripción de *Weather Prediction by Numerical Process*, de L. F. Richardson (Cambridge University Press, 1922).

Weather Forecast Factory, by Stephen Conlin, based on the description in *Weather Prediction by Numerical Process*, by L. F. Richardson (Cambridge University Press, 1922).

© Stephen Conlin, 1986.

A través de evidencias espaciales y visuales imbricadas en las estructuras de poder que han dado forma al modelado desde el surgimiento del pensamiento numérico, podemos comenzar a rastrear un cambio de escala y perspectiva (Coen, 2018). Este cambio revela la necesidad de un contramodelado: prácticas críticas que resisten la lógica normativa y controladora de los sistemas de pronóstico dominantes, exponiéndolos como infraestructuras de gobernanza en lugar de herramientas neutrales.

MODELOS CLIMÁTICOS

La práctica moderna de la modelación climática se remonta a finales del siglo XIX, cuando el científico noruego Vilhelm Bjerknes exploró por primera vez la idea de predecir el tiempo atmosférico mediante la física matemática. Esta ambición formaba parte de un esfuerzo internacional más amplio para desarrollar sistemáticamente la observación y la predicción meteorológica. En la década de 1830, el pensador inglés John Ruskin imaginó una red mundial de observaciones y mapas meteorológicos sincronizados, visualizando, en esencia, un sistema global que permitiera realizar pronósticos mucho antes de que existiera la tecnología necesaria. La idea de Ruskin de una red distribuida de mapas meteorológicos fue un primer atisbo de lo que el historiador de la ciencia y la tecnología Paul Edwards, en su libro *A Vast Machine: Computer Models, Climate Data, and the Politics of Global Warming* (2010), denominó la “vasta máquina” de predicción: un sistema sociotécnico compuesto por modelos, archivos de datos, redes satelitales e instituciones políticas.

A pesar de los avances en los estudios meteorológicos, a principios del siglo XX era difícil realizar predicciones precisas debido a las limitaciones de los datos, lo que impulsó esfuerzos para crear sistemas de recopilación y almacenamiento de datos. En 1922, Lewis Fry Richardson, quien fuera más tarde descrito por su biógrafo como una persona con una “inteligencia poco ortodoxa”, articuló la visión de una “fábrica de pronósticos”: un edificio compuesto por “computadoras humanas” capaces de procesar grandes cantidades de datos simultáneamente (Wilson, 1999).

controlling logics of mainstream forecasting systems by exposing them as infrastructures of governance rather than neutral tools.

CLIMATE MODELS

The modern practice of climate modeling dates back to the late 19th century, when the Norwegian scientist Vilhelm Bjerknes first explored the idea of predicting weather through mathematical physics. This ambition was part of a broader international push to develop systematic weather observation and forecasting. In the 1830s, the English thinker John Ruskin imagined a worldwide network of synchronized weather observations and maps, essentially envisioning a global system for forecasting long before the required technology existed. Ruskin's idea of a distributed weather map network was an early glimpse of what historian of science and technology Paul Edwards, in his book *A Vast Machine: Computer Models, Climate Data, and the Politics of Global Warming* (2010), called a ‘vast machine’ of prediction—a sociotechnical system made of models, data archives, satellite networks, and political institutions.

Despite progress in meteorological studies, data limitations hindered accurate prediction by the early 20th century, prompting efforts to create systems for data collection and storage. In 1922, Lewis Fry Richardson, later described by his biographer as having ‘unorthodox intelligence,’ articulated a vision of a ‘forecast factory’: a building made of ‘human computers’ capable of processing vast amounts of data simultaneously (Wilson, 1999).

Richardson imagined a weather infrastructure, a system where coordinated computing could produce a forecast for the next day by calculating the Earth's atmosphere patch by patch, based on the earliest examples of a numerical grid (nowadays called a computational grid) (Wilson, 1999). He introduced

⁴ Norbert Wiener (1948), “Las nubes resisten la ontología” forma parte de los escritos de Lorraine Daston (2016) sobre meteorología y observación científica. Allí, Daston explora cómo los científicos del siglo XIX luchaban por imponer una ontología ordenada a un cielo en constante cambio.

Daston destaca la búsqueda de la objetividad en las imágenes científicas, los límites epistemológicos de la observación y las formas creativas en que estos científicos negociaban la frontera entre las variables de la naturaleza y los límites humanos de la representación.

⁴ ‘Clouds resist ontology’ is part of Lorraine Daston's (2016) writings on meteorology and scientific observation, where she explores how 19th-century scientists struggled to impose an orderly ontology onto the ever-changing sky. She highlights their pursuit

of objectivity in scientific images, the epistemological limits of observation, and the creative ways they negotiated the boundary between nature's variables and human limits of representation.

Richardson imaginó una infraestructura meteorológica, un sistema en el que el cálculo coordinado pudiera generar un pronóstico para el día siguiente mediante el cálculo de la atmósfera terrestre celda por celda, basándose en los primeros ejemplos de una cuadrícula numérica (hoy llamada cuadrícula computacional) (Wilson, 1999). Richardson introdujo la idea de la descomposición de dominios, es decir, dividir un problema global complejo en partes más pequeñas (celdas de la cuadrícula) que puedan resolverse simultáneamente, que es precisamente la forma en que operan hoy en día las supercomputadoras climáticas.

Los modelos climáticos se basan en la física y se sustentan en ecuaciones que expresan las leyes fundamentales de conservación de la masa, el momento y la energía en todo el planeta. Sin embargo, no todas estas ecuaciones pueden resolverse directamente, y es aquí donde entra en juego la aproximación espacial. Los matemáticos consideran que la atmósfera es un “sistema caótico”, y la ecuación de Navier-Stokes, que describe el movimiento de los fluidos, sigue sin resolverse en condiciones de turbulencia, las cuales son críticas para los cálculos atmosféricos. En su lugar, los investigadores simplifican estas ecuaciones mediante enfoques estadísticos, reduciendo las reglas universales a puntos de medición únicos sobre cuadrículas numéricas y espaciales que seccionan la Tierra.

En este proceso, el espacio se convierte, por primera vez, en una variable cuantificable incorporada al modelo, dejando de ser un trasfondo pasivo para convertirse en un parámetro activo de la simulación. Estas cuadrículas computacionales redefinen no solo la abstracción científica, sino también la representación territorial, funcionando como herramientas cartográficas que discretizan el espacio. Operan a través de límites basados en reglas que evocan fronteras y geografías, donde los cálculos parecen apolíticos, pero obedecen a los regímenes de la física y la dinámica de fluidos, y conllevan consecuencias espaciales y políticas implícitas.

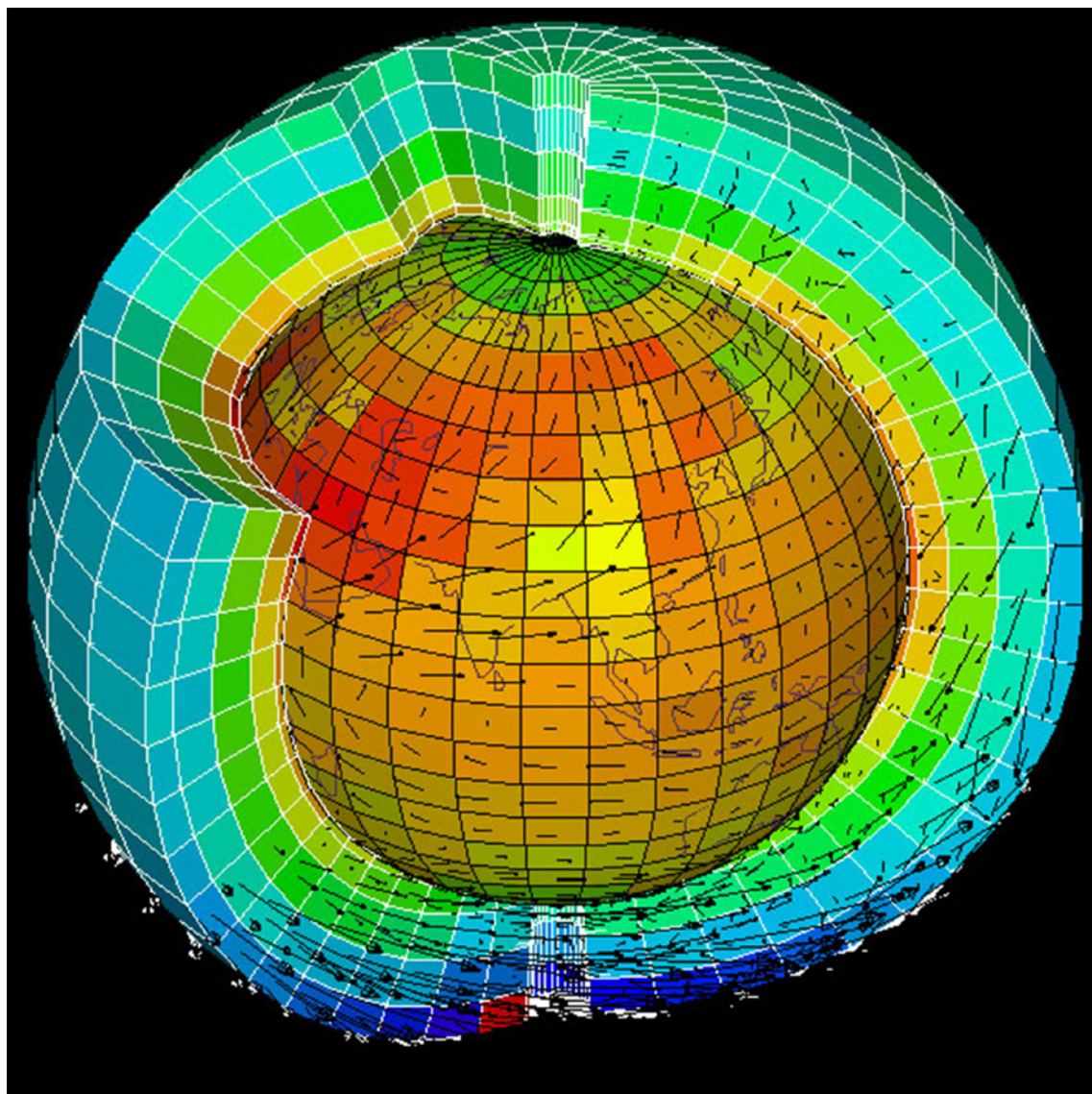
Este concepto espacial y arquitectónico presagiaba el procesamiento paralelo de las supercomputadoras modernas y la lógica de coordinación de los modelos numéricos de pronóstico meteorológico. La fábrica, ilustrada por Stephen Conlin en 1986 a partir de la detallada descripción que ofrece L. F. Richardson en *Weather Prediction by Numerical Process* (1922), presenta una arquitectura impulsada por humanos análoga a las arquitecturas de computación paralela de la actualidad. Se trataba de un sistema altamente organizado de personas y herramientas, un ejemplo temprano de lo que el historiador de la ciencia Paul Edwards (2010) denomina “globalismo infraestructural”, en el que se construyen vastos sistemas técnicos (en este

the idea of domain decomposition—breaking a complex global problem into smaller parts (grid cells) that can be solved simultaneously—which is exactly how modern climate supercomputers operate.

Climate models are built on physics, grounded in equations that express the fundamental conservation laws of mass, momentum, and energy across the planet. Yet not all of these equations can be solved directly—this is where spatial approximation comes into play. The atmosphere is considered a ‘chaotic system’ by mathematicians, with the Navier-Stokes equation—describing the motion of fluids—remaining unresolved for turbulent conditions, which are critical to atmospheric calculations. Instead, researchers have simplified these equations through statistical approaches, reducing universal rules to single measurement points on numerical and spatial grids that section the Earth.

In this process, space becomes, for the first time, a quantifiable variable embedded within the model—no longer a passive background but an active parameter in the simulation. These computational grids redefine not only scientific abstraction but also territorial representation, functioning as cartographic tools that discretize space. They operate through rule-based boundaries that echo borders and geographies—where calculations appear apolitical yet follow regimes of physics and fluid dynamics that carry implicit spatial and political consequences.

This spatial and architectural concept foreshadowed the parallel processing of modern supercomputers and the coordinating logic of numerical weather models. The factory, illustrated by Stephen Conlin in 1986 based on L. F. Richardson’s detailed description in *Weather Prediction by Numerical Process* (1922), presents a human-powered architectural analogue to today’s parallel computing architectures. It was a highly organized system of people and tools—an early example of what science historian Paul Edwards (2010) calls ‘infrastructural globalism,’ wherein vast technical systems (in this case, for weather data and calculation) are built to serve global knowledge and governance aims. In other words, the drive to forecast the weather was never purely about physics; it was also about building an infrastructure through which humans could exert a measure of control and coordination over environmental phenomena on a planetary scale: the climate system was being rendered calculable and governable.



La visualización científica del modelo climático divide la Tierra en una cuadrícula tridimensional, aplicando ecuaciones diferenciales basadas en la física dentro de cada celda.

Climate model scientific visualization divides the Earth into a three-dimensional grid, applying physics-based differential equations within each cell.

© L. Fairhead (IPSL/LMD).

caso, para datos y cálculos meteorológicos) al servicio de los objetivos de conocimiento y gobernanza globales. En otras palabras, el impulso por pronosticar el tiempo atmosférico nunca fue puramente un asunto de física: también se trataba de construir una infraestructura a través de la cual los seres humanos pudieran ejercer un cierto grado de control y coordinación sobre los fenómenos ambientales a escala planetaria: el sistema meteorológico se estaba convirtiendo en algo calculable y gobernable.

En el mismo libro, Richardson también imaginaba un “mundo espejo”: una simulación digital integral que reflejaría la realidad física con el objetivo de predecirla. Richardson afirmó: “Quizás algún día, en un futuro lejano, sea posible avanzar en los cálculos más rápido de lo que avanza el clima. Pero eso es un sueño” (1922, p. vii). Hoy, el “sueño” de Richardson, como todavía se conoce en el ámbito de la climatología, se ha materializado en forma de nuevos y avanzados modelos climáticos sintéticos, también conocidos como “gemelos digitales” de la Tierra: simulaciones en tiempo real que encarnan una nueva estética y política de inmersión, predicción y control.

MODELOS SINTÉTICOS

Ahora, en la etapa más reciente de la centenaria evolución de los modelos climatológicos predictivos, nos encontramos en medio del auge de las simulaciones de ultra alta resolución, en las que la modelación climática está cada vez más entrelazada con la inteligencia artificial. Al igual que los modelos climáticos, los sistemas de IA están profundamente entrelazados con la infraestructura física y los regímenes energéticos. La IA no es una tecnología “virtual”, sino una tecnología espacial y material, integrada en servidores, centros de datos y redes de energía.

Las demandas energéticas de los sistemas de IA a gran escala —específicamente, de los centros de datos utilizados para entrenar y operar los modelos de aprendizaje automático— son inmensas. Aunque la computación suele parecer abstracta, siempre hay fuerzas físicas y espaciales en juego. Estas infraestructuras no solo consumen enormes cantidades de electricidad, sino que también influyen en los patrones climáticos locales a través del calor residual que liberan. Esto crea una paradoja de retroalimentación: las mismas herramientas diseñadas para modelar, predecir o mitigar el cambio climático contribuyen a él a través del consumo continuo de energía. La computación impulsada por IA se ha convertido en una parte material del sistema climático, difuminando la distinción entre el tiempo atmosférico y la “nube” artificial de la infraestructura digital (Amoore, 2020).

In the same book, Richardson also imagined a ‘mirror world’: a comprehensive digital simulation that would mirror physical reality in order to predict it. He stated, “Perhaps someday in the dim future it will be possible to advance the computations faster than the weather advances. But that is a dream” (1922, p. vii). Today, Richardson’s ‘dream’—as it is still known in climate science—has materialized in the form of new, advanced, synthetic climate models, also known as ‘digital twins’ of the Earth: real-time simulations that embody a new aesthetic and politics of immersion, prediction, and control.

SYNTHETIC MODELS

Now, at the latest stage in the century-long evolution of predictive models in climate science, we find ourselves amidst the rise of ultra-high-resolution simulations, where climate modeling is increasingly entwined with artificial intelligence. Like climate models, AI systems are deeply entangled with physical infrastructure and energy regimes. AI is not a ‘virtual’ technology—it is spatial and material, embedded in servers, data centers, and power grids.

The energy demands of large-scale AI systems—particularly the data centers used to train and operate modern machine-learning models—are immense. While computing often appears abstract, physical and spatial forces are always at work. These infrastructures not only draw massive amounts of electricity but also influence local weather patterns through the waste heat they release. This creates a feedback-loop paradox: the very tools designed to model, predict, or mitigate climate change are themselves contributing to it through continuous energy consumption. AI-driven computation has become a material part of the climate system, blurring the distinction between atmospheric weather and the artificial ‘cloud’ of digital infrastructure (Amoore, 2020).

We are entering the era of ‘Earth Digital Twins’—constantly updated, hyper-detailed simulations that aim to mirror the entire planet in real time. The resemblance between this digital vision and Lewis Fry Richardson’s 1920s forecast factory is striking. In Richardson’s imagination, a human conductor orchestrated an architecture made of human calculators. Today, those human bodies have been replaced by silicon processors and neural networks—but the fantasy remains: that

Estamos entrando en la era de los “gemelos digitales de la Tierra”: simulaciones hiperdetalladas y constantemente actualizadas que pretenden reflejar todo el planeta en tiempo real. La semejanza entre esta visión digital y la fábrica de pronósticos concebida por Lewis Fry Richardson en los años veinte es sorprendente. En la imaginación de Richardson, un director humano orquestaba una arquitectura compuesta por calculadoras humanas. Hoy, esos cuerpos humanos han sido reemplazados por procesadores de silicio y redes neuronales, pero la fantasía persiste: la Tierra puede ser modelada y gobernada a través de sistemas computacionales.

Sin embargo, incluso en esta arquitectura altamente automatizada, la inteligencia humana sigue estableciendo los límites: decidiendo los marcos, los supuestos y las reglas dentro de los cuales operan estos modelos. Se trata de una visión que pretende dominar la complejidad, que confía en la infraestructura para traducir la incertidumbre en control. Pero esta traducción nunca es neutral: codifica decisiones sobre lo que cuenta como conocimiento, qué datos se hacen visibles y qué escalas de acción se priorizan. En ese sentido, estos sistemas no solo pronostican futuros, sino que los configuran activamente, operacionalizando una epistemología planetaria a través de cuadrículas, píxeles y protocolos.

Lo que sigue es una exploración crítica de prácticas que resisten esta lógica singular: contramodelos que ponen en primer plano la opacidad, la parcialidad y otras formas de conocer y diseñar dentro de los sistemas atmosféricos.

CONTRAMODELANDO

Inicialmente un término militar, el concepto de “infraestructura”⁵ ha pasado a describir el marco arquitectónico que permite a los modelos computacionales aprender y representar patrones de datos complejos, transformando nuestra comprensión de su relación en el espacio (Easterling, 2014). Desde la fábrica de pronósticos

the Earth can be modeled and governed through computational systems.

Yet even in this highly automated architecture, human intelligence still sets the boundaries—deciding the frameworks, assumptions, and rules within which these models operate. It is a vision of mastery over complexity, one that relies on infrastructure to translate uncertainty into control. But this translation is never neutral: it encodes decisions about what counts as knowledge, whose data is rendered visible, and which scales of action are prioritized. As such, these systems not only forecast futures but actively shape them, operationalizing a planetary epistemology through grids, pixels, and protocols.

What follows is a critical exploration of practices that resist this singular logic—countermodels that foreground opacity, partiality, and other ways of knowing and designing within atmospheric systems.

COUNTER-MODELING

Initially a military term, ‘infrastructure’⁵ has come to describe the architectural framework that enables computational models to learn from and represent complex data patterns, transforming our understanding of their relation in space (Easterling, 2014). From Richardson’s forecast factory to contemporary Earth–system simulations, infrastructure functions not only as physical support but also as a spatial–political device. The interplay between weather observation, computational technologies, and political control has historically shaped our capacity to predict the atmosphere. Since the advent of the telegraph, weather forecasting has evolved alongside telecommunications and other technologies. Yet today’s demand for speed and power exposes a critical misalignment.

⁵ La infraestructura se define como «sistemas y servicios grandes, duraderos y que funcionan bien» (Edwards et al., 2009, p. 365), en consonancia con el uso histórico del procesamiento de datos meteorológicos en la estrategia militar durante conflictos. La Guerra Fría, en particular, fue testigo de importantes avances

computacionales, liderados por figuras como John von Neumann, quien fue fundamental en la creación de infraestructuras informáticas en la posguerra, tanto para simular explosiones nucleares como para modelar bombas, además de abogar por el avance de la meteorología computacional.

⁵ Infrastructure is defined as a “big, durable, well-functioning systems and services” (Edwards et al., 2009, p. 365), aligning with the historical use of weather data processing in military strategy during conflicts. The Cold War, in particular, saw major computational advancements, led by figures

like John von Neumann, who was instrumental in creating postwar computing infrastructures for both simulating nuclear explosions and modeling bombs, alongside advocating for the advancement of computational meteorology.



Jensen Huang, CEO de NVIDIA,
presentando el gemelo digital
climático Earth 2 de NVIDIA.

NVIDIA CEO Jensen Huang
presenting Earth 2 Climate
Digital Twin, NVIDIA.

© NVIDIA Corporation, 2024.

de Richardson hasta las simulaciones contemporáneas del sistema terrestre, la infraestructura funciona no solo como soporte físico, sino también como dispositivo político-espacial. La interacción entre la observación meteorológica, las tecnologías computacionales y el control político ha configurado históricamente nuestra capacidad para predecir la atmósfera. Desde la aparición del telégrafo, el pronóstico de las condiciones meteorológicas ha evolucionado junto con las telecomunicaciones y otras tecnologías. Sin embargo, la demanda actual de velocidad y potencia revela un desajuste crítico.

En los últimos años, las empresas de telecomunicaciones han invadido —y ahora comparten— la misma banda de frecuencia de 24 GHz del espectro electromagnético que las agencias meteorológicas han utilizado históricamente para rastrear el vapor de agua, una señal física esencial para los pronósticos meteorológicos. Las redes de alta velocidad (5G de banda alta) que operan en este rango obstruyen la recolección de datos atmosféricos, generando interferencias. Tal como ocurre con la tierra, el espectro radioeléctrico se ha convertido en un espacio disputado, configurado por interferencias políticas y necesidades infraestructurales. El conflicto radica en la carrera de la industria de las telecomunicaciones por conseguir redes más rápidas y amplias, y la creciente pérdida de datos de las agencias meteorológicas, un choque que amenaza con retrasar hasta 40 años la capacidad de predicción meteorológica (Benish et al., 2020).

Esta tensión remite al comienzo del siglo xx, cuando los mapas meteorológicos de Vilhelm Bjerknes⁶ no representaban la dinámica de fluidos de la atmósfera, sino una infraestructura centrada en lo humano. Su sistema mapeaba puntos fijos: estaciones meteorológicas terrestres dispuestas según las fronteras políticas en lugar de seguir la continuidad atmosférica. En ese sentido, eran menos mapas meteorológicos que mapas de infraestructura, reflejando la fragmentación de la cooperación global en soberanías nacionales.

Las tecnologías radiofónicas, que se han expandido hacia su propia forma de urbanismo infraestructural, se entrecruzan con una red global de decenas de miles de estaciones individuales, ubicaciones físicas concretas que muestrean celdas localizadas de la atmósfera. Estas estaciones y sus señales sirven como un microcosmos de las tensiones más

In recent years, telecommunications companies have encroached on—and now share—the same 24-GHz frequency band of the electromagnetic spectrum that meteorological agencies historically used to track water vapor, an essential physical signal for weather forecasting. High-speed networks (high-band 5G) operating in this range obstruct atmospheric data collection, creating interference. Much like land, the radio spectrum has become a contested space, shaped by political interference and infrastructural needs. The conflict lies between the telecommunications industry's race for faster, broader networks and meteorological agencies' increasing data loss—a clash threatening to set weather forecasting back by up to 40 years in capability (Benish et al., 2020).

This tension recalls the early 20th century, when Vilhelm Bjerknes'⁶ weather maps depicted not the atmosphere's fluid dynamics, but a human-centered infrastructure. His system mapped fixed points—ground-based weather stations arranged by political borders rather than atmospheric continuity. In this sense, they were less weather maps than infrastructure maps, reflecting the fragmentation of global cooperation into national sovereignty.

Radio technologies, which have expanded into their own form of infrastructural urbanism, intersect with a global network of tens of thousands of individual stations—actual, physical locations sampling localized patches of the atmosphere. These stations and their signals serve as a microcosm of the broader tensions at play: between localized observation and global understanding, between technological infrastructure and the political struggles that define it.

The global apparatus of observation and prediction—this 'vast machine'—is composed of many interconnected parts historically designed to collaborate (Edwards, 2010). Weather forecasting has never been the achievement of a single nation; it has always been a continuous international effort, built upon the borderless verticality of the atmosphere (Parks, 2018). There is no forecasting without observation, and no observation without

⁶ Vilhelm Bjerknes fue un físico y meteorólogo noruego, pionero en el pronóstico meteorológico

moderno. Sentó las bases de la Escuela de Meteorología de Bergen.

⁶ Vilhelm Bjerknes was a Norwegian physicist and meteorologist who pioneered

modern weather forecasting, laying the foundation for the Bergen School of Meteorology.

amplias que están en juego: entre la observación localizada y la comprensión global, entre la infraestructura tecnológica y las luchas políticas que la definen.

El aparato global de observación y predicción —esta “vasta máquina”— está compuesto por muchas partes interconectadas diseñadas históricamente para colaborar (Edwards, 2010). El pronóstico meteorológico nunca ha sido un logro de una sola nación: siempre ha sido resultado de un esfuerzo internacional continuo, construido sobre la verticalidad sin fronteras de la atmósfera (Parks, 2018). No hay pronóstico sin observación, ni observación sin infraestructura.

Esta visión global, aún centrada en lo humano —que asume que si algo es modelable, también es replicable— intenta representar una realidad que a menudo avanza más rápido que los propios modelos. Identificamos patrones y los convertimos en modelos para estructurar la complejidad. Pero los modelos no son neutrales: están configurados por decisiones humanas, por las ecuaciones seleccionadas y los datos incorporados. Para comprender lo que revela un modelo, también debemos preguntarnos qué es lo que excluye.

Estudios recientes destacan la incertidumbre de los nuevos modelos fundacionales de IA cuando se aplican al pronóstico climático, especialmente en la anticipación de eventos extremos que se desvían de los patrones históricos. Estos sistemas tienden a ignorar los valores atípicos. Sin embargo, en la climatología los valores atípicos suelen ser los más significativos: eventos climáticos extremos (como huracanes) que empujan a la atmósfera hasta su punto límite, desafían las normas estadísticas y perturban los mercados. Eventos como estos permanecen en los puntos ciegos de los modelos de IA (Griffiths, 2023). El pasado no siempre es un predictor confiable del futuro, especialmente cuando el clima se calienta a un ritmo acelerado. El papel de la IA en la modelación del clima para la acción futura puede, de hecho, afianzar la inacción, transformando el cambio climático en un proceso interminable de cálculo y dilación.

En los dos casos anteriormente descritos —ya sea en la violencia concentrada de los huracanes o en el tenue rastro de una gota de agua que refleja una frecuencia de radio— el vapor de agua se convierte en una anomalía, un valor atípico que resiste la asimilación en los sistemas de modelación predictiva. Estos modelos se basan en reglas y supuestos que, por su diseño, marginan lo que queda fuera, relegándolo a la periferia de narrativas tecnológicas que equiparan el progreso con el control.

En una era de cambio climático acelerado, en la que la

infraestructura.

This global, still human-centric view—assuming that if something is modelable, it is also replicable—attempts to depict a reality that often advances faster than the models themselves. We identify patterns and turn them into models in order to structure complexity. But models are not neutral; they are shaped by human decisions—by the equations selected and the data assimilated. To understand what a model reveals, we must also ask what it excludes.

Recent studies underscore the uncertainty of new AI foundation models when applied to climate forecasting, particularly in predicting extreme events that deviate from historical patterns. These systems tend to ignore outliers—yet in climate science, outliers are often the most significant: extreme weather events (like hurricanes) that push the atmosphere to its breaking point, defy statistical norms, and disrupt markets. Events like these remain in the blind spots of AI models (Griffiths, 2023). The past is not always a reliable predictor of the future, especially as the climate warms at an accelerated rate. AI's role in modeling the climate for future action may, in fact, entrench inaction—transforming climate change into an endless process of calculation and deferral.

In both cases described above—whether in the concentrated violence of hurricanes or the faint trace of a water droplet reflecting a radio frequency—water vapor becomes an anomaly, an outlier that resists assimilation into systems of predictive modeling. These models are based on rules and assumptions that, by design, marginalize what is left out, relegating it to the periphery of technological narratives that equate progress with control.

In an era of rapid climate change, where technological evolution continuously reshapes the field of climate science, we must rethink our relationship with data and models. In *New Dark Age*, James Bridle—reflecting on Richardson's dream of the forecast factory—writes: “The history of computational thinking begins with the weather” (2018, p. 20). But today, the promise of prediction collides with our obsession with data. As Patricia MacCormack (2020) suggests in *The Ahuman Manifesto*, if we continue living as we do—seeking land to fuel systems of technologies that consume

evolución tecnológica transforma continuamente el campo de la climatología, debemos replantear nuestra relación con los datos y los modelos. En *New Dark Age*, James Bridle reflexiona sobre el sueño de Richardson de la fábrica de pronósticos y escribe: “La historia del pensamiento computacional comienza con la meteorología” (2018, p. 20). Pero hoy, la promesa de la predicción choca con nuestra obsesión por los datos. Como sugiere Patricia MacCormack (2020) en *The Ahuman Manifesto*, si seguimos viviendo como hasta ahora —buscando tierras para alimentar sistemas tecnológicos que consumen energía y se rigen por el poder de predecir y controlar— nuestros territorios desaparecerán, dejando que nuestros datos se conviertan en materia prima para la inteligencia artificial.

Si consideramos la atmósfera no solo como un sistema físico, sino como una condición mediática —donde la señal, el canal y la transmisión son tan importantes como el contenido—, entonces comprender la arquitectura de la predicción se vuelve esencial. Los modelos no son meramente instrumentos científicos: son infraestructuras mediáticas que configuran cómo se detecta, codifica y distribuye el conocimiento.

Dentro de la lógica de cuadrícula de la computación espacial, los humanos suelen convertirse en *proxies* para el control, la orientación y la autoría. Esto exige replantear cómo nos relacionamos con los modelos climáticos como infraestructuras complejas y estratificadas, “pilas” materiales (Bratton, 2016) compuestas por tecnologías de detección, sistemas de datos, mecanismos de almacenamiento, canales de procesamiento y simulaciones. En el centro subyace una pregunta recurrente: ¿Quién construye el modelo?

Dan Rockmore⁷ reflexiona sobre las limitaciones de los modelos matemáticos en los distintos ámbitos científicos y señala: “A veces, los nuevos avances en tecnología o computación permiten el progreso. En otros casos, los modeladores deben observar la realidad de una manera diferente” (2024). Esta observación sustenta la noción de contramodelado: por cada acto de desarrollo, hay un gesto correspondiente de experimentación radical que desafía y altera las convenciones.

energy and are governed by the power to predict and control—our territories will disappear, leaving our data to become raw material for artificial intelligence.

If we consider the atmosphere not merely as a physical system but as a condition of media—where signal, channel, and transmission matter as much as content—then understanding the architecture of forecasting becomes essential. Models are not only scientific instruments; they are media infrastructures that shape how knowledge is sensed, encoded, and distributed.

Within the grid logic of spatial computing, humans often become proxies for control, orientation, and authorship. This demands a rethinking of how we engage with climate models as complex, layered infrastructures—material ‘stacks’ (Bratton, 2016) composed of sensing technologies, data systems, storage mechanisms, processing pipelines, and simulations. At the center lies a recurring question: Who builds the model?

Dan Rockmore⁷ reflects on the limitations of mathematical models across scientific domains, noting: “Sometimes new developments in technology or computing enable progress. In other cases, modellers have to look at reality in a different way” (2024). This observation underpins the notion of counter-modeling: for every act of development, there is a corresponding gesture of radical experimentation that challenges and disrupts convention.

Within a framework of action and feedback—what Bruno Latour refers to as imbrication (2017)—counter-modeling emerges as a critical methodology. It adopts qualitative reasoning while actively engaging with quantitative tools. Rather than producing predictive outputs, counter-modeling interrogates the methodologies, aesthetics, and assumptions that structure the

⁷ En “How Much of the World Is it Possible to Model”, el matemático Dan Rockmore escribe sobre las limitaciones de los modelos matemáticos y su aplicación en diversos ámbitos, contribuyendo al debate sobre los límites y el potencial del modelado en la ciencia y la tecnología contemporáneas.

⁷ In ‘How Much of the World Is it Possible to Model,’ mathematician Dan Rockmore writes about limitations of mathematical models and their application across various domains, contributing to discussions on the limits and potentials of modeling in contemporary science and technology.

En un marco de acción y retroalimentación —lo que Bruno Latour denomina “imbricación” (2017)—, el contramodelado emerge como una metodología crítica. Adopta un razonamiento cualitativo al tiempo que utiliza activamente herramientas cuantitativas. En lugar de producir resultados predictivos, el contramodelado cuestiona las metodologías, la estética y los supuestos que estructuran la producción del conocimiento en sí misma.

El contramodelado subvierte las perspectivas dominantes y las resoluciones fijas al privilegiar los enfoques relacionales y en red: dirige su atención hacia el interior, hacia la arquitectura interna de los propios modelos, hacia lo que omiten, cómo funcionan y qué futuros simulan o ignoran. Aquí, los modelos son tratados como ensamblajes epistemológicos, estéticos y técnicos. La estética sirve como el lente crítico a través del cual se interpretan los modelos (Fuller & Weizman, 2021), revelando las narrativas políticas, ecológicas e históricas subyacentes. El modelado se convierte no solo en una ciencia de la predicción, sino en una práctica espacial, un sitio contemporáneo de experimentación donde la realidad se codifica en imágenes, estructuras y números.

Las contraprácticas, desde este punto de vista, no son meras formas de resistencia: son herramientas constructivas para reformular conceptos, instituciones y sistemas. El pensamiento feminista lleva mucho tiempo promoviendo estos contramétodos: no solo criticando las infraestructuras dominantes, sino también prototipando alternativas. La visión de Richardson sobre la fábrica de pronósticos nos recuerda el trabajo oculto que hay detrás de los modelos: las computadoras humanas, muchas de ellas mujeres, que se hacen eco de las “computadoras femeninas” de mediados del siglo xx, fundamentales en el desarrollo de las primeras tecnologías de procesamiento de información (Grier, 2005; Russell, 2020).

Un componente clave de un contraenfoque feminista del modelado es el reconocimiento de que la incertidumbre no es una anomalía, sino una condición de posibilidad. Shannon Mattern destaca cómo la incertidumbre está integrada en el procesamiento de datos, donde el acto de preservar y visualizar datos no es neutral, sino profundamente político, configurado por los sistemas y las personas involucradas (Mattern, 2023). En la ciencia meteorológica, por ejemplo, el “cono de incertidumbre” es una herramienta visual que no comunica certeza, sino la naturaleza probabilística de los pronósticos atmosféricos.

El contramodelado abraza esta incertidumbre: se convierte no solo en una forma de crítica, sino también en un gesto especulativo, uno que rechaza la lógica de optimización

production of knowledge itself.

Counter-modeling subverts dominant perspectives and fixed resolutions by privileging relational and networked approaches—it turns its attention inward, toward the internal architecture of models themselves: what they omit, how they function, and whose futures they simulate or ignore. Here, models are treated as epistemological, aesthetic, and technical assemblages. Aesthetics serve as the critical lens through which models are interpreted (Fuller & Weizman, 2021)—revealing the underlying political, ecological, and historical narratives. Modeling becomes not merely a science of prediction, but a spatial practice—a contemporary site of experimentation where reality is encoded into images, structures, and numbers.

Counter-practices, in this light, are not merely forms of resistance; they are constructive tools for reshaping concepts, institutions, and systems. Feminist thinking has long advanced such counter-methods: not only critiquing dominant infrastructures but also prototyping alternatives. Richardson’s vision of the forecast factory reminds us of the hidden labor behind modeling: the human *computers*, many of them women, echoing the mid-20th-century ‘female computers’ instrumental in developing early information-processing technologies (Grier, 2005; Russell, 2020).

A key component of a feminist counter-approach to modeling is the recognition that uncertainty is not an anomaly, but a condition of possibility. Shannon Mattern emphasizes how uncertainty is embedded within data processes, where the act of preserving and visualizing data is not neutral but deeply political, shaped by the systems and individuals involved (Mattern, 2023). In weather science, for example, the ‘cone of uncertainty’ is a visual tool that communicates not certainty, but the probabilistic nature of atmospheric forecasting. Counter-modeling embraces this uncertainty; it becomes not only a form of critique but a speculative gesture—one that refuses the optimization logic embedded in most predictive systems. It privileges ambiguity over resolution and variability over fixed outcomes, foregrounding outliers rather than smoothing them away. This gesture does not aim to fix models but to reorient

integrada en la mayoría de los sistemas predictivos. Privilegia la ambigüedad sobre la resolución, así como la variabilidad sobre los resultados fijos, poniendo en primer plano los valores atípicos en lugar de atenuarlos. Este gesto no pretende arreglar los modelos, sino reorientarlos hacia la opacidad, la parcialidad y las anomalías. Resiste la fluidez cinematográfica de los modelos sintéticos: en lugar de reforzar la autoridad de las simulaciones de alta resolución, reelabora la imagen como un sitio de disrupción (a través de la pixelación, el *dropout*, los retrasos o la codificación no visual).

En estas formas de medios distribuidos, los datos no se convierten únicamente en información, sino también en material: algo que se configura, se retiene o distorsiona para exponer nuevas gramáticas atmosféricas y resistir la captura predictiva. Algo que busca descubrir nuevas formas de conocimiento y prácticas de datos que desafíen las perspectivas deterministas (Haraway, 1988). Sin embargo, la incertidumbre —matemática y científicamente— no es un vacío: es una medida de lo que sabemos. A medida que los sistemas computacionales se expanden, no eliminan la incertidumbre. En cambio, agudizan sus contornos, revelando con creciente claridad la magnitud de lo que sigue siendo desconocido e impredecible. **m**

them—toward opacity, partiality, and anomalies. It resists the cinematic fluidity of synthetic models; rather than reinforcing the authority of high-resolution simulations, it reworks the image as a site of disruption—through pixelation, dropout, delay, or non-visual encoding.

In these distributed media forms, data becomes not merely information but material: something shaped, withheld, or distorted to expose new atmospheric grammars and resist predictive capture. It seeks to uncover new forms of knowledge and data practices that challenge deterministic perspectives (Haraway, 1988). Yet uncertainty—mathematically and scientifically—is not a void; it is a measure of what we know. As computational systems expand, they do not eliminate uncertainty. Instead, they sharpen its contours, revealing with increasing clarity the extent of what remains unknown and unpredictable. **m**

REFERENCIAS REFERENCES

- AMOORE, L. (2020). *Cloud Ethics: Algorithms and the Attributes of Ourselves and Others*. Duke University Press.
- BENISH, S. E., REID, G. H., DESHPANDE, A., RAVAN, S., & LAMB, R. (2020). The Impact of Emerging 5G Technology on U.S. Weather Prediction. *Journal of Science Policy & Governance*, 17(2). <https://doi.org/10.38126/JSPG170203>
- BLUM, A. (2019). *The Weather Machine: How We See Into the Future*. Bodley Head.
- BRATTON, B. H. (2016). *The Stack: On Software and Sovereignty*. MIT Press.
- BRIDLE, J. (2018). *New Dark Age: Technology and the End of the Future*. Verso.
- COEN, D. R. (2018). *Climate in Motion: Science, Empire, and the Problem of Scale*. University of Chicago Press.
- DASTON, L. (2016). Cloud Physiognomy. *Representations*, 135, 45–71.
- EASTERLING, K. (2014). *Extrastatecraft: The Power of Infrastructure Space*. Verso.
- EDWARDS, P. N. (2010). *A Vast Machine: Computer Models, Climate Data, and the Politics of Global Warming*. MIT Press.
- EDWARDS, P. N., BOWKER, G., JACKSON, S., & WILLIAMS, R. (2009). Introduction: An Agenda for Infrastructure Studies. *Journal of the Association for Information Systems*, 10(5). <https://doi.org/10.17705/1jais.00200>
- FULLER, M., & WEIZMAN, E. (2021). *Investigative Aesthetics: Conflicts and Commons in the Politics of Truth*. Verso.
- GRIER, D. A. (2005). *When Computers Were Human*. Princeton University Press.
- GRIFFITHS, C. (2023). Unmodelled: In the Blindspot of AI Infrastructure. *Gradient Journal*. <https://gradient-journal.net/articles/unmodelled-in-the-blindspot-of-ai-infrastructure>
- HARAWAY, D. J. (1988). Situated Knowledges: The Science Question in Feminism and the Privilege of Partial Perspective. *Feminist Studies*, 14(3), Article 3. <https://doi.org/10.2307/3178066>
- LATOUR, B. (2017). *Facing Gaia: Eight Lectures on the New Climatic Regime* (C. Porter, Trans.). Polity.
- MACCORMACK, P. (2020). *The Ahuman Manifesto: Activism for the End of the Anthropocene*. Bloomsbury.
- MATTERN, S. (2023). Modeling Doubt: A Speculative Syllabus. *Journal of Visual Culture*, 22(2), 125–145. <https://doi.org/10.1177/14704129231184553>
- PARKS, L. (2018). *Rethinking Media Coverage: Vertical Mediation and the War on Terror*. Routledge.
- PETERS, J. D. (2015). *The Marvelous Clouds: Toward a Philosophy of Elemental Media*. University of Chicago Press.
- RICHARDSON, L. F. (1922). *Weather Prediction by Numerical Process*. Cambridge University Press.
- ROCKMORE, D. (2024, January 15). How Much of the World Is it Possible to Model? *The New Yorker*. <https://www.newyorker.com/culture/annals-of-inquiry/how-much-of-the-world-is-it-possible-to-model>
- RUSSELL, L. (2020). *Glitch Feminism: A Manifesto*. Verso.
- WIENER, N. (1948). *Cybernetics Or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Hermann & Cie.
- WILSON, G. F. (1999). *Meteorology: A History of Weather and Climate*. Routledge