

Pronóstico meteorológico

Año 13 | N° 7 | Enero 2021
ISSN papel: 0539-4716
ISSN en línea: 2591-4812

El sueño de uno, la realidad de todos

Los inicios del pronóstico
P.06

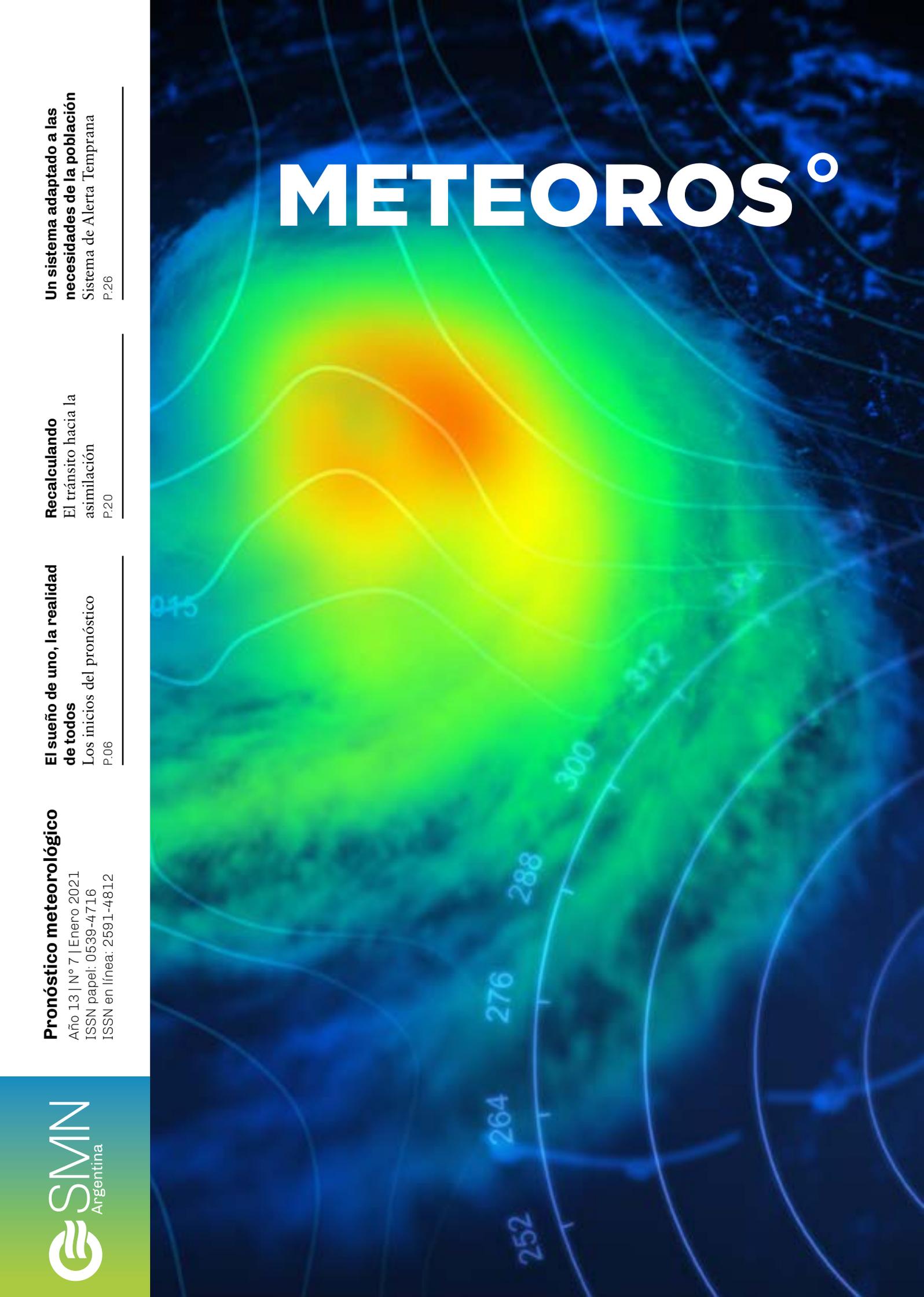
Recalculando

El tránsito hacia la
asimilación
P.20

Un sistema adaptado a las necesidades de la población

Sistema de Alerta Temprana
P.26

METEOROS^o



STAFF

AUTORIDADES

Directora del Servicio Meteorológico Nacional

Dra. Celeste Saulo

Edición General

Mariela de Diego

Valentina Rabanal

Comité Editorial

Laura Aldeco

Maria Eugenia Bontempì

Julia Chasco

Carolina Cerrudo

Mariela de Diego

Ramón de Elia

Cindy Fernández

Valentina Rabanal

Maria Alejandra Salles

Luciano Vidal

Diseño

Sebastián Carrasco

Nicolás Glikson

Guadalupe Cruz Díaz

Fotografía

Agustina Sánchez

Productos

P.26 Un sistema de alerta adaptado a las necesidades de la población

Los SAT proveen datos claves para la toma de decisión no solo del público en general, sino también de los sectores productivos y los gobiernos que deben proteger a la población, los bienes y el medio ambiente de posibles consecuencias adversas.

P.32 Pronóstico a 7 días

Desde hace años, el pronóstico del tiempo despierta gran interés en diversos sectores de la sociedad. Pero, ¿qué información nos brinda?

P.36 Pronóstico semanal con la técnica de análogos

Los análogos permiten, a partir de una base de datos de más de 30 años, conocer el comportamiento de la temperatura y la precipitación a un plazo conocido como escala subestacional.

P.40 Entre el tiempo y el clima

El pronóstico estacional, aquel que prevé el comportamiento de la atmósfera para un periodo largo de tiempo, junto con el consenso de los expertos, es de gran importancia para múltiples sectores.



P.10

Mirá el cielo y decime qué va a pasar

Los modelos numéricos, programas que simulan nuestra atmósfera, agilizaron y simplificaron la tarea de pronosticar un estado futuro a partir de condiciones actuales. Pero su funcionamiento es tan complejo como las ecuaciones que resuelve.

P.20

Recalculando: el tránsito hacia la asimilación

Uno de los desafíos más grandes de la meteorología argentina es lograr incorporar a los modelos numéricos los últimos datos observados disponibles. Aquí, una aproximación al desafío.

P.45

Hacelo vos mismo. Termómetro de pipeta

P.16

Control vs. caos

La atmósfera es un sistema caótico: pequeñas diferencias en el estado inicial pueden derivar en condiciones muy diferentes en el futuro.

P.46

Infografía. HPC: la máquina de hacer pronósticos

P.06

El sueño de uno, la realidad de todos

El pronóstico meteorológico fue un reto desde que se postularon las primeras ecuaciones que explican el comportamiento de la atmósfera. Hoy, no solo es un hecho sino que es un servicio necesario para la sociedad.

P.24

Infografía. El ciclo de pronóstico



Editorial Celeste Saulo

El pronóstico del tiempo es, quizás, una de las cuestiones que más tempranamente ha preocupado a las civilizaciones de todas las épocas, junto con la búsqueda por cubrir las necesidades básicas de garantizar refugio y alimento a sus comunidades. Y si lo pensamos bien, tiene mucho sentido, porque el estado del tiempo y, en especial, sus expresiones más extremas (frío, calor, tormentas, sequías) ponen en riesgo cuestiones elementales de la supervivencia. Eso se exagera cuando los individuos se encuentran más expuestos y menos preparados para soportar los impactos de esos eventos extremos. Hoy sabemos que, tan importantes como la magnitud de la amenaza natural (por ejemplo, la cantidad e intensidad de la lluvia) son la vulnerabilidad y la exposición, todo lo cual explica el riesgo que representan esos fenómenos para una población dada. Por eso, en este número hemos tratado de presentar esa complejidad que trasciende la de una disciplina individual como la meteorología, para sumergirse en el terreno de lo social, lo económico, lo comunicacional.

Con el paso de los siglos y, más específicamente, desde mediados del siglo pasado, la ciencia ha logrado enormes avances en materia de pronósticos, como podrán descubrir a lo largo de esta Meteoros. No obstante, los pronósticos y la mejora continua de su calidad siguen presentando grandes desafíos, no sólo en términos científico-tecnológicos sino también en relación con la búsqueda de utilizarlos apropiadamente para minimizar los daños y pérdidas asociados a los eventos de tiempo más severos. Una de las preguntas que surgen es: ¿por qué, si la ciencia produce hoy en día mejores pronósticos que hace 10, 20 o 50 años atrás, las pérdidas humanas y económicas se han incrementado? Una posible respuesta es reconocer que aspectos como la inequidad y la falta de acceso a la infraestructura y a viviendas apropiadas, hacen que haya millones de personas que resultan extremadamente vulnerables a condiciones meteorológicas extremas. Así, ante una tormenta severa, o una ola de calor, una inundación u otro fenómeno semejante, las poblaciones más humildes se verán mucho más afectadas, pudiendo sufrir daños en sus casas, en la actividad que realizan para su subsistencia e inclusive perder sus vidas. De ahí que sea tan importante pensar en los sistemas de alerta temprana como la herramienta más valiosa para acompañar la toma de decisión ante un posible evento de alto impacto. Ciencia al servicio de la prevención y de la anticipación.

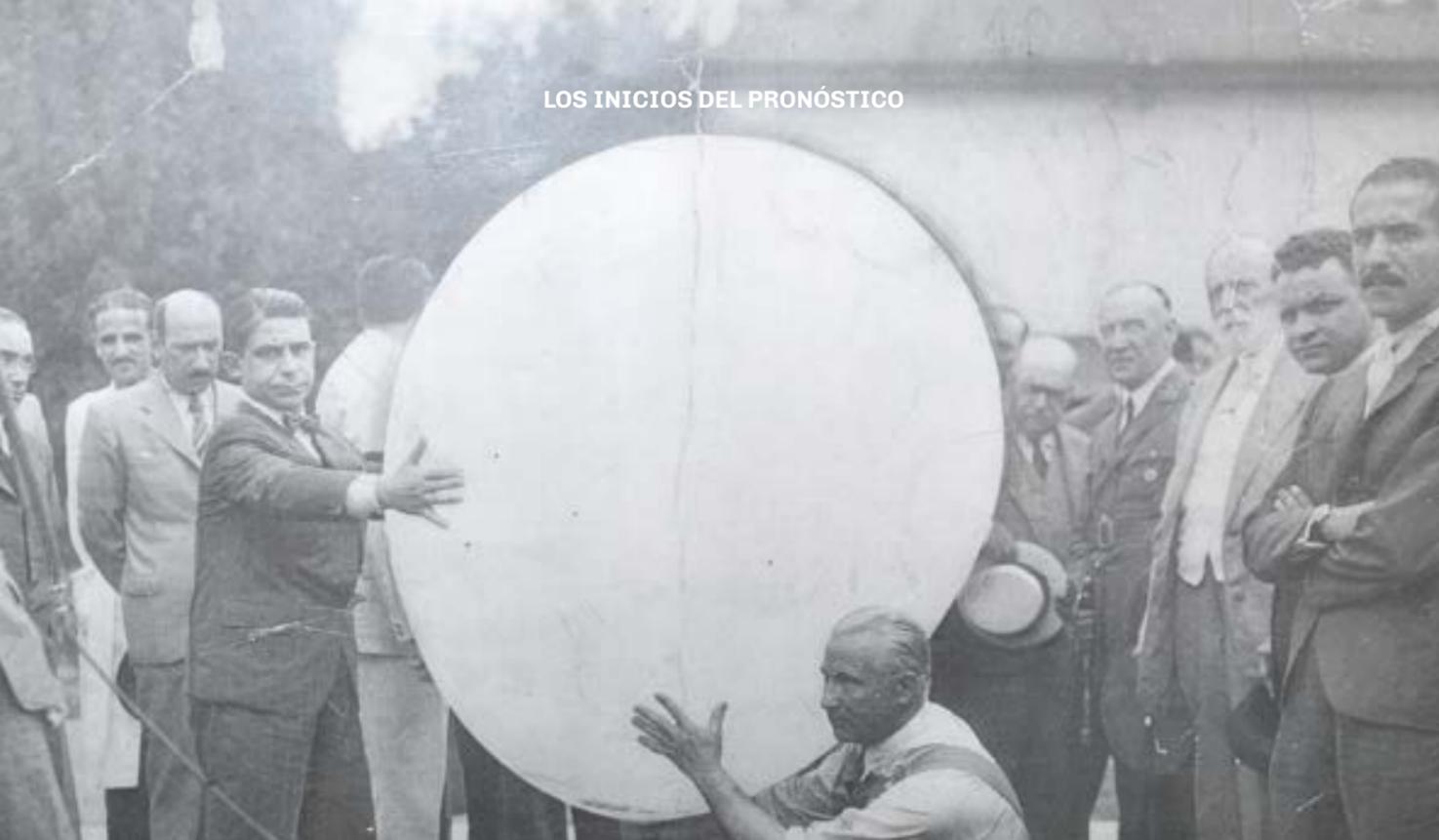
Este número de Meteoros busca, además, acompañar a quienes lean sus artículos a descubrir la diversidad de pronósticos que hoy se encuentran en internet, redes sociales y medios de comunicación. Como siempre, el acento está puesto en los productos que genera el Servicio Meteorológico Nacional, para que nuestros lectores puedan hacer un mejor uso de esta información. Sabemos que tenemos una enorme responsabilidad como voz oficial para la provisión de pronósticos y alertas en todo el país. Y es importante que, a la hora de utilizar información, la sociedad pueda elegir la fuente, valorar la rigurosidad y comprender las

limitaciones de las distintas técnicas. No existen los pronósticos perfectos. Tampoco existen los datos perfectos. La ciencia es muy clara a la hora de describir a los procesos que ocurren en la atmósfera como algo intrínsecamente caótico e impredecible. Consecuentemente, sólo podemos intentar acercarnos lo más posible a determinar cuál será el estado futuro de la atmósfera en una localidad o a caracterizar un estado presente. Acercarnos lo más posible indica que habrá un error. Y tan importante como la predicción de ese estado futuro, es la predicción del error con que podemos describirlo. Parece un juego de palabras, pero no lo es. Hay estados de la atmósfera más predictibles que otros. Por lo tanto, aunque sea incómodo, es mejor saber que tenemos un 40 a 70 % de probabilidad de que llueva en Catamarca dentro de 4 días en lugar de que nos digan “va a llover en Catamarca dentro de 4 días”. ¿Por qué? Porque debemos asumir que ningún sistema de pronóstico, ni el mejor del mundo, tiene un 100 % de certeza respecto de la ocurrencia de ese fenómeno. Si tal aseveración es manifestada por cualquier proveedor de pronósticos, entonces debemos dudar del profesionalismo de ese proveedor.

Por lo que describí, nosotros, desde el Servicio Meteorológico Nacional, decidimos dedicar este número de Meteoros al pronóstico, a los distintos tipos de pronósticos que se emplean en escalas de tiempo más cortas (diarias) o más largas (semanales, mensuales, estacionales), a los sistemas de alerta temprana, a la comunicación. Porque entendemos que hay mucha información disponible pero sabemos que no toda es igualmente confiable. Y también contamos con que nuestros lectores y lectoras gusten de fomentar el pensamiento crítico y el debate abierto respecto de lo que no podemos describir ni pronosticar con certeza. Eso define el estado del arte de la ciencia y es el límite que tenemos que poner en común.

Pero, volviendo al inicio de este editorial, deseo transmitir un mensaje que seguramente develarán al recorrer esta revista. Podemos aspirar a tener pronósticos “casi” perfectos, datos “casi” perfectos enmarcados en el avance continuo científico y tecnológico. Pero si esta información no llega a la sociedad y a su vez esa sociedad no la utiliza para tomar mejores decisiones, entonces todo el esfuerzo de generar mejores pronósticos e información, queda casi sin efecto, pierde valor. Por eso, los invitamos a que nos ayuden a concretar nuestra visión que es la de trabajar para lograr: “Una sociedad bien informada sobre el tiempo y el clima que pueda tomar decisiones basadas en el conocimiento de los riesgos y del cambio climático, contribuyendo al desarrollo sostenible”. ¡Gracias por acompañarnos!

Dra. Celeste Saulo
Directora del Servicio Meteorológico Nacional
Profesora Asociada de la Universidad de Buenos Aires
Investigadora Independiente CONICET
Vicepresidente 1ra de la Organización Meteorológica Mundial



EL SUEÑO DE UNO, LA REALIDAD DE TODOS

El pronóstico meteorológico fue un reto desde que se postularon las primeras ecuaciones que explican el comportamiento de la atmósfera. Si bien los primeros intentos para pronosticar fueron fallidos, gracias al avance científico y tecnológico, predecir el estado futuro de la atmósfera hoy no sólo es un hecho sino también un servicio necesario para la sociedad y los tomadores de decisiones.

Por Laura Aldeco

Pronosticar el comportamiento futuro de la atmósfera nunca fue una tarea fácil. La atmósfera tiene sus propias leyes y responde a la física que está expresada en **ecuaciones matemáticas muy complejas**. Estas ecuaciones son las que describen su comportamiento, pero no tienen solución analítica; esto quiere decir que para poder resolverlas es necesario simplificarlas o realizar aproximaciones.

Los inicios

El primero en darse cuenta de esto, a principios del siglo XX, fue Vilhelm Bjerknes, un meteorólogo noruego que desarrolló las ecuaciones de movimiento de la atmósfera que se siguen utilizando hasta el día de hoy. Planteó que para poder realizar un pronóstico era necesario conocer el estado actual de la atmósfera con la mayor precisión posible, ya que para resolver las ecuaciones en un tiempo futuro era necesario “alimentarlas” con **datos observados del tiempo presente**.

Unos años más tarde, el meteorólogo inglés Lewis Fry Richardson tomó la posta que dejó Bjerknes e intentó realizar un pronóstico del tiempo utilizando las ecuaciones planteadas por el noruego, con algunas aproximaciones e introduciendo un método numérico para poder resolverlas analíticamente. Luego, publicó los resultados que obtuvo al hacer manualmente un pronóstico a 6 horas para una región de Francia. El resultado fue poco alentador, ya que por un lado tardó varias semanas en obtenerlo y, por otro lado, sus conclusiones fueron poco realistas.

Richardson planteó que para poder realizar un pronóstico en plazos útiles (porque si un humano tarda semanas para obtener un pronóstico a 6 horas, resultaría totalmente inútil, pues el plazo ya habría pasado) se necesitaría lo que él llamó una “fábrica del tiempo”. Esto es, nada más y nada menos que unas 64 mil personas resolviendo en simultáneo y de forma sincronizada las ecuaciones mencionadas para poder hacerlo con mayor rapidez que la evolución de la atmósfera.

Claramente esto no era realizable, y él lo tenía claro, por eso dejó asentado en su libro de 1922: “quizás algún

día en el futuro (...) será posible avanzar en los cálculos más rápidamente de lo que avanzan las condiciones meteorológicas (...). Pero eso es un sueño”.

Durante las décadas siguientes se inventaron los radiosondas, que permitieron obtener mediciones de la atmósfera en altura, y se desarrollaron las primeras computadoras que garantizaban cálculos en menores tiempos que un humano. Utilizando este avance en las observaciones y en la tecnología, Jule Charney, un meteorólogo estadounidense, junto a un equipo de investigadores, retomaron el problema del pronóstico meteorológico. Para este intento propusieron una **simplificación del sistema de ecuaciones de la atmósfera** para utilizar menos recursos computacionales, y así obtuvieron el primer pronóstico a 24 horas en 1950.

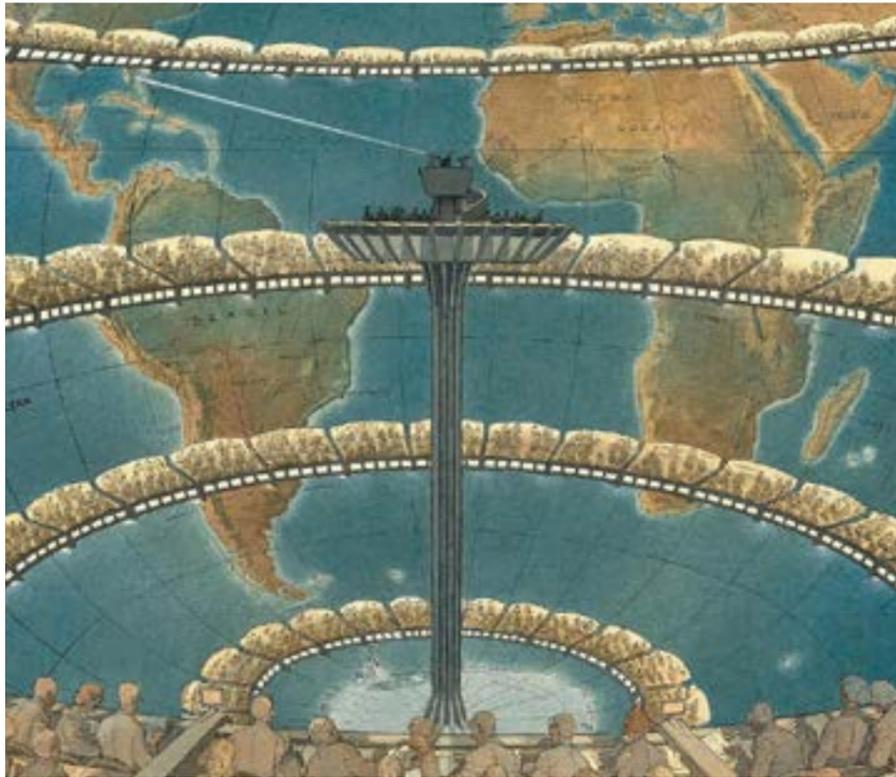
El éxito de dicho pronóstico motivó a que se continuase con estos experimentos en otras partes del mundo, probando diferentes tipos de aproximaciones o simplificaciones, hasta que en 1954 bajo la dirección del meteorólogo estadounidense de origen sueco Carl-Gustaf Rossby, el Servicio Meteorológico de Suecia puso en práctica el primer pronóstico operativo, seguido por Estados Unidos unos meses más tarde. El sueño de Richardson se había cumplido y nacían así los primeros modelos numéricos de predicción del tiempo, pero ¿qué es un modelo numérico?

Modelando la atmósfera

Un modelo numérico de predicción del tiempo es un software de computación que es capaz de resolver las ecuaciones físicas que rigen los movimientos de la atmósfera en tiempos en los que un humano no podría. Puede simular, dadas las observaciones meteorológicas de un día, la **evolución de la atmósfera en las próximas horas, días o incluso meses**. Como pudo comprobar Richardson, la resolución matemática de las ecuaciones mencionadas resultaría inútil si se hiciesen los cálculos manualmente y muy engorrosa si no se realizaran aproximaciones.

Las aproximaciones consisten en asumir determinados valores de algunas variables en algunos casos, o asumir determinados comportamientos de la atmósfera en otros, los cuales no siempre se cumplen o, simplemente, no se conocen. Esta forma de simplificar el sistema de ecuaciones, imperfecta pero necesaria, sumada a la naturaleza caótica de la atmósfera traen aparejados errores que se trasladan al pronóstico, lo cual implica una limitación, tanto en el plazo de validez del pronóstico como en la calidad del mismo.

Si bien los primeros pronósticos se realizaban para áreas pequeñas, o sólo para el hemisferio norte, a medida que avanzaba la tecnología y la capacidad de cómputo, se pudo



Ilustración

Interpretación artística de la “fábrica del tiempo” imaginada por Richardson, con miles de personas realizando los cálculos necesarios para obtener un pronóstico en tiempo y forma. Cada calculador humano resolvería las cuentas para una región del globo, mientras que la torre central coordinaría y recolectaría la información de cada sector. (Fuente: Francois Schuiten, 2000).

lograr el primer pronóstico para toda la Tierra, utilizando un modelo numérico global. El mismo fue implementado en el año 1965 por Joseph Smagorinsky y su equipo del Laboratorio Geofísico de Dinámica de Fluidos (GFDL, por sus siglas en inglés) de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA), de Estados Unidos. A fines de la década del 60, en el GFDL se desarrollaron los primeros modelos numéricos globales acoplados con el océano, lo que permitió no solo simular el tiempo, sino también el clima en interacción con fenómenos como El Niño/La Niña, entre otros.

Por otro lado, para intentar reducir los errores aparecieron los primeros pronósticos por conjunto o ensambles, que se empezaron a realizar de forma cuasi-operativa en 1985 en la oficina Meteorológica del Reino Unido (MetOffice, por su nombre en inglés) a plazos mensuales. Unos años más tarde, en 1992, el Centro Europeo de Pronósticos de Mediano Plazo (ECMWF, por sus siglas en inglés) comenzó a generar pronósticos por conjunto operativos en el corto y mediano plazo, casi al mismo tiempo que el Centro Nacional de Predicción Ambiental (NCEP) de la NOAA. Si bien llevó varios años implementarlo para el resto de los países por el alto costo computacional, hoy en día todos los centros globales utilizan este tipo de pronóstico de forma operativa.

La calidad de los pronósticos numéricos también fue mejorando a medida que aumentaba la cantidad y la calidad de las observaciones. Así como la aparición de los radiosondeos produjo un avance del modelado numérico, la era satelital en los 70 fue otro hito que permitió obtener conocimiento de regiones remotas del globo y de los océanos, lo cual se tradujo en un gran salto en la evolución

del pronóstico numérico del tiempo. Por eso, la mejora de los modelos numéricos operativos se vincula no solo con un mayor conocimiento de los procesos físicos que controlan el comportamiento de la atmósfera a través de las observaciones, sino también con el desarrollo tecnológico.

¿Y en Argentina?

En nuestro país, gracias a la adquisición de “Clementina”, la primera computadora que se utilizó con fines científicos en la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires (UBA), se pudieron hacer los primeros experimentos en modelado numérico de la atmósfera hacia finales de los 60. Los primeros modelos desarrollados localmente eran muy simplificados debido a que la tecnología computacional de esa época imponía una limitación en la capacidad de cómputo.

Durante las décadas del 70 y el 80, los investigadores de diferentes organismos continuaron desarrollando modelos numéricos o bien realizando pruebas con los ajustes necesarios para un mejor desempeño sobre nuestra región. Por ejemplo, la inclusión de la cordillera de los Andes en un modelo numérico no era una cuestión sencilla, ya que suelen tener problemas en representar bien las regiones montañosas. Tal es así que hasta el día de hoy no existe un modelo numérico que represente las cadenas montañosas de forma exacta, por lo cual se continúan realizando esfuerzos para mejorar en este aspecto. Lo de la cordillera es sólo un ejemplo de las complicaciones que existen

y es necesario abordar; lo mismo pasa con diversos fenómenos meteorológicos como por ejemplo la correcta representación de las nubes y la física dentro de ellas, la posición de algunos sistemas como ciclones o anticiclones y ni hablar de los errores en el pronóstico de la precipitación, la variable más compleja de esta ciencia.

Tanto en el Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (DCAO) de la UBA, el Centro de Investigación del Mar y la Atmósfera (CIMA) como en el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), se continuó trabajando en el modelado numérico. A través de los años, se lograron continuos avances como por ejemplo la implementación de modelos regionales entre los 80 y 90 en el CIMA, o la implementación en el SMN del primer pronóstico numérico operativo, a 24 horas, en 1986. Con los años, los modelos numéricos se fueron reemplazando a medida que iban mejorando, como por ejemplo el modelo ETA-SMN, que comenzó a utilizarse en el año 2003. En aquel momento, ese era un modelo conveniente para regiones con topografía abrupta como la cordillera de los Andes.

En el año 2005 el CIMA comenzó a utilizar el modelo regional de Investigación y Pronóstico Meteorológico (WRF, por su nombre en inglés), mientras que en el SMN dicho modelo se implementó a partir de 2012 en modo experimental. En 2017 pasó a fase operativa y al año siguiente, con la adquisición de un equipo de cómputo de alto rendimiento (HPC) se pudieron realizar las primeras pruebas de pronósticos por ensambles con el modelo WRF en el SMN. En octubre de 2019, estos pronósticos por conjuntos pasaron a fase operativa y están disponibles en la web de dicho organismo.

Hoy en día es difícil pensar en un pronóstico meteorológico sin pensar en un modelo numérico. Pero para llegar al estado del arte actual del pronóstico tuvo que correr mucha agua bajo el puente, ya que implicó numerosos esfuerzos, investigaciones y pruebas y errores durante décadas. No obstante, consideramos que para realizar un pronóstico de calidad es fundamental la presencia de pronosticadores, entrenados en reconocer los errores sistemáticos y en interpretar las salidas de los modelos. Nuestro país tiene un recorrido en cuanto al desarrollo e implementación de modelos numéricos cada vez más complejos y es un camino que seguimos transitando. °

Fuentes consultadas:

Kalnay, E. (2003), Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability. Cambridge University Press, 341 pp.

Meteoros 2012, año 6, número 1. Repositorio Institucional del SMN (<http://hdl.handle.net/20.500.12160/1101>)

Palmer, T. (2018), The ECMWF ensemble prediction system: Looking back (more than) 25 years and projecting forward 25 years. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society.

Richardson, L. F. (1922: *Weather prediction by numerical process*. Cambridge University Press. (<https://archive.org/details/weatherpredictio00richrich/page/n8/mode/2up>)

GRACIAS A LA ADQUISICIÓN DE “CLEMENTINA”, LA PRIMERA COMPUTADORA QUE SE UTILIZÓ CON FINES CIENTÍFICOS EN LA FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES DE LA UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES (UBA), SE PUDIERON HACER LOS PRIMEROS EXPERIMENTOS EN MODELADO NUMÉRICO DE LA ATMÓSFERA HACIA FINALES DE LOS 60.

MIRÁ EL CIELO Y DECIME QUÉ VA A PASAR

La meteorología podría considerarse una de las profesiones más antiguas. Los primeros humanos observaron patrones en el clima y aprendieron a anticiparse a los cambios que afectaban el suministro de alimentos y su bienestar. Crearon nombres para las estaciones y calendarios para guiar sus andanzas o los ciclos de sus cultivos. El reconocimiento de patrones fue la forma de anticiparse a los cambios en el tiempo durante miles de años. Pero, al igual que el ser humano, la forma de pronosticar evolucionó. Y la tecnología fue esencial.

Por Cindy Fernández



Fotografía gentileza Ruben Digilio - Diario Clarín

La sociedad tiene su fantasía de lo que es la meteorología: cree que el especialista es capaz de realizar un pronóstico de temperaturas máximas de la semana o de los milímetros de lluvias que pueden darse en los próximos días con tan solo mirar el cielo o chuparse el dedo y levantarlo al aire. Quizás, estas creencias vengan del origen de la palabra meteorología, ya que *meteoron* en griego significa “alto en el cielo”, aunque no hay dudas de que Hollywood logró inmortalizar esta creencia popular en la clásica película *Twister*.

Pero el meteorólogo moderno dista mucho de mirar el cielo, al menos no directamente. Y lejos del glamour de los presentadores de TV o de la adrenalina de perseguir un poderoso tornado en días tormentosos, la mayoría de ellos pasan horas y horas frente a las pantallas de computadoras interpretando números y mapas.

Modelos que modelan

En la jerga profesional frecuentemente hacemos mención al “modelo”, no por ser fanáticos de la moda y la ropa de diseño, sino que estamos hablando de nuestra arma secreta: los modelos numéricos del tiempo o meteorológicos, que no hacen modelaje sino que modelan la atmósfera. Dicho de otra forma, son programas de computadoras que simulan,

en la máquina, ya sea en gráficos o como un conjunto de números, una atmósfera ficticia que muestra el posible comportamiento de la real.

Para entender cómo surgieron los pronósticos actuales tenemos que viajar casi cien años en el pasado, alrededor de 1904. En ese tiempo, el físico y meteorólogo noruego Vilhelm Bjerknes (1862-1951) entendió que, con suficiente información sobre el estado actual de la atmósfera, los científicos podían usar fórmulas matemáticas -específicamente las leyes de la dinámica y la termodinámica de fluidos- para predecir patrones o comportamientos futuros.

Bjerknes creía que, así como existía una ecuación de movimiento rectilíneo uniformemente variado (M.R.U.V.) para describir la trayectoria de una pelota en caída libre, tenía que existir una para describir el comportamiento del aire.

La idea era genial pero resolver esas ecuaciones no sería para nada sencillo y, como él mismo lo reconoció, la dificultad de este problema estaba en la necesidad de tener que trabajar con un sistema de ecuaciones de derivadas parciales no lineales para las que no se dispone de soluciones analíticas.



Fotografía gentileza Ruben Digilio - Diario Clarín

Más tarde, el científico británico Lewis Fray Richardson (1881-1953), retomó la resolución de las ecuaciones de Bjerknæs con un nuevo método aritmético que simplificaba algunas cuentas: diferencias finitas. También realizó un experimento para probar su teoría. El británico aprovechó sus viajes por toda Francia como conductor de ambulancias durante la Primera Guerra Mundial para recopilar un amplio conjunto de datos meteorológicos de un día concreto (20 de mayo de 1910). Con estos datos tenía la información para conocer la situación de la atmósfera de ese día. Solo tendría que resolver las ecuaciones para saber el estado futuro. Luego de miles de sumas, restas y multiplicaciones resolvió el pronóstico de la presión a seis horas...seis semanas más tarde. No sólo el pronóstico fue obsoleto, sino que tampoco se cumplió.

Lejos de desanimarse, Richardson publicó sus trabajos en el libro titulado *Predicción del Tiempo a través de Procesos Numéricos*, donde también hizo algunas observaciones sobre la imposibilidad de realizar su pronóstico numérico:

"...harían falta 64 mil personas trabajando por turnos para prever el estado de la atmósfera con mayor rapidez que la de su evolución real".

En sus publicaciones, Richardson imaginó un futuro como una fábrica de predicciones meteorológicas formada por miles de calculadores humanos trabajando de forma sincronizada bajo la dirección de un responsable, encargado de la buena marcha de las operaciones. Lo que no pudo prever fue el avance de la tecnología y el aparato que se iba a inventar 25 años más tarde, que iba a hacer el trabajo de esas 64 mil personas en cuestión de minutos: la computadora.

Hagamos la cuenta

Es fácil perderse mirando las corrientes arremolinadas en un jacuzzi. Si está apagado, sólo es una bañera llena de agua caliente. Pero, ¿qué sucede cuando encendemos los chorros o ajustamos el termostato? ¿Cómo cambian las corrientes cuando decidimos darnos un chapuzón? Los chorros del jacuzzi dan vida a las aguas cada vez más turbulentas, el aumento de la temperatura crea más vapor y los cuerpos fuerzan nuevas corrientes. **Varias causas competitivas y aleatorias crean un sistema completo y complejo** de efectos.

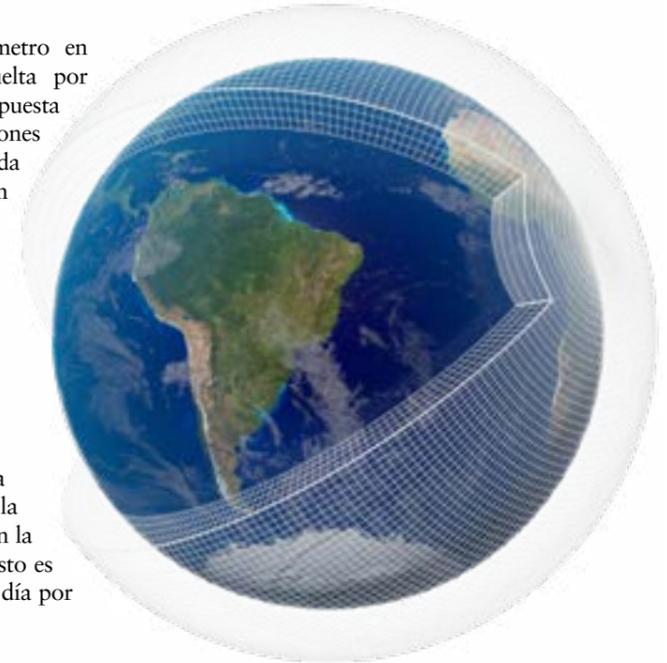
Ahora imaginemos que el jacuzzi está lleno con 5,5 billones de toneladas de gas y es perturbado por factores como la gravedad, la radiación solar, la radiación terrestre, la topografía, los seres vivos, las construcciones y la civilización humana. Este jacuzzi es la atmósfera de la Tierra, un cuerpo vasto y gaseoso tan complicado que parece poseer un movimiento completamente aleatorio.

Sin embargo, entre todo ese caos, la atmósfera rebelde se adhiere a leyes físicas definidas y sigue patrones establecidos, lo que nos permite representarla a través de ecuaciones y hacer suposiciones -bastante aceptables- sobre cómo se comportará en el futuro.

"Sobre la Dificultad del Pronóstico del Tiempo"

Bob Ryan, Boletín de la Sociedad Estadounidense de Meteorología, 1982.

Imagine una esfera de 12.800 km de diámetro en rotación, con una superficie irregular, envuelta por una capa gaseosa de 40 km de espesor, compuesta de diferentes compuestos cuyas concentraciones varían espacial y temporalmente, y es calentada por un reactor nuclear a 150 millones de km de distancia. Imagine también que esta esfera orbita alrededor del reactor nuclear y algunas regiones son calentadas durante una parte de la revolución y otras localidades se calientan en otro momento. E imagine que la mezcla de gases continuamente recibe estímulos desde la superficie, generalmente en forma calmada pero a veces de manera violenta y con inyecciones de energía altamente localizadas. Luego, imagine que usted vive en esa capa gaseosa y que está expectante de conocer la predicción del estado atmosférico de un lugar en la esfera para uno, dos o más días en el futuro. Esto es esencialmente el desafío que se encuentra día a día por un pronosticador del tiempo.



Pero aún hoy, con todos los avances de la tecnología, el aumento exponencial en la velocidad para hacer cálculos y el conocimiento cada vez más profundo de la atmósfera, las ecuaciones siguen sin ser perfectas y tienen limitaciones. Como dijimos, **describen procesos atmosféricos que son extremadamente complejos y caóticos usando simplificaciones**, lo que proporciona una solución que se aproxima -en la mayoría de los casos muy bien- a la realidad, pero que no llega a describirla completamente.

Otra limitación que tienen los modelos es la incapacidad del ser humano para determinar con exactitud el estado inicial. Tenemos que incorporar a la computadora toda la información posible sobre el estado de la atmósfera en el instante inicial para que sepa de dónde partir con los cálculos y pueda calcular su evolución. Para eso, se utilizan todas las observaciones atmosféricas disponibles, como los datos de superficie, de boyas, de aviones, de sondeos y hasta de satélites. Y aún con todos estos datos, es imposible incorporar información sobre cada centímetro cúbico de aire.

¿En cuántos cubos se puede dividir la atmósfera?

En todos los que queramos, pero nada es gratis. De hecho, esto es lo que hace el modelo para poder resolver esas ecuaciones: divide a toda la atmósfera en una malla tridimensional y resuelve las cuentas solo en los vértices de los cubos. El tamaño de esas grillas determina la resolución del modelo. Cuantos más cubos tengamos, mejor será la resolución del modelo numérico y permitirá detectar fenómenos de escala espacial más pequeña.



Los modelos numéricos mejoraron enormemente durante los últimos 20 años y se convirtieron en una herramienta fundamental para el pronóstico del tiempo. Hoy no se concibe un servicio meteorológico que no maneje los resultados de varios modelos numéricos para su trabajo rutinario.

En la práctica, tener un modelo de baja o de alta resolución es análogo a ver una foto en baja o alta calidad. Cuanto más pixeles (puntos con el mismo valor) tenga la imagen, más detalles veremos. Pero en el caso del modelo, mayor cantidad de cubos implica más vértices, entonces a mayor resolución mayor poder computacional necesitaremos, ya que la cantidad de cuentas aumenta. Y el tiempo que lleva finalizar ese pronóstico también.

Nada puede "malir sal"

Existe una gran variedad de modelos, cada uno con sus ventajas e inconvenientes. Como norma general, **cuanto más preciso queramos el resultado, más cálculos habrá que hacer y, por lo tanto, más tiempo tardará en ejecutarse.**

Para que una predicción tenga sentido se debe poder hacer en un plazo de tiempo relativamente corto. La mayoría de las veces un pronóstico meteorológico es una verdadera carrera contra el reloj, pues de nada sirve calcular con gran precisión el tiempo que hará mañana si para ese cálculo se necesitan más de 24 horas.

Cada modelo es una excelente herramienta para pronosticar, pero todos tienen limitaciones que es necesario conocer. Mencionamos el problema de la resolución y de las ecuaciones, a las que se les realiza una serie de aproximaciones para simplificar cálculos. También que necesitan alimentarse de datos de las variables meteorológicas observadas sobre todo el planeta, y la cobertura de registros es muy escasa en los océanos y en regiones poco pobladas o de escaso desarrollo. La disponibilidad de datos en el hemisferio sur,

dominado por el inmenso océano Pacífico, es muy inferior a la del hemisferio norte, y en los polos es casi inexistente.

Pero, allí donde hay datos, la observación de las variables también es un problema, ya que su medición nunca es suficientemente precisa porque **los instrumentos y los propios procedimientos para medir pueden no ser perfectos.** Es imposible, por ejemplo, medir la temperatura del aire con centésimas de grado. Aún si tuviéramos las computadoras más potentes del universo y aumentamos exponencialmente la cantidad de observaciones, queda el problema del redondeo de los datos. En un pronóstico a varios días, usar tres, ocho o 20 decimales para indicar las condiciones iniciales puede llevar a pronósticos completamente distintos. Diferencias de milésimas de grado al inicio de un ciclo de pronóstico, conducen a situaciones meteorológicas muy distintas transcurridas una o dos semanas de pronóstico.

Los modelos numéricos **mejoraron enormemente durante los últimos 20 años y se convirtieron en una herramienta fundamental para el pronóstico del tiempo.** Hoy no se concibe un servicio meteorológico que no maneje los resultados de varios modelos numéricos para su trabajo rutinario. Sin embargo, distan mucho todavía de ser suficientemente buenos como para que se puedan realizar pronósticos automáticamente, sin agregar el valor de la interpretación que es aportada por profesionales.°

Fuentes consultadas:

Santos Burguete, C. (2018). Física del caos en la predicción meteorológica, Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). DOI: 10.31978/014-18-009-X.

Del trabajo de Vilhelm Friman Koren Bjerknæs
"Si, como piensa todo hombre que razona científicamente, los fenómenos atmosféricos se desarrollan a partir de los que le preceden siguiendo unas leyes físicas precisas, se puede afirmar que las condiciones necesarias y suficientes para una solución racional de la predicción en meteorología son:
- se debe conocer con una precisión suficiente el estado de la atmósfera en un instante dado;
- se deben conocer con una precisión suficiente las leyes según las cuales se desarrolla un estado de la atmósfera a partir del estado precedente."

CONTROL VS. CAOS

La lucha entre las fuerzas incontrolables del caos y los agentes de control excede las barreras de la legendaria serie televisiva "Superagente 86". La atmósfera, con su característico efecto mariposa, es el escenario en el que los científicos trabajan para obtener predicciones del tiempo con mayor precisión y poder cuantificar los errores que son propios de un sistema caótico.

Por Carolina Cerrudo

Si se anuncia que va a llover a la tarde, ¿usted sale con paraguas o no? Quizás debería. Las estadísticas indican que ocho de cada diez pronósticos de lluvia a 24 horas son acertados para la Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Sin embargo, siempre hay un porcentaje de error. ¿Por qué el pronóstico del tiempo falla?

La atmósfera es uno de los sistemas naturales que responde a la Teoría del caos,

y por lo tanto presenta límites intrínsecos a nuestra capacidad de anticipar su evolución. Por este motivo, al realizar predicciones meteorológicas es necesario hablar en términos de probabilidades y utilizar herramientas matemáticas y computacionales para cuantificar el margen de error, como son los pronósticos por ensambles.

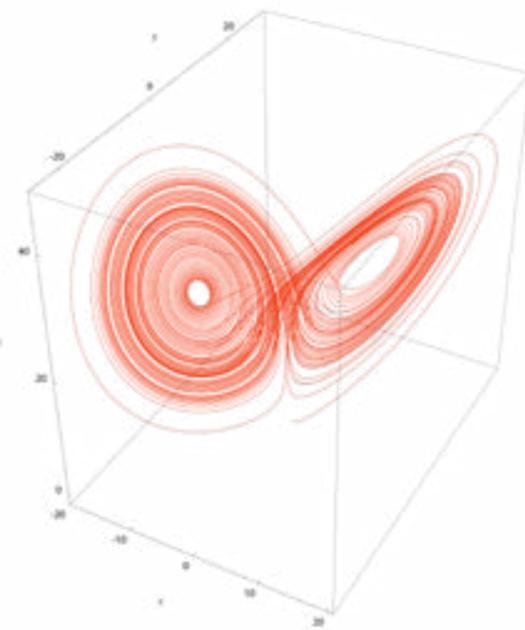
Un pronóstico meteorológico consiste en predecir el estado futuro de la atmósfera. Para ello es necesario partir del estado actual de la misma, lo que se conoce como las "condiciones iniciales" del sistema. Dichas condiciones iniciales se obtienen de la medición de las variables meteorológicas (temperatura, presión, humedad, viento, etc), las cuales introducen un primer margen de error, ya que ninguna medición es exacta. Por otro lado, dado que no es posible tener datos en todos los puntos geográficos de una región, se realizan estimaciones en los lugares donde no se dispone de información, lo cual representa otra fuente de incerteza.

Naturaleza caótica

“¿El aleteo de una mariposa en Brasil hace aparecer un tornado en Texas?”. Esta pregunta fue el disparador que utilizó el matemático y meteorólogo estadounidense Edward Norton Lorenz para comunicar el concepto de la *Teoría del caos* en una reunión de la Asociación Americana para el Avance de la Ciencia en 1972.

Corría el año 1963 cuando Lorenz se encontraba realizando

predicciones de la evolución de la atmósfera utilizando un sistema de ecuaciones muy simplificado de tan sólo tres variables. Observó que los cálculos realizados con su ordenador diferían notablemente al introducir valores redondeados en las condiciones iniciales. “El caos de repente se convirtió en algo para ser bienvenido y en los años siguientes me encontré volviéndome cada vez más hacia el caos como un fenómeno digno de ser estudiado por sí mismo”, declara el científico estadounidense en el prefacio de su libro *La esencia del caos*.



Así surge formalmente la *Teoría del caos*, o como popularmente se conoce, el **efecto mariposa**: pequeñas diferencias en el estado inicial de la atmósfera pueden derivar en condiciones muy diferentes unos pocos días más tarde. Pero la idea en ese entonces no era nueva. Otros autores han expresado ese concepto en sus trabajos con anterioridad, incluso desde comienzos del siglo XX, aunque no fue demostrado hasta el experimento realizado por Lorenz.

La idea del “caos” no es propiedad única de la atmósfera y se extiende a otros sistemas naturales, a tal punto de ser inspiración de muchos autores literarios y directores de cine. En el cuento de ciencia ficción *El ruido de un trueno*, de Ray Bradbury, se representa el efecto mariposa utilizando el recurso de los viajes en el tiempo y revela cómo una pequeña modificación producida en el pasado genera grandes cambios en el futuro.

El efecto mariposa: pequeñas diferencias en el estado inicial de la atmósfera pueden derivar en condiciones muy diferentes unos pocos días más tarde.

La naturaleza caótica de la atmósfera hace que los errores introducidos en el estado inicial se amplifiquen con el plazo de pronóstico. Es por esto que la teoría del caos impone límites en el plazo de tiempo en el cual se puede hacer una predicción meteorológica. El período temporal en el cual podemos prever el estado de la atmósfera (o de otros sistemas caóticos) es lo que se conoce como **predictibilidad**.

El tiempo de anticipación con el que se pueden predecir eventos meteorológicos es variable. Muchas veces resultan de una combinación de fenómenos que tienen diferentes características. La predictibilidad depende del tipo de fenómeno y de su escala espacio-temporal. La ocurrencia de El Niño, que es un fenómeno global, puede ser pronosticada con hasta unos meses de anticipación. Por otra parte, el movimiento de ciclones y anticiclones puede anticiparse con cierta precisión hasta unos 10 o 15 días, mientras que una tormenta, al ser local, puede ser prevista con unas horas de antelación.

Los procesos de la atmósfera están descritos por un sistema de ecuaciones físicas que no tiene solución matemática, motivo por el cual es necesario hacer una serie de simplificaciones y aproximaciones para poder resolverlo. Dicho de otro modo, es imposible modelar la evolución del tiempo meteorológico a la perfección.

Agentes de control

Para representar el comportamiento de la atmósfera se utilizan **modelos numéricos**. Estos son programas computacionales que

resuelven un conjunto de ecuaciones que describen la evolución de sus propiedades esenciales. Para poder ejecutar la simulación en tiempos y costos aceptables se introducen simplificaciones, motivo por el cual no son exactos, explica Juan Ruiz, investigador del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y del Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA).

Estos programas parten de un diagnóstico de las condiciones meteorológicas iniciales que también contiene inexactitudes, y estos errores se amplifican con el correr del plazo de pronóstico. “Si el error que cometemos al estimar la condición inicial para la temperatura en una localidad es de 1 °C, el pronóstico a 24 horas puede tener un error de 1,5 °C y el de 48 horas un error de 2 °C y así siguiendo”, ejemplifica Ruiz.

Pero, ¿se deben aceptar los errores de brazos cruzados?, ¿qué se puede hacer para que la información proveniente de un pronóstico numérico tenga mayor utilidad? **Los pronósticos por ensambles** brindan un conjunto de predicciones y permiten tener una medida del grado de incertidumbre.

“Esta herramienta contribuye a ofrecer una información más completa al usuario, donde podamos dar una idea del error asociado al pronóstico”,

afirma Yanina García Skabar, a cargo de la Dirección de productos de modelación ambiental y de sensores remotos del Servicio Meteorológico Nacional.

Un ensamble se compone de varios pronósticos numéricos, llamados “miembros”, cada uno partiendo de un estado

inicial ligeramente diferente. Se utiliza un grupo de posibles condiciones iniciales, coherente con las observaciones disponibles, pero que abarca diferentes opciones físicamente razonables debido a la falta de observaciones en otros puntos. De esta manera, se tiene en cuenta el hecho de que no conocemos las condiciones iniciales en forma exacta. Como resultado se obtiene un conjunto de posibles evoluciones futuras de la atmósfera. El **grado de dispersión (o diferencia) entre las distintas simulaciones es una medida de la incertidumbre**.

Las condiciones iniciales no son la única fuente de incertidumbre. Los modelos numéricos en sí también presentan limitaciones a la hora de simular la física de la atmósfera. Es por esto que el ensamble de pronósticos contiene, además de diferencias en las condiciones iniciales de cada uno de los miembros, leves variaciones en las representaciones de los procesos físicos. Esto aumenta la posibilidad de que el evento por suceder sea capturado por alguno de los miembros del ensamble.

Pronóstico de mejora

Otra de las ventajas de los pronósticos por ensambles es que permiten **estimar la probabilidad de ocurrencia de diferentes eventos**. Gracias a que se dispone de un conjunto de pronósticos, se puede analizar una gran variedad de escenarios posibles, cada uno con una probabilidad distinta. En las regiones donde la mayoría de los miembros indiquen que se puede producir un fenómeno, es donde habrá mayor probabilidad de ocurrencia del mismo. Esto tiene mucha utilidad, en especial, para la **previsión de eventos de gran impacto para la población**, como puede ser por ejemplo un pronóstico con alta probabilidad de persistencia de una ola de calor.

Contar con una medida de la incertidumbre en los pronósticos permite tener más de un escenario posible de la evolución de la atmósfera. Esto se traduce en una mejora en la calidad de las predicciones, ya que

“la incertidumbre es inherente a la previsión meteorológica, por eso la posibilidad de cuantificar es de por sí un valor agregado”, declara Ruiz.

La utilidad de conocer la incertidumbre de las predicciones depende de la aplicación. El pronóstico de un fenómeno meteorológico extremo con una baja probabilidad de ocurrencia (esto es, con una gran dispersión entre los miembros del ensamble) también puede ser de importancia según las necesidades particulares del usuario. Por ejemplo, en el contexto de la gestión de riesgo de desastres, al igual



que en el sector hídrico, la mínima chance de que se produzca un evento extraordinario de precipitación puede poner en marcha la toma de ciertas acciones preventivas para salvar vidas y bienes. De esta manera, **cobra mayor relevancia conocer un rango de posibles valores de precipitaciones en lugar de un único valor** o del “valor más probable”.

Lidiar con la incertidumbre intrínseca de la atmósfera es tarea cotidiana. Ahora bien, ¿son los límites en la capacidad de predicción imbatibles? Tener la posibilidad de medir la dispersión y reducirla es un valor agregado que impacta positivamente en la calidad de las previsiones. Para ello, se necesita ampliar la capacidad de cómputo, y mejorar las condiciones iniciales y los modelos. Con más y mejores observaciones, al igual que recursos tecnológicos, es posible tener mejores pronósticos.⁹

Fuentes consultadas:

Yanina García Skabar, doctora en Ciencias de la Atmósfera; responsable de la Dirección de Productos de Modelación Ambiental y de Sensores Remotos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN).

Juan Ruiz, doctor en Ciencias de la Atmósfera e Investigador Adjunto del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas y del Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CONICET - CIMA).

RECALCULANDO: EL TRÁNSITO HACIA LA ASIMILACIÓN

Es uno de los desafíos más grandes de la meteorología argentina: incorporar a los modelos numéricos los últimos datos observados por todas las fuentes disponibles. Esto es, contar con una descripción lo más completa posible -ni total, ni perfecta- del estado actual de la atmósfera, que favorezca más y más precisión en los pronósticos. Este procedimiento es sumamente complejo; requiere investigación, desarrollo y tecnología. En la región, Argentina es pionera en avanzar en este camino. Aquí, una aproximación al desafío.

—
Por Mariela de Diego

Todos los días, los grandes centros mundiales de pronóstico elaboran y comparten sus análisis de lo que pasa y lo que va a pasar con el tiempo en todo el planeta. El Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de Argentina, cada día, cada 6 horas, recibe los análisis y pronósticos del modelo Sistema Global de Pronóstico (GFS, por sus siglas en inglés), que no es otra cosa que lo que el modelo global ejecutado por el Servicio Meteorológico de Estados Unidos pronostica para todo el planeta. Este pronóstico (numérico) tiene 25 km de distancia entre puntos de grillado, es decir que pronostica para un punto cada 25 kilómetros. Esta información, que muchas veces es la que muestran en crudo las aplicaciones de celular, en el SMN funciona como materia prima que será reprocesada, analizada y corregida por los pronosticadores, de modo que se emita un pronóstico más preciso a la población.

Un ejemplo para ayudarnos a ilustrar cómo funcionan los modelos de pronóstico numérico son las aplicaciones de celular que nos dan información sobre el tránsito de una ciudad y nos “pronostican” cuáles serían las rutas más convenientes a seguir. Por ejemplo, el famoso Waze: cuando lo abrimos e indicamos un destino, la aplicación reactualiza los datos con los que cuenta en ese momento (los reportes de usuarios y otros tipos de fuentes) y nos arroja el mejor resultado para llegar rápidamente a donde queremos ir. Es decir, la aplicación necesita tener datos iniciales para poder diagnosticar cómo está el tránsito y hacernos un pronóstico. Obviamente, cuanto más información -o reportes sobre lo que está pasando- tenga la aplicación, mejor podrá calcular las rutas más convenientes.

Con los modelos numéricos de pronóstico sucede lo mismo. Cuanta mayor cantidad de datos tenga al inicializarse, más chances tendrá de elaborar una mejor predicción. La “corrida, salida o resultado de modelo” (como la llaman en la jerga) que se recibe es un pronóstico numérico realizado en base a los datos con los que el modelo contaba al momento de “correr”.

“Los análisis que recibimos de los centros mundiales (como el GFS) tienen incorporadas solamente algunas de las observaciones que Argentina comparte, a cada hora, con todo el planeta, a través del sistema mundial de telecomunicaciones”, explica Yanina García Skabar, a cargo de la Dirección de Productos de Modelación Ambiental y de Sensores Remotos del SMN. Por ejemplo, la información del GFS que recibe el SMN no incorpora la información provista por los radares meteorológicos del país y nos da un pronóstico para un punto cada 25 km. Esto, ¿es poco o es suficiente? ¿Puede cambiar mucho el estado del tiempo en esos 25 km?

Del GFS al WRF: haciendo zoom en lo local

Sí. En esa distancia pueden cambiar muchas cosas: puede variar la temperatura, la nubosidad o la precipitación, rotar el viento, desarrollarse una celda de tormenta. Es necesario mirar más de cerca. **Aumentar la resolución. Y acá es cuando aparece en escena el modelo regional de Investigación y Pronóstico Meteorológico (WRF, por sus siglas en inglés), que toma en cuenta las características de nuestro suelo y está ajustado a las particularidades de nuestro país.**

El WRF se ejecuta en los equipos de cómputo del SMN. Pero, ¿cuáles son los datos iniciales que utiliza el WRF para "correr" y calcular un pronóstico? Pues precisamente, "se inicia" del pronóstico que llega del GFS, que funciona entonces como su "condición inicial".

De nuevo vamos a echar mano a la analogía con el tránsito. Imaginemos que una aplicación mundial nos envía datos del tránsito de nuestra ciudad. Pero sus estimaciones no son del todo buenas, porque solamente nos dice por qué avenidas viajar, y nada sobre las calles. **Otra aplicación, local, toma esa información y la vuelve a calcular incorporando todas las calles de la ciudad.** Y nos sugiere un recorrido que seguramente será mejor porque esta aplicación hace los cálculos de tránsito a nivel de cuadras.

Lo mismo hace el WRF respecto del GFS: afina el lápiz y resuelve las ecuaciones que representan la física de nuestra atmósfera para un punto cada 4 kilómetros. Es decir que tiene mayor resolución espacial y esto le permite pronosticar fenómenos de una escala más pequeña, que el GFS no capta (como la convección, por ejemplo).

Sobre esa información, ahora sí, los pronosticadores harán ajustes, volcarán su conocimiento y experiencia para elaborar el producto que sale en la web y boletines del SMN: el pronóstico oficial.

Datos, datos, datos

Antes dijimos que el **modelo global (GFS)** se basa en algunos de los datos de observación que Argentina comparte con el mundo. Pero lo cierto es que **una parte importante de los datos de observación -por ejemplo, lo que captan los radares o lo que están midiendo los aviones- no forma parte del input que el GFS utiliza para calcular su pronóstico.**

Por lo tanto, el WRF tampoco contempla esos datos en su condición inicial. Entonces se desaprovecha mucha información que podría sumarse para producir mejores pronósticos. A menos que podamos incluirlos en algún momento del proceso. O sea, **asimilarlos.**

“El objetivo de la asimilación es tratar de incorporar la mayor cantidad de información al campo inicial del que parte el modelo numérico. Cuanto mejor conozcamos cómo está la atmósfera ahora en toda la región donde queremos pronosticar -no solamente en superficie, sino en todos los niveles verticales- mejor será el pronóstico. Y más aún si podemos incorporar los datos de radar, porque vamos a sumar la información de cómo están las nubes, la cantidad de agua que tenemos en la atmósfera”, explica García Skabar.

El procedimiento de asimilación involucra metodologías matemáticas muy complejas. “Lo que hacemos es combinar un pronóstico a muy corto plazo hecho por el modelo WRF con las últimas observaciones. Ese pronóstico a una hora es nuestro “first guess” o campo preliminar. A ese campo le agregamos las observaciones”, detalla la especialista.

Hay una variable que complejiza todo y es el reloj, porque es necesario contar con los datos de observación en tiempos operativos, o sea cada vez que se corre el modelo. “Lo que hacemos es **asimilar todo el tiempo. Es como un ciclo continuo que arranca hoy y no para nunca.** Nosotros generamos un análisis por hora y le vamos agregando **observaciones cada diez minutos.** Son observaciones de radar, satélites, estaciones meteorológicas convencionales y automáticas, boyas, barcos, aviones, todo lo que podamos recibir en el tiempo operativo”, agrega García Skabar.

Hacemos la última apelación al ejemplo de la aplicación de tránsito. Muchas veces, cuando ya estamos en la ruta sugerida, ésta “recalcula” la información y nos sugiere una alternativa mejor. Esto ocurre porque la aplicación recibió más reportes sobre el estado del tránsito, los **asimiló** y pudo elaborar un mejor pronóstico sobre la ruta que nos conviene tomar. Lo mismo ocurre con la asimilación de datos a un pronóstico numérico. Y todo sucede en cuestión de minutos. °

Fuentes consultadas:

Yanina García Skabar, doctora en Ciencias de la Atmósfera; responsable de la Dirección de Productos de Modelación Ambiental y de Sensores Remotos del SMN.

“EL OBJETIVO DE LA ASIMILACIÓN ES TRATAR DE INCORPORAR LA MAYOR CANTIDAD DE INFORMACIÓN AL CAMPO INICIAL DEL QUE PARTE EL MODELO NUMÉRICO. CUANTO MEJOR CONOZCAMOS CÓMO ESTÁ LA ATMÓSFERA AHORA EN TODA LA REGIÓN DONDE QUEREMOS PRONOSTICAR -NO SOLAMENTE EN SUPERFICIE, SINO EN TODOS LOS NIVELES VERTICALES- MEJOR SERÁ EL PRONÓSTICO. Y MÁS AÚN SI PODEMOS INCORPORAR LOS DATOS DE RADAR, PORQUE VAMOS A SUMAR LA INFORMACIÓN DE CÓMO ESTÁN LAS NUBES, LA CANTIDAD DE AGUA QUE TENEMOS EN LA ATMÓSFERA”

CICLO DE PRONÓSTICO

El pronosticador tiene, en el siglo XXI, una gran cantidad de herramientas que lo ayudan en su tarea diaria. Este diagrama muestra no sólo los elementos que se pueden utilizar sino cuando es que deben ser utilizados.

Alerta Meteorológico

Aviso a Corto Plazo

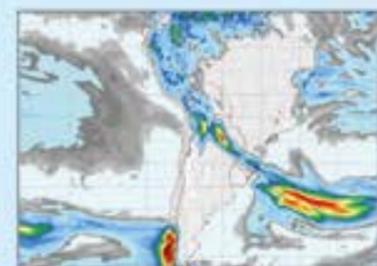
NIVEL DE ATENCIÓN AL EVENTO POR EL PRONOSTICADOR

IMPORTANCIA RELATIVA EN LA PRODUCCIÓN DEL PRONÓSTICO

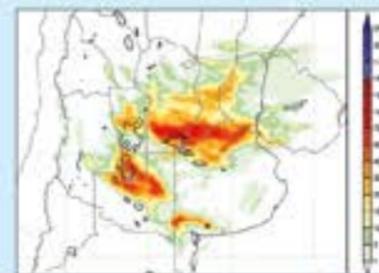
La mejor manera de visualizar este proceso es suponiendo que un evento meteorológico severo (ej., una tormenta con granizo) ya tuvo lugar. A este lo consideramos el tiempo cero, y desde allí nos movemos para atrás en el tiempo para husmear al pronosticador en su tarea.

- A. Modelos globales
- B. Modelos regionales
- C. Imágenes satelitales Vapor + Compuestos RGB (ej.: masa de aire)
- D. Imágenes satelitales Topes Nubosos + Compuestos RGB (ej.: convección)

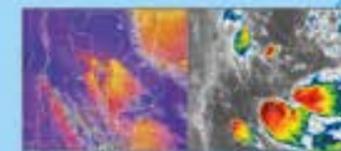
- E. Sistemas de seguimiento de tormentas
- F. Mosaico nacional
- G. Radar individual
- H. Radiosondeos
- I. Observaciones de superficie
- J. Reportes ciudadanos
- K. Redes de detección de rayos



A



B



D



C



F



H



I



J



K



E



G

-120h

-96h

-72h

-48h

-24h

-12h

-6h

-3h

-1h

Tiempo previo al evento severo

[-120H a -48H aprox.]

Este diagrama nos dice que 5 días antes del evento, el pronosticador observaba los eventos por venir pronosticados por un modelo global (ej., modelo GFS) y nota que en aproximadamente 5 días hay cierto potencial para la ocurrencia de un evento meteorológico severo.

[-48H a -24H aprox.]

Comenzará a apoyarse también en las salidas de modelos regionales que ofrecen una mayor resolución (ej., modelo WRF). Con el correr de las horas el modelo regional se transforma en la herramienta dominante, pero a pocas horas del evento, los modelos regionales y globales no contienen información suficientemente al día como para ser de utilidad.

[-24H a -6H aprox.]

Allí empieza a ser esencial monitorear la situación con instrumentos montados en plataformas satelitales y en la red de radares de superficie, ambos proveyendo información cuasi instantánea sobre la evolución del fenómeno.

[-6H a -3H aprox.]

A esto se suma otra información clave, como la obtenida por sondeos en la atmósfera, y el monitoreo de actividad eléctrica que indica la presencia de tormentas y vaticina su intensidad.

[-1H hasta el evento]

De gran utilidad son también las estaciones meteorológicas automáticas de superficie que pueden darnos un panorama muy detallado sobre lo que está ocurriendo en algunos puntos específicos (ej., intensidad del viento o de la precipitación). Esta información se complementa con los reportes ciudadanos (ej., Twitter).

CONCLUSIÓN.

Esta riqueza de información da la posibilidad de estimar el riesgo que implica este posible evento y advertirlo a la población con un nivel de alerta mejor definido a medida que se acerca (ver curva roja arriba del diagrama, indicando el nivel de alerta que esto despierta en el pronosticador y la comunicación con el público y usuarios).

Evento: TORMENTA SEVERA



UN SISTEMA DE ALERTA ADAPTADO A LAS NECESIDADES DE LA POBLACIÓN

Los sistemas de alerta temprana representan uno de los productos más importantes en los servicios meteorológicos, ya que emiten información fundamental sobre cuáles son los eventos severos que podrían afectar una zona determinada.

Por Julia Chasco



LOS SISTEMAS DE ALERTA TEMPRANA (SAT) PROVEEN DATOS CLAVES PARA LA TOMA DE DECISIÓN NO SOLO DEL PÚBLICO EN GENERAL, SINO TAMBIÉN DE LOS SECTORES PRODUCTIVOS Y LOS GOBIERNOS QUE DEBEN PROTEGER A LA POBLACIÓN, LOS BIENES Y EL MEDIO AMBIENTE DE POSIBLES CONSECUENCIAS ADVERSAS.

Pero, ¿qué es un sistema de alerta temprana?

En nuestro país, la Ley 27.287, que crea el Sistema Nacional para la Gestión Integral del Riesgo (SINAGIR), define un alerta como el “estado declarado con anterioridad a la manifestación de una amenaza bajo monitoreo, que permite tomar decisiones específicas para que se activen procedimientos de acción previamente definidos”.

Crear y mantener en funcionamiento un SAT representa, para los organismos científico-técnicos, grandes esfuerzos operativos. Se requiere un cuerpo de profesionales que puedan identificar, analizar y comunicar a la población los fenómenos que podrían ser severos. Además, una gran cantidad de inversión en tecnología que permita al personal operativo contar con las herramientas necesarias

para realizar su trabajo, durante las 24hs del día, todo el año. Por otro lado, son varias las unidades de trabajo que intervienen en un SAT, además de su sector operativo.

Un sistema de alertas cuenta con distintos componentes. El proyecto de Sistemas de Riesgo Climático y Alerta Temprana (CREWS, por sus siglas en inglés) de la Organización Meteorológica Mundial (OMM), describe muy claramente algunos componentes de un sistema de alerta temprana. Entre ellos encontramos: conocimiento del riesgo probable, monitoreo y emisión de alertas (producción de información al respecto), difusión y comunicación de los mensajes de alerta, y por último, capacidad de respuesta ante ese riesgo.

SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA MULTIRRIESGOS

Funciones, responsabilidades y mecanismos de coordinación claramente definidos

CONOCIMIENTO SOBRE LOS RIESGOS DE DESASTRE Y DETECCIÓN, VIGILANCIA, ANÁLISIS Y PREDICCIÓN DE LOS PELIGROS Y CONSECUENCIAS POSIBLES

INFORMACIÓN SOBRE EL/LOS PELIGRO/S

- Observación
- Vigilancia
- Análisis
- Predicción
- Representación cartográfica

ANÁLISIS DE RIESGOS MÚLTIPLES

- Evaluación y cuantificación de:
- Grado de exposición y vulnerabilidad de las personas y los bienes a los peligros
 - Interacciones multirriesgos

AVISOS

- Con inclusión de:
- Probabilidad de que afecten a las personas y a los bienes
 - Repercusiones posibles
 - Mensaje dirigido a diferentes sectores

Las asociaciones institucionales entre los organismos técnicos y otras partes interesadas de los sistemas de alerta temprana multirriesgos son fundamentales para elaborar información sobre los peligros, el grado de exposición y la vulnerabilidad y análisis de riesgos.

DIFUSIÓN Y COMUNICACIÓN

PÚBLICO EN GENERAL

Preparación y respuesta

GOBIERNO LOCAL A NACIONAL
(Todos los peligros pertinentes)

TRANSPORTE
(Hielo en las carreteras, crecidas en las calles, retrasos en el transporte, etc.)

EPIDEMIAS SANITARIAS
(Precipitación excesiva, períodos fríos, olas de calor, etc.)

PRODUCTIVIDAD AGRÍCOLA Y SEGURIDAD ALIMENTARIA
(Heladas, granizo, crecidas, etc.)

SUMINISTRO Y DEMANDA DE ENERGÍA, PROTECCIÓN
(Olas de frío y calor, tormentas, etc.)

GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS
(Precipitación excesiva, sequía, etc.)

EJEMPLOS DE SECTORES

Comunicación de comentarios para mejorar el sistema

En el caso del gráfico (izquierda), los sistemas multirriesgos son aquellos que contemplan los problemas del efecto cascada de los fenómenos meteorológicos extremos y otros peligros naturales. Los servicios de alertas deberían, según consensos de la comunidad internacional, adoptar una perspectiva multirriesgos para una mejor gestión integral del riesgo. Por ejemplo, las fuertes lluvias no solo pueden provocar crecidas sino también desprendimientos de tierra, cuyos avisos pueden provenir de una autoridad diferente.

En este sentido, se introducen mejoras en la llamada “última milla” de la información. Llamamos así al “último recorrido de la información luego de producida”. Es decir, el momento en que un alerta es emitido, la forma en que es comunicado, divulgado y comprendido por el público en general o usuarios específicos de manera tal que los impulsa a tomar una decisión en base a la información recibida. El trabajo realizado sobre la última milla es igual de importante que los procesos anteriores, dado que es ella quien logrará -si el último componente de un SAT, la capacidad de respuesta, es robusta- que se tomen decisiones acordes que logren reducir los impactos de un evento adverso.

En la última milla se trabaja sobre la comunicación y la percepción del riesgo, la tecnología de transmisión de la información y las capacidades del sistema de comprender la información y su respuesta vinculada. Es usual ver robustos sistemas de alerta con poco trabajo en esta etapa final que no generan mejoras en los sistemas integrales de gestión de eventos extremos. Es así como el SMN ha puesto especial énfasis en su nuevo SAT y su “última milla”:

Evolución en el tiempo de los sistemas de alerta temprana

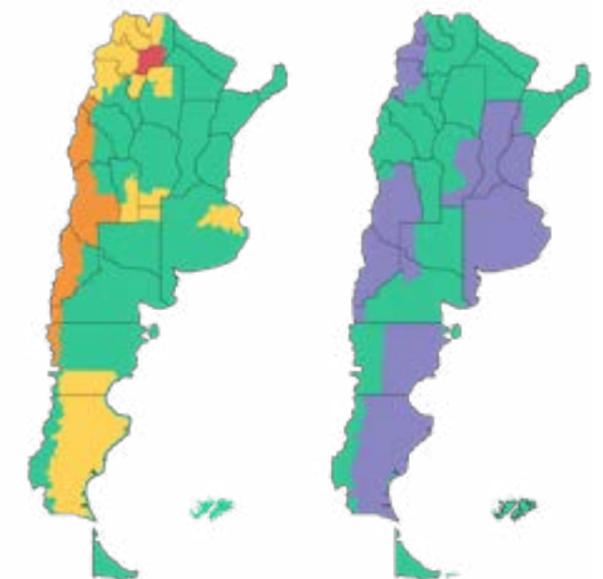
A lo largo de la historia, los sistemas de alerta se han transformado sustancialmente, acompañando las innovaciones científico-tecnológicas. Estos avances permiten a la población y a los sistemas de gestión de riesgo contar con información detallada sobre qué amenaza se presenta, su severidad, el área o región involucrada, la población que se verá involucrada en ese fenómeno y el tiempo en el que se desarrollará. Los SAT más innovadores informan también cuáles serán los impactos esperables, teniendo en cuenta la vulnerabilidad de la población y el grado de exposición.

- **Alertas y advertencias gráficas e interoperables:** los alertas y las advertencias se visualizan en un mapa en formato interoperable (Protocolo Común de Alerta, más conocido por sus siglas en inglés: CAP). Esto permitirá a los usuarios vincular dicha información a distintas aplicaciones móviles y plataformas digitales. Por otro lado, la visualización en un mapa permitirá identificar rápidamente los municipios y provincias que se encuentran bajo alerta logrando reducir la incertidumbre sobre el área de cobertura.
- **Formato semáforo:** siguiendo las recomendaciones y buenas prácticas, los niveles de alertas meteorológicas se distinguen según la severidad del fenómeno, bajo el criterio de umbrales climatológicos, en cuatro colores: verde, amarillo, naranja y rojo.

Un nuevo sistema para fenómenos meteorológicos

El Servicio Meteorológico Nacional (SMN) se encuentra trabajando fuertemente en la implementación de un nuevo Sistema de Alerta Temprana que mejorará sustancialmente la calidad de la información sobre fenómenos meteorológicos severos en Argentina.

Durante los últimos dos años, se ha trabajado en conocer las necesidades de los distintos usuarios de nuestros alertas, pudiendo tomar conocimiento de la importancia de dicha información, especialmente para la gestión de los eventos hidrometeorológicos extremos y su toma de decisión asociada.



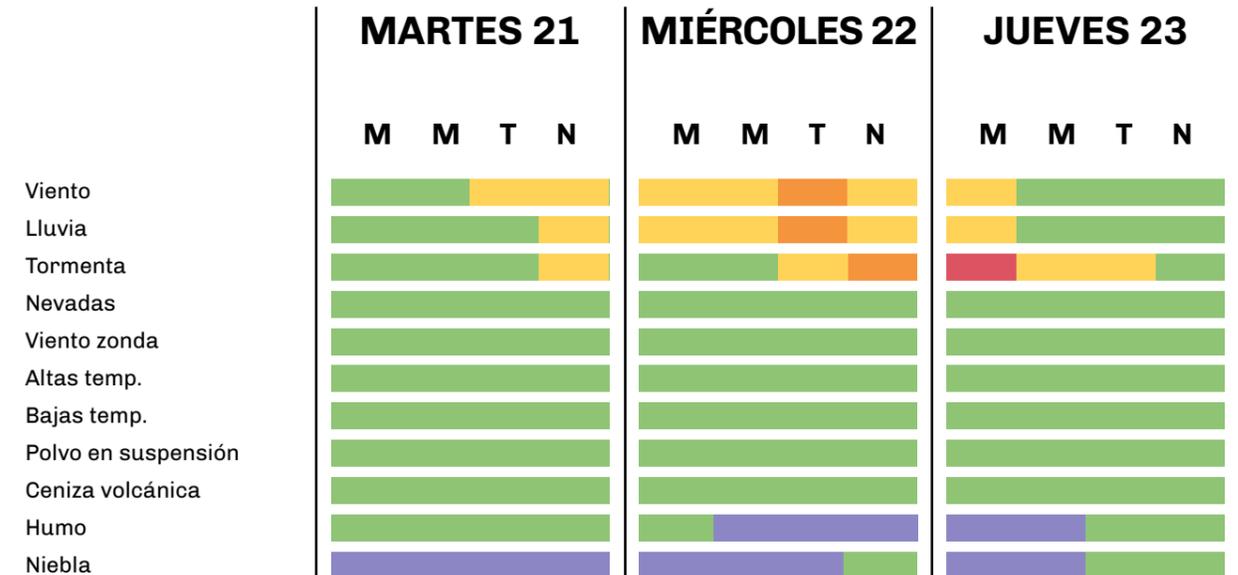
VERDE	AMARILLO	NARANJA	ROJO
<p>TRANQUILIDAD</p> <p>–</p> <p>No se esperan fenómenos meteorológicos que impliquen riesgos</p>	<p>INFORMATE</p> <p>–</p> <p>Posibles fenómenos meteorológicos con capacidad de daño y riesgo de interrupción momentánea de las actividades cotidianas.</p>	<p>PREPARATE</p> <p>–</p> <p>Se esperan fenómenos meteorológicos peligrosos para la sociedad, la vida, los bienes y el ambiente.</p>	<p>SEGUÍ INSTRUCCIONES OFICIALES</p> <p>–</p> <p>Se esperan fenómenos meteorológicos excepcionales con potencial de provocar emergencias o desastres</p>

Un aspecto destacable en la definición de colores es la forma en la que fue construida. El SMN realizó múltiples consultas con distintos usuarios para conocer qué definición resultaba mejor comprendida y los impulsaba a tomar una mejor decisión. Este trabajo, realizado por profesionales de las ciencias sociales, permitió abordar la comprensión de los sistemas de alerta por parte de los usuarios e incorporar de manera tal que las estrategias de comunicación de riesgo sean construidas colectivamente. Las advertencias, por otra parte, se plasman en colores verde (no advertencia) y violeta (advertencia activa) ya que su emisión no responde al formato semáforo (imagen derecha).

- **Alertas a 72 horas:** el sistema permite el seguimiento de la evolución de los alertas y advertencias a 3 días en una línea de tiempo. Este cambio es de gran relevancia, dado que otorga a los tomadores de decisión un margen de tiempo mayor para la gestión de eventuales eventos severos. Asimismo, la ciudadanía puede conocer con mayor anticipación los eventos que la afectarán y tomar recaudos con más antelación.
- **Recomendaciones a la población:** en conjunto con actores nacionales de la gestión de riesgo, los alertas meteorológicos se publican con recomendaciones a la población según fenómeno y severidad. Múltiples estudios comprueban que los impactos de fenómenos adversos se reducen si la población afectada sabe qué medidas tomar y actúa en consecuencia. Una población informada sobre qué hacer en estos casos, es parte activa y fundamental en la reducción de los riesgos.

Los cambios mencionados resultan fundamentales para poder transformar nuestro sistema de alertas en uno adecuado a las necesidades de nuestra población. El SAT se acerca de esta manera a estándares regionales y posiciona mejor a nuestro país en esta materia.

Poder adecuar la información científica emitida a la evolución de las tecnologías de la información y de la comunicación es una característica de todo servicio meteorológico.



El futuro de los alertas

Si bien estos cambios son esperados y bienvenidos por la comunidad nacional e internacional, aún queda mucho por recorrer para lograr el sistema de alertas que esperamos. Si bien los cambios mencionados se visualizan durante el 2020, el SMN ya se encuentra trabajando y formando a su personal en el futuro de los sistemas de alerta temprana: los alertas basados en impacto. Esto requiere del cruce de miles de datos a nivel local, regional y nacional sobre cómo impactan los fenómenos severos de manera de poder “predecir” los mismos con cada alerta emitido.

Países pioneros en la materia como Reino Unido, Francia o Australia tienen años de experiencia y la cooperación internacional hace que los profesionales del SMN puedan estar hoy capacitándose para cambios futuros. Podemos ver un ejemplo de sistema de alerta basada en impactos en el siguiente ejemplo:

SAT sin información de impacto	SAT con información de impacto
Se esperan tormentas fuertes para el día miércoles.	Se esperan tormentas fuertes para el día miércoles que podrían causar anegamientos, evacuación en zonas puntuales, corte de servicios públicos y problemas en el tránsito.

Este tipo de sistema de alertas basados en impacto no se pueden implementar sin la cooperación de organismos nacionales, provinciales y locales que contribuyan brindando información sistematizada sobre dichos impactos a lo largo de un determinado período de tiempo y para cada región particular. Es por tanto, que en el futuro los SAT se crearán de manera colectiva con dichos actores que serán fundamentales para llevar soluciones a la población con información más nutrida sobre cómo los afectarán dichos fenómenos y qué hacer al respecto. El futuro de los alertas tempranas, se construirá necesariamente entre todos.°



PRONÓSTICO DEL TIEMPO

Desde hace años, el pronóstico del tiempo despierta gran interés en diversos sectores de la sociedad. Todos los días, a la mañana, a la tarde o a la noche, dedicamos unos minutos para saber “cómo va a estar el tiempo”.

Por Cindy Fernández

Los pronósticos crean expectativas, porque a partir de ellos tomamos una gran cantidad de decisiones, que pueden incluir desde las medidas de prevención de riesgos (como evacuar poblaciones frente a una posible inundación o el cambio de ruta en el vuelo de un avión) hasta cuestiones tan cotidianas como la elección de actividades de ocio o la indumentaria a vestir en un determinado día.

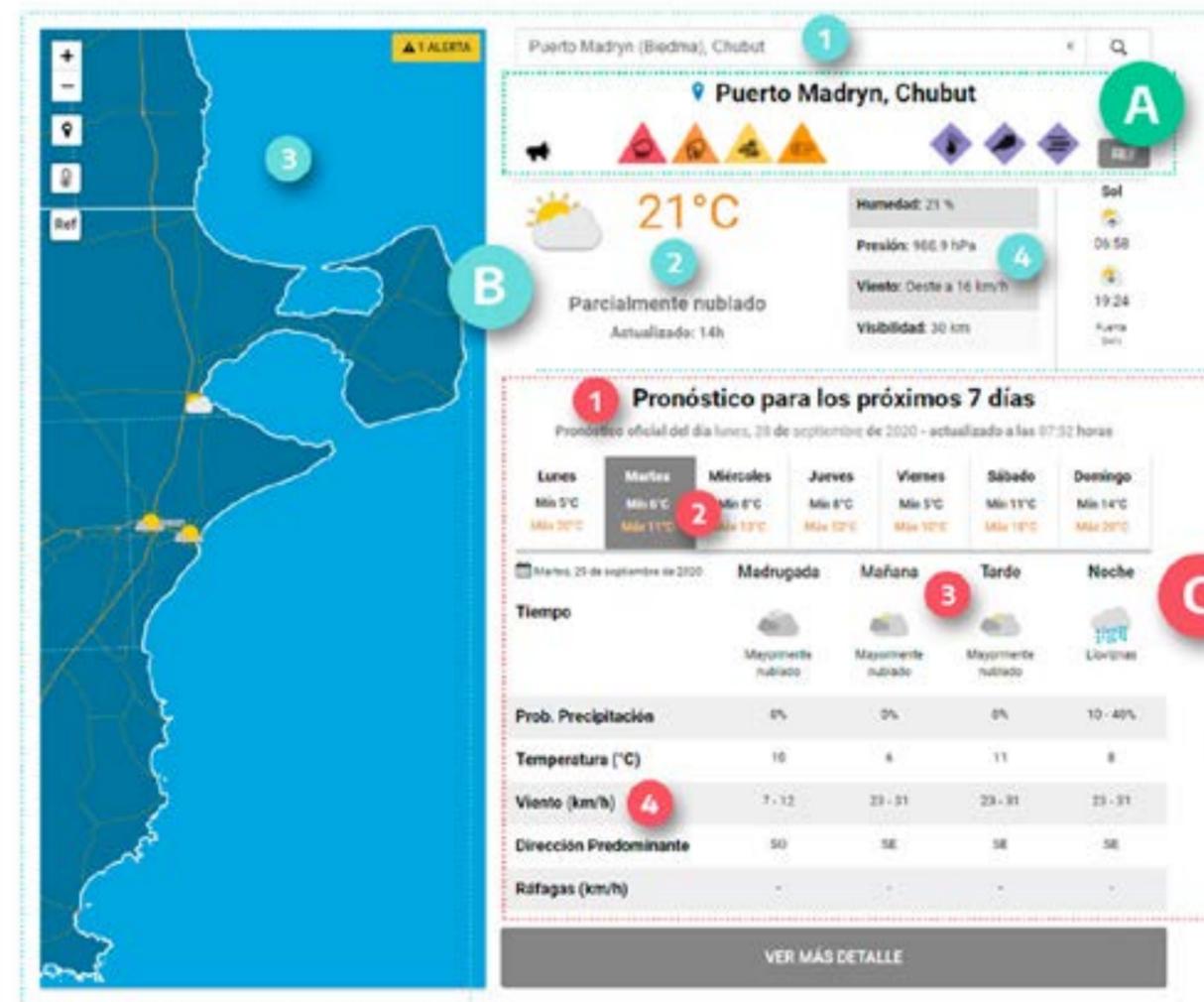
Hoy, existe una gran oferta de apps y sitios web cuyo eje principal es el pronóstico del tiempo -con formatos mayormente visuales-, que informan sobre las condiciones meteorológicas presentes y la posible evolución de la atmósfera. Y, si bien son herramientas que pretenden ser intuitivas para toda la población, muchas veces generan confusión o diferentes interpretaciones entre los usuarios.

Los fenómenos meteorológicos presentan una complejidad asombrosa y las variaciones en la temperatura o en la cobertura nubosa que se pueden dar en pocas horas y a pocos kilómetros de distancia, son notables.

Esta variabilidad se convierte en un enorme desafío al momento de resumir en pocas palabras y símbolos algo que puede ser tan diferente en un marco de tiempo y espacio relativamente pequeño.

Para que la información meteorológica tenga valor y pueda ser usada de la mejor manera posible para la toma de decisión, es necesario que cada usuario del pronóstico oficial lo entienda y lo comprenda. Por tal motivo, los próximos párrafos están dedicados a detallar el significado de la información que se disponibiliza en el pronóstico diario publicado en la página oficial del Servicio Meteorológico Nacional (www.smn.gob.ar).

¿Cómo debo interpretar la información en el sitio web del SMN?



Tiempo actual o condiciones presentes (B)

La parte superior (B) y el mapa de la página principal (3) está dedicada exclusivamente a brindar información sobre las últimas observaciones realizadas en nuestras más de 125 estaciones meteorológicas en todo el país.

Con la geolocalización activada, el sitio mostrará el estado del tiempo para la ubicación en la que se encuentra la persona que lo consulta. Los datos corresponden a los registros de la Red Nacional de Observaciones, por lo que si el usuario se encuentra en una ciudad sin estación meteorológica oficial, el estado del tiempo que mostrará la web será el de la localidad más cercana con estación meteorológica. De no estar activada la geolocalización se encontrará con los datos de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Con el buscador de esta sección se puede seleccionar cualquier localidad del país de la que se desee consultar la información meteorológica.

Los datos del tiempo se actualizan cada una hora durante las 24 horas del día, en la mayoría de las localidades. Algunas pocas estaciones tienen un régimen de observación diferente y reportan datos cada 3 horas o lo hacen solamente durante una parte del día.

1- Buscador y ciudad: nombre de la localidad para la que se muestra la información en este sector. Se pueden buscar otras ciudades de Argentina escribiendo su nombre en el buscador superior o desplazándose sobre el mapa de la izquierda.

2- Datos observados: últimos datos meteorológicos que fueron registrados en la estación meteorológica más cercana. Debajo de la temperatura se indica la hora de la observación y la distancia al punto de registro.

3- Mapa: muestra espacialmente los últimos datos observados de manera interoperable. Se puede cambiar la visualización entre íconos del estado del tiempo y temperatura actual al hacer clic sobre el dibujo de un termómetro que

se encuentra en la esquina superior izquierda.

4- Variables:

- Temperatura del aire (°C).
- Presión (hPa).
- Humedad relativa del aire (%).
- Viento (km/h): dirección e intensidad del viento sostenido. No se considera ráfagas.
- Visibilidad horizontal (km).
- Sensación térmica (°C): se informa cuando la temperatura es mayor a 26 °C y la humedad relativa superior a 40 % o cuando la temperatura es inferior a 10 °C y el viento superior a 7 km/h.

Pronóstico del tiempo (C)

El cuadro inferior está dedicado al **pronóstico para la ciudad** seleccionada. La información cubre un plazo de 7 días. En la vista principal se muestra el pronóstico para lo que resta del día y una vista rápida de las temperaturas máximas y mínimas pronosticadas para los próximos 6 días. Al hacer clic sobre ellas cambiará la visualización por el detalle del pronóstico para el día elegido.

Como ya mencionamos, la complejidad de la atmósfera hace que muchas veces sea imposible resumir en una sola palabra todos los cambios que pueden suceder en pocas horas. Para dar información de mayor calidad, se utilizan **cuatro rangos diarios de pronóstico** durante las primeras 48 horas y dos para los siguientes días. **Cada rango representa el pronóstico más significativo para un periodo de 6 horas.**

Los rangos se dividen en:

- Madrugada: de 0 a 6 h
- Mañana: de 6 a 12 h
- Tarde: de 12 a 18 h
- Noche: de 18 a 0 h

Pero aún así, los meteorólogos tienen el desafío de resumir y generalizar 6 horas de variabilidad atmosférica utilizando solo unas pocas palabras, valores y símbolos.

Por tal motivo, se decidió desarrollar una escala de fenómenos e informar sobre el más significativo en ese periodo, aunque podría no ser el que predomine.

Esta escala está compuesta por los fenómenos descriptos en la figura 2, ordenados del menos (despejado) al más significativo (ventisca baja).

Por ejemplo, durante el período *mañana* podría ocurrir que en 5 horas se prevé que las condiciones van a ser soleadas, pero poco tiempo antes del mediodía se esperan lluvias. En este caso, el pronóstico de ese rango tendrá un ícono

asociado a lluvias, a pesar que se esperaba que predominaran las condiciones soleadas la mayor parte del periodo.

O también puede ocurrir que el meteorólogo determine que en ese periodo la situación va a presentarse primero con viento y luego con tormentas fuertes. En este caso, el viento será informado en las ráfagas y el ícono será el de tormentas fuertes, ya que “tiene más peso”. Por tal motivo, recomendamos siempre leer atentamente toda la información del pronóstico y no quedarse solamente con la imagen que se presenta en el ícono.

Para cada rango se muestra la siguiente información:

1. **Fecha y hora** de publicación del pronóstico. Se actualiza rutinariamente dos veces al día (6 y 18 horas). De ser necesario, en situaciones particulares se realizará una intermedia.
2. **Temperaturas máximas y mínimas** para cada uno de los próximos días.
3. **Rangos de pronóstico.** Se visualizan 4 rangos para los primeros 2 días, mientras que para los siguientes días solo se indican dos rangos diarios de pronóstico de 12 horas cada uno. En total, desde que se emite un pronóstico, siempre se cubre un rango máximo de 7 días.
4. **Variables pronosticadas:**
 - Ícono. Estado del tiempo más significativo en ese periodo con un pequeño texto que describe la imagen.
 - Probabilidad de precipitación. Indica qué tan probable es que llueva durante ese periodo (ver nota “Control versus caos” de esta revista).
 - Temperatura. Valor que caracteriza a cada período. Entre estos valores vamos a encontrar la mínima y máxima diaria, indicando en qué momento del día se producen dichos extremos.
 - Viento. Rango de vientos más intensos esperados para cada periodo.
 - Dirección predominante del viento.
 - Ráfagas. Se informan cuando superan los 40 km/h.

Alertas (A)

Junto con las variables pronosticadas, también se da información sobre situaciones meteorológicas particulares a las que es extremadamente necesario prestarle atención: alertas, advertencias y avisos a muy corto (ACP). (Ver nota “Un sistema de alerta adaptado a las necesidades de la población” de esta revista).

Si hay un alerta, una advertencia o un ACP en vigencia en la ciudad consultada, debajo del nombre de la localidad aparecerán uno o más símbolos de colores, tal como ejemplifica la figura. Si bien fueron desarrollados con el fin de apelar a la intuición del usuario, se puede obtener más información sobre su significado al desplazar el cursor por cada imagen o haciendo clic en REF (referencias). °

ÍCONOS DE PRONÓSTICO DEL TIEMPO DEL SMN

(FIGURA 2)

MENOS SIGNIFICATIVO

DESCRIPCIÓN	DÍA	NOCHE
Despejado		
Ligeramente nublado		
Algo nublado		
Parcialmente nublado		
Mayormente nublado		
Nublado		
Ventoso		
Neblina		
Niebla		
Niebla helada		
Llovizna		
Lluvia aislada		
Lluvia		
Chaparrones		
Tormenta aislada		
Lluvia y nevada		
Nevada		
Tormentas		
Lluvia fuerte		
Nevada fuerte		
Tormenta fuerte		
Ventisca alta		
Ventisca		
Ventisca baja		

MÁS SIGNIFICATIVO

Fuente consultada:
Santos Burguete, C.
(2018). *Física del caos en la predicción meteorológica*, Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). DOI: 10.31978/014-18-009-X.



PRONÓSTICO SEMANAL CON LA TÉCNICA DE ANÁLOGOS

El pronóstico a plazos entre dos y tres semanas es uno de los desafíos actuales a los que se enfrenta la comunidad meteorológica. Poder pronosticar los fenómenos que ocurren en esta escala de tiempo es crítico para la prevención y posible mitigación de desastres asociados con amenazas naturales.

Por Laura Aldeco

Muchas decisiones de gestión que involucran a los sectores de agricultura, energía, defensas civiles, entre otros, necesitan información meteorológica que va desde las próximas semanas a los próximos meses, por lo que los pronósticos dentro en estos plazos de tiempo son de gran valor socioeconómico.

El pronóstico a dos o más semanas es un producto que desde hace algunos años comenzó a realizarse en los principales centros globales del clima y en algunos servicios meteorológicos. Si bien el desempeño de los modelos numéricos disminuye a medida que aumenta el plazo de pronóstico, en el último tiempo se han puesto esfuerzos en comprender los fenómenos que ocurren en una escala temporal que no es ni de tiempo (corto plazo) ni de clima (largo plazo), llamada escala subestacional.

Técnica de análogos

Hay diferentes formas para obtener un pronóstico a dos o más semanas, siendo la más directa el cálculo del pronóstico a partir de la salida de algún modelo numérico que pronostique en esa escala de tiempo. En el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) se utilizó una técnica conocida como **técnica de análogos** para implementarlos, ya que presenta algunas ventajas respecto de utilizar la salida directa del modelo.

Para esta técnica se necesitan datos observados y pronósticos históricos. Como los sistemas de pronósticos suelen tener cambios (generalmente mejoras), la única manera de tener un sistema de pronóstico que sea técnicamente igual en los últimos 20 o 30 años es generando **series de pronósticos retrospectivos**. Los pronósticos retrospectivos son pronósticos corridos hacia atrás con un mismo modelo numérico, es decir que son pronósticos del pasado. De esta manera, se construye una base de datos de pronósticos para un determinado modelo, que se pueden comparar con las observaciones en el mismo período de tiempo.

De estas comparaciones entre pronóstico y observaciones se pueden identificar los errores sistemáticos de los modelos numéricos y, por lo tanto, corregirlos. Este procedimiento se denomina "calibración" del modelo numérico.

En este caso el modelo utilizado es el Sistema Global de Pronóstico (GFS, por sus siglas en inglés) del Centro Nacional

de Predicción Ambiental (NCEP) de Estados Unidos, mientras que los datos observados utilizados corresponden a la red de estaciones de superficie del SMN e INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria). **La longitud de la base de datos de pronósticos y de observaciones es de más de 30 años.**

¿En qué consiste la técnica de análogos? La técnica se puede resumir en 3 pasos:

1. Se compara el pronóstico actual del modelo sobre una región dada al plazo correspondiente (a una o dos semanas) con todos los pronósticos pasados del modelo que tengan el mismo plazo de tiempo.
2. Los análogos son los campos pronosticados pasados que más se asemejan al campo de pronóstico actual, utilizando alguna medida de similitud. Para que la técnica sea efectiva, se deben **identificar al menos 75 análogos**.
3. Una vez obtenidos los campos análogos, se buscan todas las observaciones correspondientes a las fechas de los pronósticos análogos, y en base a dichas observaciones se calcula el promedio del ensamble (que tendrá tantos miembros como campos análogos se identificaron) para precipitación y para temperatura, con sus respectivas anomalías semanales.

Una de las ventajas de esta técnica es que **al tomar las observaciones en lugar de los campos pronosticados se está "corrigiendo" al modelo cada vez que el mismo pronosticó una situación similar**. Otra de las ventajas que presentó en su momento es que permitió obtener un pronóstico por ensambles sin necesidad de un alto costo computacional.

Como analogía, los pasos que realiza esta técnica de análogos se pueden pensar como similares a los de un pronosticador cuando recurre a su "memoria" (ya que por su experiencia puede reconocer algunos errores sistemáticos de los modelos). En ese proceso, el pronosticador usa su experiencia y memoria cotejando lo que realmente sucedió y lo que fue observado cuando el modelo pronosticó una determinada situación. En el caso de la técnica objetiva, la misma recurre a la historia contenida en la longitud de su base de datos de pronósticos.

En un principio, en 2012, esta técnica se utilizó en la región húmeda de Argentina y se generaban pronósticos diarios a plazos hasta una semana. Con la creciente necesidad de los diferentes tomadores de decisión, en 2015 se comenzó a experimentar haciendo pronósticos para las semanas 1 y 2. Una diferencia sustantiva es que estos pronósticos proporcionan valores promedio para toda una semana, en lugar de un valor para cada día. Dependiendo de la aplicación, conocer la precipitación que se espera para toda una semana puede ser un dato de mayor relevancia que el de cada día individual.

Este sistema se mantuvo experimental hasta que pasó a fase operativa a principios de 2019. Los productos disponibles con esta metodología son los campos de precipitación y de temperatura media y las anomalías respecto de su valor medio semanal, para las semanas 1 (días 1 al 7) y 2 (días 8 al 14) de pronóstico. Estos pronósticos se actualizan diariamente y brindan información acerca de lo que pronostica la técnica, en promedio para los próximos 14 días.

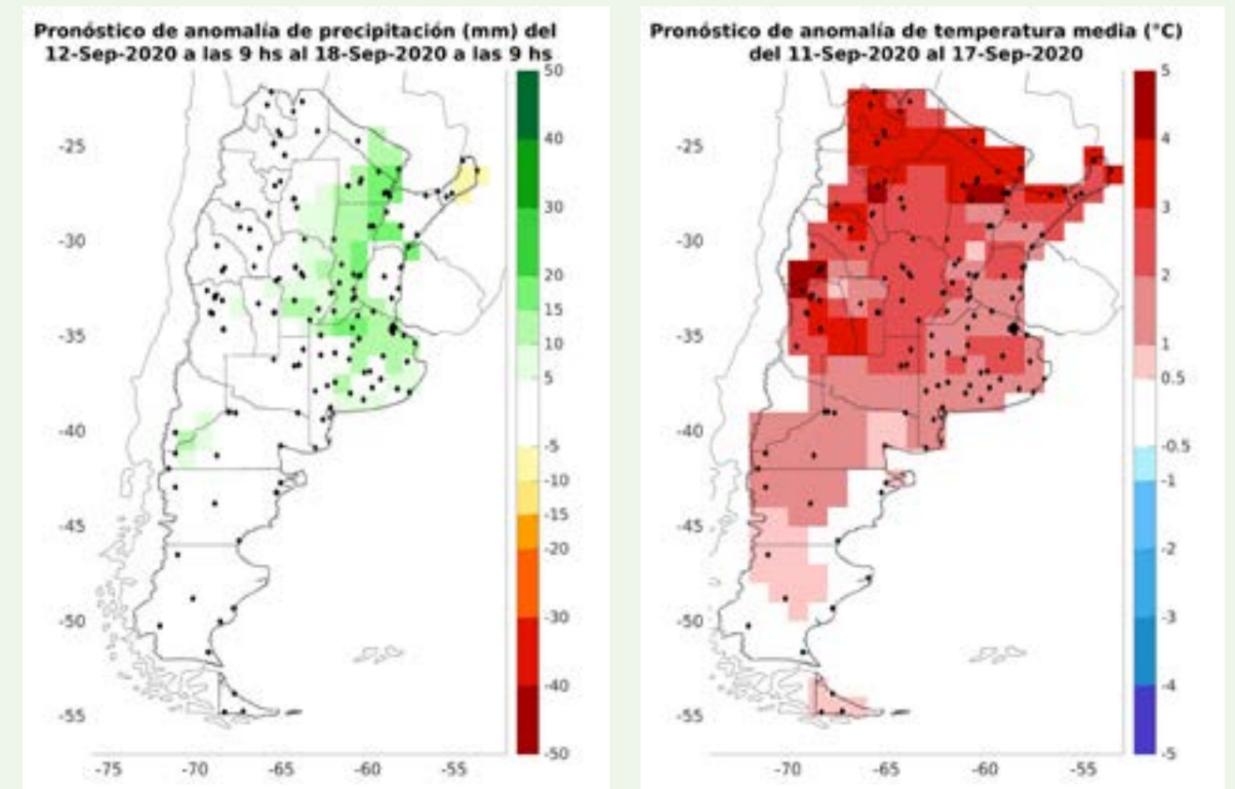
En el último tiempo se han puesto esfuerzos en comprender los fenómenos que ocurren en una escala temporal que no es ni de tiempo (corto plazo) ni de clima (largo plazo), llamada escala subestacional.

El 'caos' en el pronóstico semanal

Pronosticar los fenómenos que suceden en plazos iguales o superiores a 2 semanas es muy difícil, ya que domina la naturaleza caótica de la atmósfera y los modelos numéricos pierden confiabilidad. Es por eso que suelen presentar mayor porcentaje de error que un pronóstico a corto plazo, lo cual representa una limitación de este tipo de productos.

Sin embargo, a veces pueden presentar mayor certeza cuando hay algún fenómeno u oscilación que module lo

que puede suceder en el rango de tiempo de las dos semanas. Algunas de estas oscilaciones se describieron en la edición número 4 de Meteoros (Madden-Julian, Modo anular Austral, Dipolo del Océano Índico). Por eso, el pronóstico semanal viene de la mano del monitoreo y el esfuerzo por la mayor comprensión de estas oscilaciones y la dinámica que las gobierna, ya que en algunos casos (aunque no en todos) constituyen una fuente de previsibilidad.°



Pronósticos semanales para anomalía de precipitación (izquierda) y anomalía de temperatura media (derecha). Precipitación: verdes son excesos y amarillos y amarillos y naranjas son déficits. Temperatura: rojos son temperaturas más cálidas y azules son temperaturas más frías que la media semanal. Las anomalías se calculan en base a la normal semanal calculada en el período de 32 años 1984-2016 de las observaciones de cada estación.

Fuentes consultadas:

Meteoros 2017, año 9, número 4. Repositorio Institucional del SMN (<http://hdl.handle.net/20.500.12160/1224>)

Tesis de licenciatura en Cs. De la Atmósfera: “Aplicación de la técnica de análogos a la generación de pronósticos probabilísticos de precipitación sobre algunas estaciones de la Argentina” de Laura S. Aldeco. Este trabajo sirvió como base para el desarrollo de este producto conjunto entre el SMN y el Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA).



ENTRE EL TIEMPO Y EL CLIMA

Observar, recordar y utilizarlo para sacar conclusiones acerca de lo que puede pasar a continuación, son acciones inherentes al ser humano. Así fue cómo, desde los pobladores de las costas del Perú que observaron la disminución de la pesca asociada al calentamiento del Pacífico hasta los científicos actuales que modelizan los procesos oceánicos y atmosféricos, los intentos por pronosticar qué condiciones prevalecerán en el futuro han conducido a resultados auspiciosos. Sin embargo, los interrogantes continúan desafiando a la ciencia, que busca acercarse a la sociedad con respuestas a sus demandas.

Por María Eugenia Bontempi

Todo recorrido comienza con los primeros pasos

El hombre no ha sido ajeno a las fuerzas naturales; muy por el contrario, la necesidad y la curiosidad lo llevaron a observar con atención y métodos científicos a la naturaleza. Pronto se vislumbraron ciertas conexiones entre el comportamiento de los océanos y la atmósfera. Las publicaciones del Boletín de la Sociedad Geográfica de Lima, de la última década del siglo XIX, lo prueban. En ellas se conjetura con gran lucidez acerca de las influencias de la temperatura del mar en el clima y de las variaciones provocadas por las corrientes marinas, apoyados en las referencias de los navegantes locales. A estos últimos se atribuye la denominación de la corriente cálida que fluye intermitentemente desde el golfo de Guayaquil bordeando las costas peruanas con el nombre de corriente del Niño, por su cercanía habitual a las celebraciones navideñas.

Ya a mediados de los años 70 y con el acompañamiento de grandes avances tecnológicos, comenzaron a develarse como variables compañeras la presión atmosférica y la temperatura superficial del mar, particularmente en el océano Pacífico.

La presión parecía responder a los cambios en la temperatura del agua con un retraso de dos a tres meses, aunque persistía la duda de si ambas variables serían influenciadas por un forzante externo, sin estar realmente correlacionadas entre sí. Los años en que se observaba el calentamiento anómalo del agua del Pacífico central y oriental, que se definiría como condición El Niño, mostraban una mayor capacidad de previsión de las variables atmosféricas.

Desde entonces, el conocimiento de los procesos que condicionan en escalas de tiempo de semanas a pocos meses lo que ocurre hasta a miles de kilómetros de distancia avanzó sin pausa. Son las oscilaciones que realizan sus ciclos (descritas en la edición número 4 de Meteoros), los llamados forzantes del clima. La Oscilación del Sur-El Niño (ENSO, por sus siglas en inglés) fue descrita en sus distintas fases cada vez más exhaustivamente durante las décadas de los 80 y 90, y todavía se siguen estudiando las variantes con que puede presentarse este evento climático, uno de los más populares entre la población. Pero El Niño no está solo, y los otros forzantes también cobran notoriedad a medida que se sabe más de ellos (Madden-

Julian, Modo anular Austral, Dipolo del Océano Índico). Entre todos ellos se refuerzan o contrarrestan sus efectos, en una dinámica compleja y fascinante.

Sin prisa pero sin pausa

En los últimos 20 años, se produjo un fuerte desarrollo de herramientas de pronóstico estacional. A diferencia del pronóstico del tiempo diario, el estacional prevé el comportamiento de las variables en promedio para un periodo largo de tiempo (típicamente, tres meses), pero no anticipa eventos puntuales como una tormenta o un descenso rápido de temperatura tras el paso de un frente.

Los grandes centros meteorológicos en el mundo proveen sus modelos, que son analizados en los servicios meteorológicos para la elaboración de sus informes. No obstante estos grandes avances, la baja predictibilidad del sistema climático impone un nivel de incertidumbre ineludible. Esto se debe a que pequeñas variaciones en el estado inicial de la atmósfera pueden conducir a estados posteriores diferentes entre sí, que pueden hacerse más y más diferentes e incluso opuestos a medida que aumenta el plazo del pronóstico. Por eso los pronósticos suelen presentarse como escenarios más probables y a ellos se les asocia un grado de probabilidad de que ocurran.

Por lo tanto, interpretar el pronóstico ofrece un desafío doble, ya que no se trata solamente de determinar cuál será el escenario más probable, sino también de comprender qué implica el nivel de probabilidad asociado. Es importante recalcar que esta es la más alta precisión que ofrece hoy el estado del arte del desarrollo científico en el área, y por lo tanto una previsión que indique con exactitud cuántos milímetros de precipitación van a caer y dónde, sin ningún tipo de incerteza, constituye, naturalmente, un canto de sirenas (ver recuadro *The Old Farmer's Almanac*). Es, entonces, imperativo comprender cuál es la validez de un producto de pronóstico y el grado de confianza con que podemos mirarlo antes de considerarlo en nuestra toma de decisiones y esto es tanto más importante cuanto mayor es la responsabilidad que involucran dichas decisiones.

¿Física o matemática?

En una clasificación amplia, los modelos pueden ser dinámicos o estadísticos. Los primeros son aquellos que resuelven las



Los interesados en saber qué va a pasar con las condiciones climáticas en el plazo de pocos meses son múltiples, como lo son sus demandas.

ecuaciones desarrolladas para describir el comportamiento de la atmósfera y los océanos a lo largo del tiempo, partiendo de las condiciones iniciales observadas. Cuantos más son los fenómenos que se quiere describir, mayor es la complejidad de las ecuaciones matemáticas a resolver. En principio, uno espera que estos modelos complejos representen mejor la realidad, pero por otro lado también aumentan los requerimientos de información para alimentarlos y de capacidad y tiempo de cómputo para ejecutarlos.

Los modelos estadísticos, a grandes rasgos, buscan una ecuación que describa la respuesta de una variable que se quiere pronosticar a las variaciones en un conjunto de variables, los predictores. Esta ecuación se obtiene de analizar los valores históricos de muchos años y no contiene ninguna presunción sobre la física subyacente del problema. Por ejemplo, se busca la relación matemática entre la variable temperatura de invierno y las variables presión en superficie y en altura en otoño sin preocuparse por la complejidad del mecanismo que la ocasiona. Esa relación se usará para pronosticar la temperatura invernal de 2021 conforme se cuente con los valores de presión de otoño de ese mismo año.

Finalmente, existen también los modelos mixtos, que combinan las dos técnicas en busca siempre de un mejor y más eficiente pronóstico.

En busca de consensos

Los servicios meteorológicos se valen de las salidas de los modelos elaborados a nivel mundial para realizar sus previsiones. La experiencia de la comunidad de meteorólogos llevó a algunos países a la metodología del pronóstico acordado por grupos de expertos, que se elabora sobre la base de los modelos. Éstos son ponderados de acuerdo con la experiencia previa de su desempeño en la escala local, el cual puede ser medido y cuantificado por metodologías objetivas o, en algunos casos, analizado de forma subjetiva. Es el caso de Argentina y otros países de la región, donde cada mes se publica un informe de la previsión de las condiciones de temperatura y lluvia que predominarán en los tres meses siguientes.

En las reuniones de elaboración de este informe están presentes distintos usuarios clave del producto, que hacen sus aportes al diagnóstico y monitoreo desde sus miradas específicas. Son principalmente las instituciones relacionadas a la gestión de riesgos, así como agentes o agrupaciones del ámbito privado, como cooperativas o consorcios agrícolas.

María de Estrada, de la Oficina de Monitoreo de Emergencias Agropecuarias (OMEGA) del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, observa:

“No es un profesional diciendo lo que va a pasar, es un conjunto de expertos que están pendientes de muchos y diversos procesos y que desde ahí, y con los mejores insumos disponibles, generan este pronóstico trimestral.”

Por su parte, los usuarios contribuyen a acercar la información meteorológica a la realidad de campo. “Creo que nuestro aporte es el de ayudar a entender cómo los procesos ocurridos o las tendencias configuran escenarios reales”, comenta de Estrada. Sin descartar que se trata también de un espacio de formación y de actualización de productos que se van incorporando al análisis.

Diego Campos, meteorólogo que forma parte del equipo de pronóstico estacional perteneciente a la Oficina de Servicios Climatológicos de la Dirección Meteorológica de Chile, nos explica que en su país se realiza un pronóstico objetivo basado en los resultados de modelos dinámicos y modelos estadísticos. “A las salidas de los modelos dinámicos las calibramos con nuestras observaciones mediante un análisis estadístico”, agrega, mientras que “para los modelos estadísticos utilizamos la relación entre la temperatura superficial del mar en tres zonas diferentes del Pacífico con la precipitación y la temperatura”. Diferentes usuarios del sector público y privado participan activamente en las reuniones, informándose, despejando dudas y aportando sus datos.

De este lado de la cordillera, algunas instituciones también cuentan con datos que se incorporan al monitoreo, enriqueciendo así los análisis. Una de ellas es la Comisión Regional del Río Bermejo (COREBE), que brinda valiosa información hidrometeorológica de la cuenca, proveniente de redes provinciales con una densidad de mediciones adecuada, según nos cuenta Juan Manuel Bazán, asesor de la comisión.

Cada cual atiende su juego

La agricultura, el sector energético, de la salud, del turismo; los interesados en saber qué va a pasar con las condiciones climáticas en el plazo de pocos meses son múltiples, como lo son sus demandas. **Todos ellos requieren información confiable para decidir cómo administrarán de forma eficiente sus recursos y su participación es crucial para entender cuáles son esas necesidades.**

Pensando en identificar y satisfacer estas demandas específicas, Paraguay implementó en el último año las Mesas Técnicas Agroclimáticas, en las que un climatólogo expone en forma presencial el pronóstico estacional a pequeños, medianos y grandes agricultores “con la posibilidad de debatir con ellos y diagnosticar las necesidades de productos relacionados al clima que ellos pudieran tener”, como por ejemplo **probabilidades de ocurrencia de temperaturas por encima o debajo de determinados umbrales críticos para algún cultivo**, nos cuenta Roberto Salinas, a cargo del área de Climatología en su país.

Al respecto, María de Estrada agrega que en el área de emergencias agropecuarias, la escala trimestral es fundamental porque tiene que ver con los ciclos de los cultivos y los diferentes sistemas productivos. “Nosotros tenemos que trabajar en entender la dinámica del riesgo, compuesto por condiciones ambientales muy variables pero también por los sistemas productivos y su capacidad de recuperarse de eventos adversos”, señala.

Juan Borús, que desempeña sus funciones en el Instituto

Nacional del Agua, en el área de Sistemas de Información y Alerta Hidrológico, expresa la misma idea al ser consultado acerca del aporte del sector a las reuniones. “Es una oportunidad para resaltar el impacto esperable de las tendencias climáticas, especialmente en áreas de mayor vulnerabilidad a las inundaciones”, explica. A su vez, recalca la importancia de tener siempre presente qué es lo normal para cada área, ya que la caracterización en terciles se apoya en esa definición.

La clave, el entendimiento mutuo

Además de la mejora continua de los modelos, los meteorólogos deben enfocar sus esfuerzos en llegar a aquellos usuarios que hoy están más apartados de la cocina del pronóstico para **encontrar un idioma común en el que transmitir claramente resultados e incertezas**. Interactuar con todos los sectores de la sociedad para entender qué información es relevante y cómo comunicarla, difundiendo también con claridad las limitaciones de esa información, son dos aspectos frecuentemente esquivos, pero ineludibles para que todo el proceso tenga sentido.°

The Old Farmer's Almanac

En qué creen los que creen

¿Cuál es la conexión entre los usuarios que reclaman precisión absoluta a los pronósticos meteorológicos de base científica y aquellos que confían sin cuestionamientos en las predicciones de gurús sin preparación? Sin duda, los unen sus deseos de conocer con cualquier antelación cuál será el estado de la atmósfera y la ingenuidad de creer que esto es posible (proveniente del desconocimiento).

Un caso emblemático de estos gurús meteorológicos es el de *The Old Farmer's Almanac*, una publicación de más de 200 años de existencia ininterrumpida que obsequia a sus lectores con un pronóstico del tiempo con un año de anticipación ¡para cada día del año! y, claro, con la misma capacidad de acierto que un juego de azar. (Vale la pena

conocer un poco más su historia; ver, por ejemplo, el Anexo 1 de la nota técnica: de Elía R., 2020: *Reflexiones sobre los pronósticos probabilísticos de alta incertidumbre*. Nota Técnica SMN 2020-66).

El caso descripto arriba es en realidad solo la punta de un témpano que incluye personas que con una formación muy superficial (o a veces no tanto) y pocos escrúpulos, ofrecen predicciones de nula utilidad. De este modo, sus interlocutores utilizan la información recibida creyéndola cierta para planificar sus actividades, sin saber que quizás el riesgo sea aún mayor que si aceptaran los límites reales de los pronósticos transmitidos por las instituciones con respaldo científico.

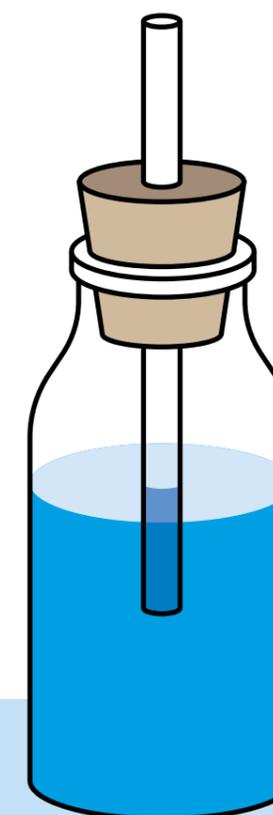
¡HACÉ TU PROPIO TERMÓMETRO DE PIPETA!

ENTENDÉ MEJOR EL FUNCIONAMIENTO DE LOS TERMÓMETROS.

¿Cómo lo hacemos?

1. Primero, con el clavo hacemos un agujero en el tapón de corcho que permita pasar la pipeta.
2. Luego agregamos agua hasta la mitad de la botella, seguida de unas gotas de colorante y la pipeta con el tapón, ajustándolo en el cuello de la botella para que no entre aire.
3. Una vez hecho esto, se marca con el rotulador el nivel hasta donde llega el agua dentro de la pipeta.
4. A continuación, tomamos nota de la altura que alcanza el agua a temperatura ambiente, expuesto al sol, en la heladera y en agua hirviendo. Así, podremos observar que el agua asciende por la pipeta cuando hace calor, mientras que ocurre lo contrario en contacto a temperaturas menores. Esto ocurre debido a que los líquidos se expanden al calentarse y se contraen al enfriarse.

Si en lugar de agua se utilizara otro compuesto como el alcohol, las reacciones serían incluso más rápidas gracias a las propiedades del mismo.

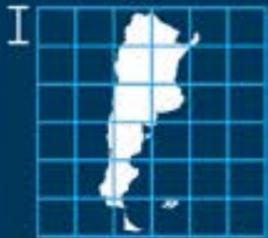


Para ello se necesita:

- Una botella pequeña (de 15 a 20 cm).
- Una pipeta de vidrio o un cuentagotas de mayor tamaño que la botella.
- Un tapón de corcho que se ajuste a la boca de la botella.
- Un tintero o algún tipo de colorante.
- Un rotulador.
- Un clavo.

HPC Y LA MEJORA EN LA CALIDAD DE LOS PRONÓSTICOS

Resolución 50 km:
1 pronóstico
para 1 punto
cada 50 km.

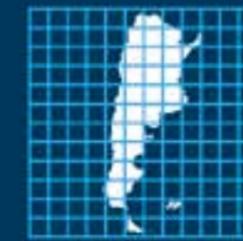


**MODELO GLOBAL
DE BAJA
RESOLUCIÓN**

HPC



**MODELOS
DE ALTA
RESOLUCIÓN**



Resolución 4 km:
1 pronóstico
para 1 punto
cada 4 km.

PRONÓSTICO PROBABILÍSTICO

Con el HPC se agiliza 20 veces la velocidad de procesamiento. Sin el HPC el pronóstico por ensamble en alta resolución no sería factible.

PRONÓSTICO DETERMINÍSTICO

Antes corre en **2:30 horas**

Ahora corre en menos de **30 min.**

Tiene 4000 núcleos distribuidos en 128 nodos de cálculo, es decir que tiene varios procesadores en una misma computadora.

Tiene 348 mil gigaflops, es decir que tiene 5 mil veces más capacidad de cómputo que una PC doméstica.

Cuenta con una capacidad de almacenamiento de alrededor de 1.200.000 GB. Una computadora ordinaria tiene 500 GB de capacidad de almacenamiento.

HPC: la máquina de hacer pronósticos

El SMN está incorporando pronósticos por ensamble de alta resolución, uno de los mayores avances en materia meteorológica no solo del país, sino de la región.

Los ensambles -también llamados pronósticos por conjunto-, tienen en cuenta múltiples simulaciones del modelo numérico creadas a partir de diferentes condiciones iniciales y así permiten conocer el grado de acuerdo entre los distintos pronósticos. De este modo, agregan información y cuantifican la incertidumbre o confianza del pronóstico, lo que los convierte en una excelente herramienta para la toma de decisión.

Pero para poder realizar este salto cuántico en la información que se genera y brinda, es necesario contar con un equipamiento especial y robusto, dedicado especialmente a semejante tarea: una computadora de alto rendimiento (o HPC, por su nombre en inglés).

En 2019, el SMN adquirió un HPC: una red de 128 computadoras con 32 procesadores que trabajan de manera conjunta para resolver el complejo sistema de ecuaciones que modelan a la atmósfera. En este equipo, ahora se ejecuta un sistema de pronóstico por ensambles, con 20 miembros (es decir, con 20 corridas del modelo).

Todas sus cualidades posicionan al HPC como la instalación operativa más rápida del país y una de las mayores en América del Sur, con 140 billones de cálculos matemáticos por segundo. Esto reduce enormemente el tiempo en que se puede tener una previsión del tiempo para un futuro cercano, ya que el HPC permitió multiplicar por 20 la capacidad de cálculo del organismo respecto de su sistema anterior.

***Seguinos en nuestras
redes sociales:***

