



Servicio  
Meteorológico  
Nacional

# Los pronósticos probabilísticos: algunas cuestiones generales

Nota Técnica SMN 2017-57

**Ramón de Elía<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Departamento de Investigación y Desarrollo, Dirección de Ciencia e Innovación en Productos y Servicios  
(ex GIDyC)*

Agosto 2019



Ministerio de Defensa  
Presidencia de la Nación

### *Información sobre Copyright*

*Este reporte ha sido producido por empleados del Servicio Meteorológico Nacional con el fin de documentar sus actividades de investigación y desarrollo. El presente trabajo ha tenido cierto nivel de revisión por otros miembros de la institución, pero ninguno de los resultados o juicios expresados aquí presuponen un aval implícito o explícito del Servicio Meteorológico Nacional.*

*La información aquí presentada puede ser reproducida a condición que la fuente sea adecuadamente citada.*

## Resumen

Los pronósticos probabilísticos son muy corrientes en la vida cotidiana, desde los proferidos por especialistas políticos, hasta los que se escuchan en boca de médicos y meteorólogos. Esta habitual presencia en el dominio público podría llevarnos a pensar que los pronósticos probabilísticos no necesitan para su comprensión ni conocimientos específicos ni conceptos sofisticados. Esta visión será seguramente abandonada apenas uno comienza a formularse preguntas sobre el significado de estos pronósticos: por ejemplo, ¿cómo se debe entender exactamente que hay 60% de probabilidades de que un evento ocurra? Naturalmente esta pregunta nos acerca a otras que tampoco tienen repuestas triviales.

Esta Nota Técnica discute algunos conceptos fundamentales detrás del pronóstico probabilístico. Apunta a aclarar algunas de estas ideas y a introducir la complejidad de otras sin presentar respuestas definitivas. El mensaje central que se quiere transmitir es la necesidad de meditar sobre estos temas antes de embarcarse a producir pronósticos probabilísticos.

## Abstract

Probabilistic forecasts are a common presence in every-day life, from those asserted by political pundits, to those commonly used by medical doctors and meteorologists. This common presence in the public sphere may lead us to believe that the understanding of probability forecasting does not involve specific knowledge nor sophisticated concepts. This view is quickly left aside when one starts to ask questions about meaning – such as, what do they mean by 60% probabilities of occurrence of a given event?--, and these lead to more questions with no trivial answers.

This Technical Note discusses basic concepts about probability forecasting. It aims to clarify some ideas and attempts to open up issues for reflection, without providing final answers. The main message is that there is a danger in producing probability forecasts without first having a good thought to some of the issues discussed here.

**Palabras clave:** pronósticos probabilísticos, interpretación, conceptos básicos, incertidumbre

## Citar como:

de Elía R., 2019: Los pronósticos probabilísticos: algunas cuestiones generales. Nota Técnica SMN 2019-57.

## 1. INTRODUCCION

Hoy día la presencia de pronósticos probabilísticos en el dominio público --desde pronósticos meteorológicos hasta predicciones políticas— es tan corriente que pueden dar la impresión de no ocultar ninguna dificultad particular. El objetivo de esta Nota Técnica es mostrar que esta aparente simplicidad es ilusoria y discutir algunos de los temas que son centrales a su comprensión, siendo esto tanto válido para entender el contenido de pronósticos emitidos por terceros como para la producción de los mismos.

La discusión de estos temas elude un simple tratamiento lineal, ya que cuando uno comienza a formularse preguntas sobre un punto particular en una dirección no puede evitar que surjan otras preguntas que se dirijan hacia otras --y que de alguna manera uno ya quisiera tener respondidas de antemano. Por esta razón las secciones que se presentan a continuación son cuasi-independientes y podrían leerse en un orden distinto al sugerido.

Es importante aclarar que si bien este texto no pretende agotar las complicaciones propias del tema discutido, sí trata de tocar los puntos que más frecuentemente causan dudas o confusión. Algunos de estos son bastante sutiles y se beneficiarían probablemente de un tratamiento con más atención a la didáctica que lo aquí logrado. Es por eso que como objetivo de mínima esta Nota apunta a ser más bien un conjunto de reflexiones sobre los riesgos de tratar como si fueran simples temas que en realidad no lo son. La abundante bibliografía indica lecturas clave en aquellos temas que se deseen profundizar. Los lectores con interés en clarificaciones generales sobre las propiedades y uso de la probabilidad pueden buscarlo en cualquier libro de texto universitario sobre este tema (entre estos Scheaffer y McClave 1990 es particularmente claro y completo, y en lo que se refiere a textos de uso en meteorología ver Wilks 2011).

Es importante destacar que de la variedad de temas abajo discutidos, algunos de ellos son tratados con más detalle en otros textos (secciones 4 y 5), mientras otros son discutidos poco frecuentemente o en rarísimos casos (secciones 2, 3 y 6). Es sobretodo en estos últimos que el presente texto puede ser de más utilidad.

## 2. EL PRONOSTICO Y SU INCERTIDUMBRE

### 2.1 Tipos de pronóstico y su relación con la incertidumbre

En la práctica meteorológica existen diferentes tipos de pronósticos, no solo en lo que respecta a la variable de interés, al período o región de interés, sino también a su relación con la incertidumbre. Los más importantes son (ver Figura 1):

*Pronóstico continuo:* es aquel que se interesa en variables continuas (por ejemplo, temperatura de superficie), y utiliza cualquier valor en el rango. Por ejemplo, “la máxima para mañana será de 28 grados”.

*Pronóstico categórico:* se utiliza con variables discretas o continuas en intervalos discretizados. El más frecuente es el dicotómico (llueve - no llueve), pero puede estar dividido en más categorías, por ejemplo terciles como es el caso de los pronósticos estacionales (bajo la normal, normal, sobre la normal).

*Pronóstico determinista:* este se aplica a los dos tipos anteriores cuando se da una única opción. Por ejemplo “la máxima para mañana será de 28 grados” (continuo) o “nieblas por la mañana” (categórico). El

hecho que el pronóstico sea determinista puede interpretarse de diferentes formas: 1- que los emisores no sepan que su pronóstico puede errar, 2- que los emisores --por falta de verificación cuantitativa-- ignoren el error asociado al pronóstico, 3- que los estudios muestren que tienen bajo error y que su comunicación agrega poco, 4- que los receptores no deseen recibir probabilidades o intervalos de confianza que agreguen complejidad a sus decisiones (ejemplos de este caso pueden verse en la sección que sigue). En el pronóstico determinista, el emisor asume el “error” del pronóstico y por lo tanto simplifica la toma de decisión del usuario. Esta toma de decisión, no obstante, puede no ser la óptima para algunos usuarios.

pronóstico	continuo	determinista	Calibrado (si/no)
		intervalo	Calibrado (si/no)
	categorico	determinista	Calibrado (si/no)
		probabilístico	Calibrado (si/no)

**Figura 1:** Cuadro representando diferentes tipos de pronóstico comunes en meteorología.

**Pronóstico con intervalo de confianza:** En los pronósticos continuos es posible mencionar un intervalo de confianza, aunque esto no es tan frecuente. Por ejemplo, “la máxima para mañana será de 28°C con  $\pm 1^\circ\text{C}$  de error”. En general esto debe ser interpretado como que la temperatura máxima esperada caerá dentro del intervalo [27°C, 29°C] con una dada probabilidad.

**Pronóstico probabilístico:** Cuando los pronósticos están lejos de ser cuasi-deterministas por el bajo porcentaje de aciertos, o cuando el emisor del pronóstico entiende que el receptor tiene interés en tomar sus propias decisiones contando con la información cruda, se puede elegir la emisión de pronósticos probabilísticos. En general estos pronósticos están asociados a fenómenos fácilmente categorizables (lluvia-no lluvia, niebla-no niebla, temperatura arriba o abajo de 35°C) y pueden o no tener una cuantificación metódica. Por ejemplo, un pronosticador puede obtener valores de probabilidad (numérica o en palabras) a través de su experiencia personal o a través de calibración sistemática (asociada a verificación).

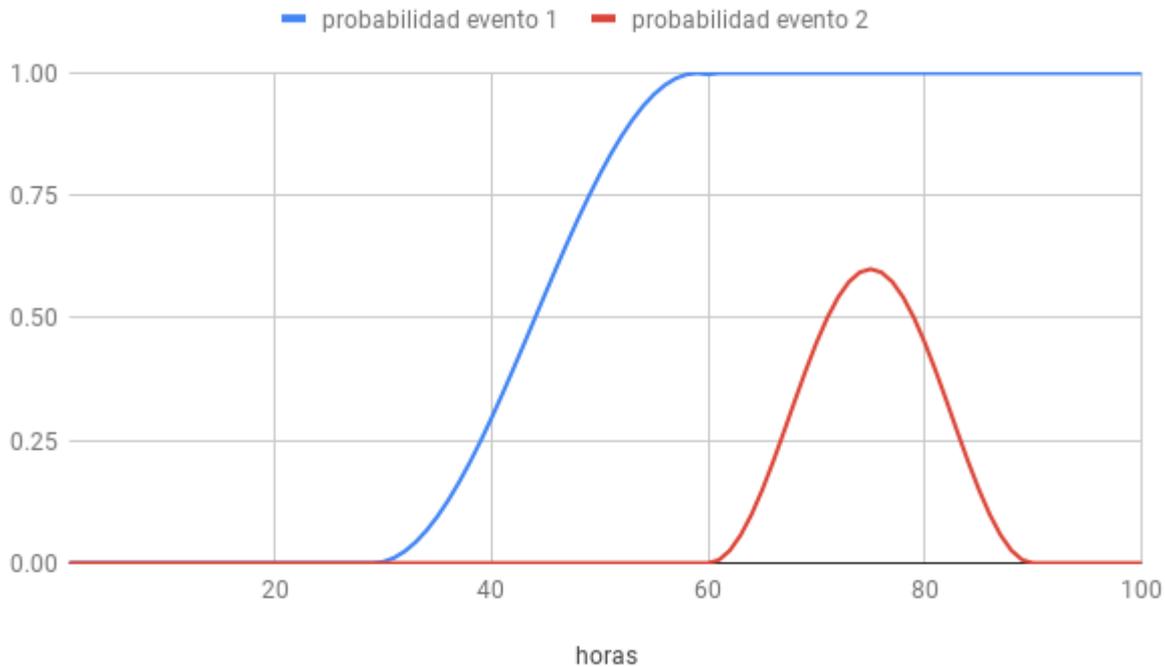
**Calibración:** Todos los pronósticos mencionados arriba pueden ser calibrados o no. Esto consiste en cotejar los pronósticos con las observaciones correspondientes a través de una verificación y de esta manera obtener una *función de transferencia* con la cual se “adapta” el pronóstico crudo para que se obtengan las propiedades que se desean (procedimiento generalmente parte del llamado “post-procesamiento”). En el caso de un pronóstico continuo determinístico o con intervalo de confianza, la calibración puede consistir en la eliminación de un sesgo sistemático. **En el caso de un pronóstico probabilístico, la calibración consiste en hacer coincidir el porcentaje pronosticado con la frecuencia observada. Es decir, los pronósticos que anuncian 90% de probabilidades de precipitación, deben corresponderse con verificaciones que registren precipitación en 9 de cada diez casos. Esta es una propiedad muy valorada, y para aquellos que trabajan en temas de riesgo o de estudios costo-beneficio, es la**

**esencia misma de las probabilidades** (más sobre esto en las secciones 4 y 5). Esto no implica que pronósticos sin calibrar no tengan utilidad.

Una aclaración en lo que concierne al término incertidumbre. Cuando se habla de incertidumbre de un pronóstico se puede estar refiriendo a diferentes elementos: En un pronóstico de una variable continua, se puede estar refiriendo a la *estimación* del intervalo de confianza asociado al pronóstico. Este intervalo puede haber sido construido subjetivamente o a través de una verificación como se mencionó anteriormente.

En lo que respecta a pronósticos probabilísticos, la incerteza es un término que no se utiliza de manera unívoca. Por definición, un pronóstico probabilístico tiene menos incertidumbre cuanto más cerca está de cero o de uno. Si la probabilidad climática  $p_c$  de un evento es muy baja (por ejemplo, probabilidad de un tornado en el centro de la ciudad de Santa Rosa) la certidumbre del sentido común de un día cualquiera es que no habrá un tornado. Si el pronóstico de un día específico aumenta la probabilidad pero todavía ésta continúa siendo muy baja, se mantendrá la certidumbre de que el tornado no ocurrirá. Ante estas situación una institución como el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) no emitiría pronóstico de tornado aún siendo más probable que en un día común. Si dicho pronóstico en cambio aumenta la probabilidad a valores más preocupantes (por ejemplo al 20%) la incertidumbre se habrá claramente instalado y las instituciones involucradas tendrán que estar en estado de vigilancia (como se verá en la sección 4, los eventos particularmente peligrosos --mismo si con probabilidad relativamente baja-- conllevan un riesgo grande). Si la probabilidad llegara al 90% estaríamos de nuevo hablando de *cuasi certeza* de que el evento ocurrirá y las instituciones deberían tomar en este caso acciones concretas. También estaríamos en cuasi certeza si las probabilidades volvieran a caer cerca de cero.

**La incertidumbre está definida entonces por el rango que va desde la pérdida de certeza de la no ocurrencia hasta el comienzo de la certidumbre de la ocurrencia.** Este rango se encuentra entre lo que coloquialmente podríamos llamar un “sería muy mala suerte que tal evento ocurra” y un “casi seguro que ocurre”. **Un pronóstico probabilístico típico tiende entonces a sacarnos de la certidumbre de que un evento no ocurrirá. Un pronóstico aún mejor recupera la certidumbre con un anuncio cuasi determinista sobre la ocurrencia o no del evento.** En términos del “preparados-listos-ya”, puede verse que el primer rol del pronóstico probabilístico es introducir, a través de una incertidumbre creciente, atención sobre un fenómeno en particular. A medida que pasa el tiempo y crece la convicción de la ocurrencia del hecho, la sociedad debe prepararse para la acción. De la misma manera, también existe el “preparados”, “listos”, “...desensillar”, en el caso de que la evolución de un pronóstico luego de crear incertidumbre vuelve a generar la certidumbre de la no ocurrencia del evento (ver Figura 2).



**Figura 2:** Esquema de la evolución temporal de la probabilidad para dos casos distintos. En el caso del pronóstico del evento 1 (azul), este solo es detectado a partir de las 30 horas y con el correr del tiempo los pronosticadores incrementan la probabilidad de su ocurrencia. Esta se maximiza cerca de las 60 horas, seguramente poco antes de la ocurrencia del evento. En el caso del evento 2, puede verse que la vigilancia es solo comenzada cerca de las 60 horas y que luego de crecer rápidamente las probabilidades fueron decreciendo hasta la desaparición de las chances del evento. En la práctica, estas probabilidades no son continuas sino que son generadas cada vez que los pronosticadores reciben información nueva.

## 2.2 La importancia de incluir información sobre incertidumbre en el pronóstico

De todo lo anterior se desprende que la incertidumbre es un elemento clave en todo pronóstico, y a pesar de esto todavía es una información no siempre suministrada al público. Hace ya más de cien años que se debate el rol que la incertidumbre debe jugar en los pronósticos, pero este es un problema todavía no del todo resuelto. Crooke (1906) decía ya hace más de un siglo con sorprendente claridad y actualidad:

*Todos aquellos cuyo deber es producir el pronóstico diario saben que hay veces en que se sienten muy seguros y otras en que albergan dudas con respecto al tiempo que se avecina. Me parece que el nivel de confianza del pronosticador forma una parte muy importante de la predicción, y tiene que hallar una manera de expresarse. No es justo hacia el pronosticador que se le asigna igual peso a todos sus pronósticos [...]”.*

Más cerca de nosotros, Gill (2008) discute los beneficios de incluir la incertidumbre en los pronósticos, más allá de la forma en que esta se haga. Lo divide en cuatro categorías diferentes que comentamos abajo:

A - Conocer la incertidumbre ayuda (en teoría) en la toma de decisiones: No hay duda que el usuario tiene su propia estimación de la incertidumbre a partir de su experiencia con el proveedor de pronósticos y por lo tanto no atribuye certeza a los pronósticos recibidos. No obstante, hay indicaciones que una buena estimación de la incertidumbre ayuda a tomar decisiones más apropiadas. Numerosos estudios dedicados a la búsqueda del valor agregado de los pronósticos que incluyen alguna medida de incerteza señalan los beneficios, pero también indican que la complejidad de los mismos --la necesidad por parte del usuario de procesar más información-- disminuyen su potencial. Es importante resaltar que la mayoría de los usuarios no tiene los recursos suficientes como para aprovechar esta información --ya sea modelos que integren esta información, o siquiera intuición desarrollada en este sentido-- lo que hace que la apreciación de su utilidad sea más frecuentemente medida a través de experimentos que de casos reales (ver por ejemplo Marimo y otros 2012, Ramos y otros 2013).

También es sabido que muchos tomadores de decisión desean *evitar* situaciones donde el pronosticador incluye incertidumbre en su mensaje. Por ejemplo, a pesar de la existencia de bibliografía que muestra el valor del pronóstico probabilístico para la industria aeronáutica (ver Keith y Leyton 2007), una compañía aérea Argentina comunicó al personal del SMN que no desean recibir información sobre probabilidad de nieblas, sino un pronóstico categórico SI-NO. Su argumento indica que es el SMN y no el usuario quien está en mejores condiciones de saber si efectivamente lloverá o no. La misma experiencia se tuvo con quejas de pilotos por la utilización de los códigos PROB30 y PROB40, indicativos de diferentes probabilidades de tormentas. Según los pilotos, y utilizando la jerga que les es propia, “el pronosticador no se la está jugando” o “el SMN no se está haciendo cargo”, ya que lo que ellos quieren saber es si efectivamente lloverá o no. Opiniones similares se encuentran entre los que trabajan en el terreno dando respuestas a emergencias en Gran Bretaña (ver Demeritt 2012).

Esto no se reduce a un comportamiento local. Por ejemplo, *The guide to practices for meteorological offices serving aviation* (WMO 2003) estipula que

*El “grupo de probabilidad” debe usarse con precaución. No debe utilizarse para cubrir todas las eventualidades porque esto reduce el valor del mensaje hacia el aviador. El hecho de que las condiciones del tiempo puedan ser diferentes de las pronosticadas es desde un principio incorporado en la planificación de procedimientos. Los usuarios aeronáuticos necesitan mensajes cortos y sin ambigüedades, y el profesionalismo del pronosticador se expresa cuando cambios esperados en la condición del tiempo son omitidos si estos no acarrear importancia operacional.*

Si no se educa al usuario, es probable que éste ignore el mensaje de incertidumbre que se construye con tanto esfuerzo; y esto es aún más grave cuando son los medios los que amputan el mensaje. De todas maneras esta “educación” tiene que hacerse con mucha humildad, porque el formato probabilístico, no debiera ser considerado a priori superior para todos los usuarios (el énfasis en las dificultades de interpretación por parte del usuario, no indica que los propios pronosticadores no encuentren también dificultades, ver por ejemplo Demeritt y otros 2010).

B - Comunicar la incertidumbre ayuda a manejar las expectativas de los usuarios: Los pronosticadores tienen la posibilidad de transmitir la información con la dosis de confianza que ellos creen apropiada y por lo tanto no asumen como propios los errores dependientes de la predictibilidad de la situación meteorológica. Los usuarios así aprenden qué esperar en cada situación.

C - Comunicar la incertidumbre mantiene la credibilidad de los pronosticadores: Hay muchos estudios que muestran que la comunicación de la incertidumbre no disminuye la confianza en el servicio, sino lo contrario, al agregarse una componente de objetividad. Esto es particularmente importante en una profesión que ha lidiado con una marcada falta de credibilidad pública. Para algunos usuarios, como el caso de la compañía aérea mencionada arriba, el agregado de información sobre la incertidumbre puede ser percibido como un método para evadir una responsabilidad. Es importante transmitir a los usuarios que este no es el caso.

D- La incertidumbre de la predicción revela el estado de la ciencia: Una predicción u observación sin una medida de error asociada no tiene demasiado valor. Si bien la comunicación de la incertidumbre es engorrosa tanto en los aspectos técnicos como en los cognitivos, el someterse a una tiranía del determinismo va en contra de siglos de formación científica.

## 3. LA INTERPRETACIÓN DE LA PROBABILIDAD

### 3.1 Problemas conceptuales

La mayoría de los libros dedicados a las probabilidades y estadísticas omiten en sus primeros capítulos una explicación del significado del concepto de probabilidad. Dado que el cálculo probabilístico es independiente de la interpretación que hagamos del concepto esta es dejada a la intuición del lector. Esta ausencia tiene su explicación en que el concepto de probabilidad es mucho más complejo de lo que uno puede creer a simple vista. Sobre esto hay una extensa literatura que lo ha discutido por más de 300 años y que hoy día continúa, y que impacta netamente en nuestra disciplina tanto en los pronósticos meteorológicos como en las proyecciones climáticas. **La discusión sobre la interpretación puede rápidamente tornarse académica y poco pragmática, pero es importante tener un conocimiento aunque sea mínimo de esta clasificación.** Para los interesados en profundizar, tres libros sofisticados que discuten el concepto de probabilidad y su evolución histórica son Hacking (1975), Gillies (2000) y Franklin (2001). Lo que sigue es una discusión tomada textualmente de *Completing the Forecast: Characterizing and Communicating Uncertainty for Better Decisions Using Weather and Climate Forecasts* (NRC 2006), Box 1.1.

#### **Interpretaciones de la probabilidad**

*A pesar de que la probabilidad es frecuentemente tratada como sinónimo de incertidumbre, es mejor descrita como una de las maneras en que la incertidumbre puede ser expresada. El significado de las probabilidades es un área de debate todavía activa, pero a pesar de diferencias en interpretación, la probabilidad es una exitosa medida de la incertidumbre por que el mismo cálculo de probabilidades se aplica independientemente de la interpretación que estemos dando. En de Elía y Laprise (2005) se describen las diferentes interpretaciones de probabilidades y las implicaciones que esto tiene en el contexto del pronóstico hidrometeorológico: estas son la Frecuentista, la Subjetiva y la Propensión. En la interpretación Frecuentista la probabilidad es definida como el límite de un número de muestras arbitrariamente grande de eventos ocurridos, dividido por el número total de la muestra. Aquí la teoría de la probabilidad es legítimamente aplicada únicamente para aquellos fenómenos para los que frecuencias límites son en principio posibles. Esta interpretación usa frecuencias empíricas observadas a partir de series finitas para estimar la en principio imposible de obtener frecuencia del caso límite. Estas estimaciones tienden a hacerse más precisas cuanto más grande es la muestra. Por ejemplo, un jugador de dados que teme que un dado esté cargado debe testarlo una gran cantidad de veces hasta comprobar que cada número sale un sexto de las veces.*

*Otro ejemplo es el de la climatología: la probabilidad de exceder un cierto umbral de temperatura un dado día puede ser obtenido contando el número de veces que este umbral fue pasado en un periodo observacional, luego dividiendo por el número total de años del registro.*

*En ambos casos, la probabilidad calculada con eventos pasados es proyectada en el futuro y se presume válida. Una de las fortalezas de la interpretación Frecuentista es que no deja lugar a la ambigüedad: dos personas analizando el mismo grupo de datos van a producir las mismas estimaciones de probabilidad [...]. Otro problema de esta interpretación es que no es adecuada para pequeñas muestras (el típico caso de los fenómenos extremos) [...].*

*La interpretación Subjetiva es una expresión del grado de creencia de que un dado evento vaya a ocurrir. Si bien es útil para expresar incerteza, la producción de probabilidades*

*subjetivas es difícil de cuantificar con robustez. Si un pronosticador emite 30% de chances de precipitaciones, ¿por qué eligió 30 en lugar de 25 o 35?*

*La probabilidad subjetiva ha sido muy útil para expresar incertidumbre en todo tipo de aplicaciones, por lo que más allá del problema mencionado hay metodologías probadas para su evaluación. Una de las ventajas de este tipo de interpretación es que permite asignar probabilidades para casos de eventos extremos.*

*Aquel que utiliza la interpretación de probabilidades centrada en la propensión argumenta que la “verdadera” distribución de probabilidad existe para todos los eventos, y que los pronosticadores y los pronósticos por ensambles tratan de descubrirla. En el contexto de la hidrometeorología el argumento sería que las leyes físicas ponen límites a los estados que la atmósfera puede realizar y que un conocimiento completo de esas leyes debería permitir correctos pronósticos probabilísticos. [...] El argumento práctico contra esta interpretación [...] sería que, de la misma manera que la incerteza en las condiciones iniciales hace imposible conocer el futuro de manera determinística, un modelo imperfecto del sistema hidrometeorológico hace la futura distribución de probabilidad imposible de conocer, incluso si la distribución inicial es conocida.*

*La estimación y comunicación efectiva de la incerteza en los pronósticos hidroclimatológicos no depende del tipo de interpretación de probabilidad que sea usado, y es probable que los tres tipos sean aplicables para proveer a los usuarios información valiosa. Por ejemplo, el pronóstico por ensambles puede ser motivado por interpretaciones asociadas a la propensión donde los científicos tratan de mejorar la calidad de los modelos y del sistema de pronósticos para producir una función de distribución de probabilidad (PDF) más cercana a la “verdadera” PDF. Una medida de la calidad del pronóstico por ensambles está dada por la comparación con la PDF climatológica Frecuentista, y los pronosticadores usan estas PDF objetivas para guiar sus propias estimaciones subjetivas de probabilidades. Los usuarios también pueden hacer uso de estas diferentes maneras de entender la probabilidad para ayudar en su toma de decisión.*

Posteriormente al mencionado reporte, la interpretación de la probabilidad en lo que concierne al cambio climático también sumó su voz a los debates. Así se la presenta en un documento clave del Reino Unido llamado UKCP09 (Murphy et al 2009, página 13):

*¿Qué queremos decir con probabilidades? Es importante recalcar que las probabilidades discutidas en este reporte no son las mismas que las probabilidades en un juego de azar como los dados. Tiene que entenderse más bien como el grado relativo en el cual cada posible resultado del cambio climático es apoyado por la evidencia disponible, teniendo en cuenta nuestro entendimiento actual de las ciencias del clima y las observaciones. Si la evidencia cambia en el futuro, las probabilidades también cambiarán. Es de esperar que la búsqueda constante de mejorar los modelos climáticos y hacer mejor uso de las observaciones para limitar los posibles resultados de las proyecciones, permitirá reducir las incertezas en el futuro. Esto no obstante, no puede ser garantizado porque la introducción en los modelos de procesos todavía no incluidos [...] o todavía no conocidos podrían tener un efecto contrario.*

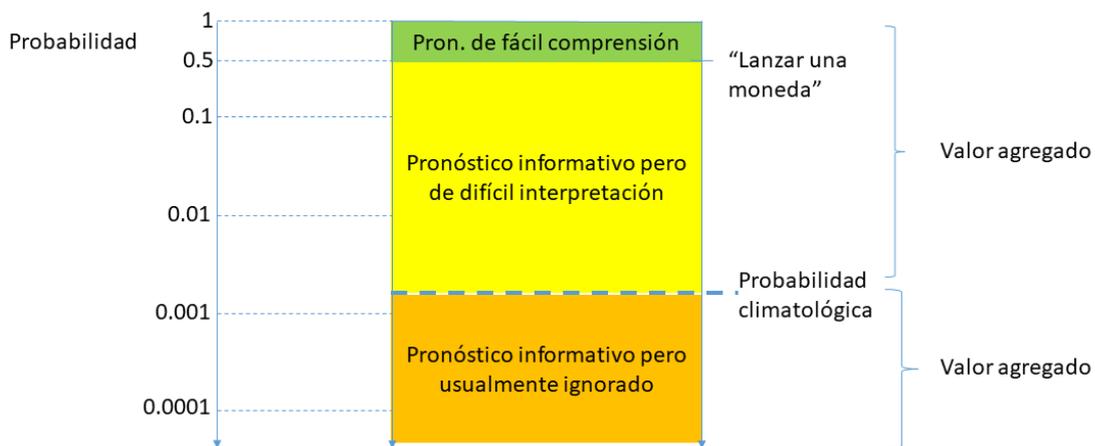
A pesar de la inclusión de este texto en el mencionado documento, las proyecciones climáticas en forma probabilística son infrecuentes por falta de acuerdo en la comunidad (ver Frigg et al. 2013). Es interesante notar que el tipo de interpretación propuesta aquí es semejante a la llamada “interpretación Lógica” de las probabilidades, que dice que la probabilidad de un evento se construye a partir de las pruebas o evidencias que sugieren su concreción (ver Gillies 2000).

Probablemente los pronosticadores meteorológicos no se sientan incómodos con esta definición. .

La interpretación de los pronósticos probabilísticos por parte de los pronosticadores sigue siendo un tema de actualidad, como se lo puede ver en los recientes trabajos de Wilson (2019) y de Fundel y otros (2019). Allí se concluye en **la necesidad de mejorar en los pronosticadores las bases y el entrenamiento para el desarrollo, interpretación y uso del pronóstico probabilístico por ensambles.**

### 3.1 La interpretación de los valores de probabilidad

Independientemente de la interpretación que se haga del concepto, los valores en sí mismos tampoco son de fácil interpretación. La figura 3 muestra el eje de valores de probabilidad entre 0 y 1 en escala logarítmica. El uso de esta escala es necesario porque muchas probabilidades tienen valores muy bajos cuando se trata de hechos infrecuentes. A la derecha del eje vertical de probabilidades se encuentra una descripción del grado de comprensión de estos valores para el usuario y más a la derecha la zona donde se menciona la presencia de “valor agregado” o utilidad para una dada probabilidad de base, “valor de referencia” o “valor climatológico”. Recordar que un pronóstico probabilístico calibrado que difiere del valor climatológico” posee en principio un potencial valor agregado. Este valor agregado no es siempre reconocido, apreciado, utilizado o utilizable.



**Figura 3:** Interpretaciones de pronósticos probabilísticos de acuerdo a su valor numérico. Cualquier pronóstico calibrado que se aparte del valor climatológico característico de un evento es informativo. Si el valor del pronóstico es más bajo que el climatológico tiende a garantizar la no ocurrencia de un evento. Si es mayor que el climatológico nos da información sobre la creciente chance de ocurrencia. Es importante notar que los pronósticos probabilísticos son de más fácil comprensión cuando están por sobre el 50%.

Si un evento tiene probabilidad de recurrencia climática  $p=0,002$ , como en el caso de la Figura 3, una predicción que lleve esta probabilidad a  $p=0,1$  tiene por un lado mucha información agregada, pero por otro tiene un valor tan bajo con respecto a los usos acostumbrados que tiene poco reconocimiento y quizás uso. En general los pronósticos probabilísticos comienzan a ser reconocidos para valores de  $p$  más altos (existe no obstante aquel asociado con  $p=0,5$  de baja reputación porque “es como tirar una moneda”, --más sobre esto se discute en la sección que sigue). Cuando se utiliza un criterio objetivo de toma de decisión (ver sección 5) o se lo pone en contexto de Riesgo (sección 4), esta información tiene más chances de ser utilizada.

Una manera de formalizar estos conceptos es la definición en las dos subsecciones que siguen de dos parámetros asociados a la probabilidad.

### 3.2.1 Representación de la Entropía o Incertidumbre Objetiva

En términos objetivos, cuanto más cercano a 0 ó 1 la probabilidad de un evento, más certera es la situación en que nos encontramos; es decir, más seguros nos sentimos de que un evento ocurrirá o no. Naturalmente esta certidumbre disminuye --o la incertidumbre aumenta-- en situaciones intermedias.

Esta percepción intuitiva ha sido modelada matemáticamente en la Teoría de la información (ver por ejemplo Timme y Lapish 2018) con la llamada Entropía. Para el caso del pronóstico de eventos dicotómicos la Entropía  $H$  está definida como

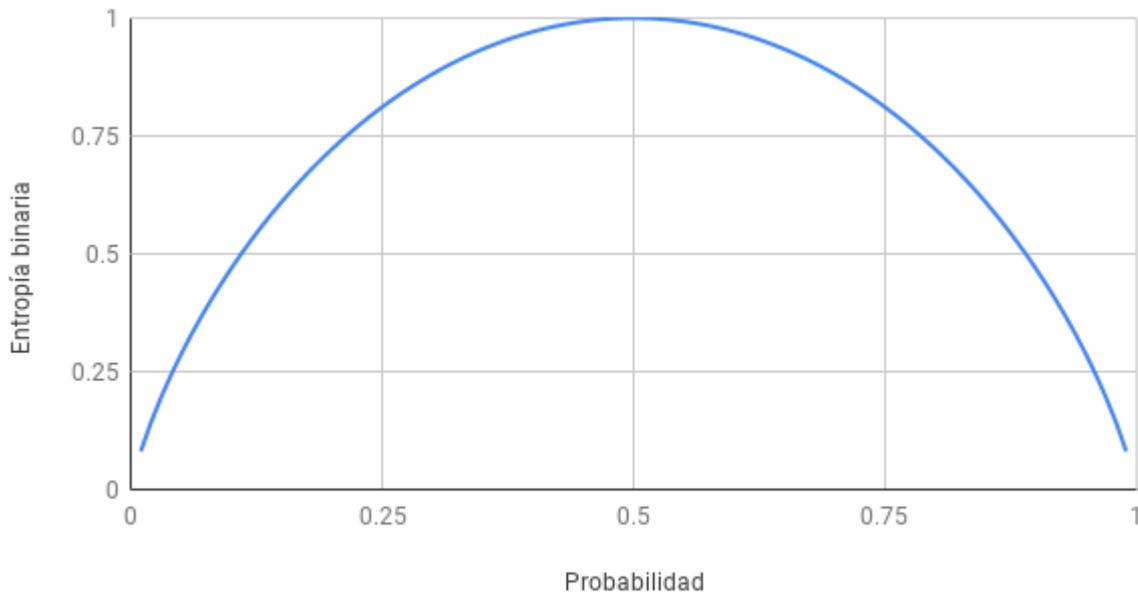
$$H = -p \log_2 p - (1 - p) \log_2 (1 - p),$$

donde  $p$  es la probabilidad de un dado evento, y el logaritmo está definido en base 2, que puede escribirse como

$$\log_2 p = \frac{\log p}{\log 2}.$$

La Figura 4 ilustra que esta función tiene la forma esperada intuitivamente, con valores que tienden a cero para las probabilidades acercándose a cero y uno, donde se puede apreciar su simetría y su máximo en  $p=1/2$ . Esto debe interpretarse de la siguiente manera: en el caso de un evento, -- que como en el caso comentado tiene con probabilidad climática  $p=0,002$ -- es pronosticado con  $p=0,1$ , este pronóstico ha *generado* incertidumbre (nos movemos hacia la derecha en la abscisa de la figura;  $H(0,002)=0,021$  y  $H(0,1)=0,373$ ). Y si un pronóstico posterior produce una probabilidad  $p=0,5$  se habrá maximizado la incertidumbre ( $H(0,5)=1,0$ ). Si bien el valor  $p=0,1$  asociado a un evento peligroso puede ser causa de preocupación, lo más probable es que el evento no ocurra. Ese no es el caso cuando  $p=0,5$  donde las chances de que ocurra o no ocurra son idénticas. Apenas se supera ese valor, la incertidumbre comienza a reducirse, ahora sabiendo que lo más probable es que el evento sí ocurra.

Esta función muestra lo que todos intuimos, por ejemplo, cuando enfrentamos un examen médico periódico en que no esperamos nada en especial: un resultado fuera de lo normal *introduce* incertidumbre que sólo se cierra con más estudios que ayuden al especialista a clarificar su diagnóstico.



**Figura 4:** La función Entropía  $H$  modela la incertidumbre asociada a un valor dado de probabilidad, con mínimos en 0 y 1, y máximo en  $\frac{1}{2}$ .

En el caso en que el pronóstico refiera a, por ejemplo, valores por encima o por debajo de la media (en realidad, la mediana), un pronóstico que se diferencie de  $p=\frac{1}{2}$  produce inmediatamente un decrecimiento de la incerteza.

La función Entropía arriba definida puede extenderse de casos dicotómicos a casos con más categorías, y para el caso con tres categorías (por ejemplo, pronóstico estacional) se la define como

$$H = -p_i \log_2 p_i - p_s \log_2 p_s - (1 - p_i - p_s) \log_2 (1 - p_i - p_s),$$

donde  $p_i$  y  $p_s$  son las probabilidades de las categorías inferior y superior respectivamente. El máximo de esta función se haya cuando tanto  $p_i$ ,  $p_n$  (categoría normal) como  $p_s$  toman el valor de  $\frac{1}{3}$ , que es usualmente el valor de referencia en los pronósticos probabilísticos estacionales presentados en terciles. Cualquier otro valor disminuye la incertidumbre.

### 3.2.2 El concepto de contenido de Información o de “Sorpresa”

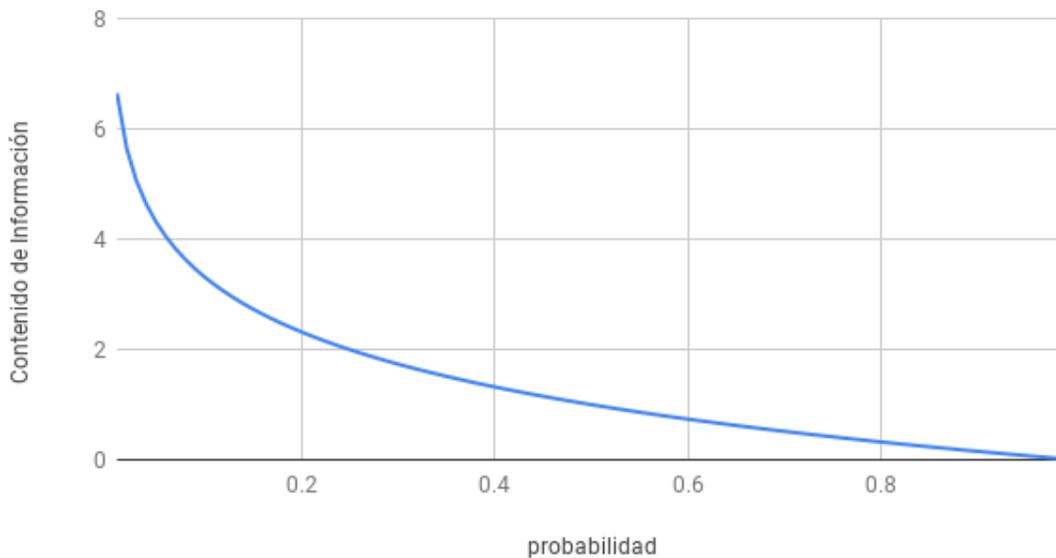
La ocurrencia sin anuncio de eventos infrecuentes suele causar sorpresa y la única manera de disminuir esta sorpresa es con pronósticos apropiados. Una manera de formalizar esa sensación es definiendo la función *Contenido de Información* o *Sorpresa* siguiendo la teoría de información como

$$IC = -\log_2 p ,$$

donde  $p$  es en principio la probabilidad climática del evento de interés, pero también puede aplicarse al valor del pronóstico de este evento. Cuanto más pequeña es la probabilidad climática, más infrecuente el evento y más sorprendente su aparición sin anuncio. La Figura 5 muestra los valores de IC para cualquier probabilidad  $p$ . De aquí puede sacarse una medida de valor agregado --la baja de la sorpresa o la ganancia en el contenido de Información. El aumento en contenido de información de un pronóstico puede escribirse como

$$\Delta IC = \log_2 \frac{p}{p_c},$$

donde puede verse que para  $p > p_c$  hay ganancia de información. **Es interesante notar que, de acuerdo a lo discutido en la subsección anterior, la reducción de la sorpresa viene con un incremento de incertidumbre objetiva (u Entropía) hasta pasado  $p=0.5$ , desde allí en adelante tanto la sorpresividad como la incertidumbre están en disminución.**



**Figura 5:** Valor de la función Contenido de Información para diferentes valores de probabilidad. El objetivo de un pronóstico es reducir la sorpresa generada en la ocurrencia de un evento.

De lo discutido en las secciones precedentes puede verse que existen diferentes ventanas o rangos de valores de probabilidad con propiedades características. Estas se discuten en la Tabla I.

**Tabla I:** Rangos en el valor de probabilidad y sus propiedades.

Probabilidad	Valoración de probabilidad	Descripción
$p_c$	Valor climático	Valor de referencia, en general bajo para fenómenos raros.
$p < p_c$	Valor sub climático	Valor de un pronóstico probabilístico en un periodo en que el fenómeno mencionado tiene menos propensión a ocurrir que en el caso medio (por ejemplo, un tornado en un día con un fuerte anticiclón). Está caracterizado por tener baja Entropía, y baja o alta ganancia en

		Contenido de información, dependiendo de la distancia con $p_c$ .
$p \gg p_c$ y $p < 1$	Valor no accionable	Probabilidades de ocurrencia más altas que la climática, pero todavía lejos de ser de utilidad (por ejemplo, circulación atmosférica medianamente favorable que eleva a $p=0.01$ de un evento usualmente mucho más improbable). Baja Entropía, alta ganancia en Contenido de información, pero $p$ demasiado baja.
$p \gg p_c$ y $p < 0.5$	Valor accionable creador de incertidumbre	Si bien en términos de la toma objetiva de decisiones puede ser de utilidad, este rango de valores es considerado por el público como poco informativo. Mediana Entropía, alta ganancia en Contenido de información, $p$ baja para algunos usuarios.
$p \gg p_c$ y $p \sim 0.5$	50/50	Más allá de que una probabilidad del 50% de la ocurrencia de un evento infrecuente nos provee mucha información para la toma de decisión, en la práctica y alejándonos del concepto de riesgo, es el máximo de incertidumbre (Entropía) posible para un pronóstico. Desde este punto de vista es natural que sea resistido entre los usuarios que no utilizan algoritmos de toma de decisión, mismo cuando el contenido de información es muy alto (ver Demeritt 2012).
$p \gg p_c$ y $p > 0.8$	Valores cuasi-determinísticos	Valores de probabilidad altos son usualmente interpretados como pronósticos categóricos. Mediana-baja Entropía, alta ganancia en Contenido de información.

### 3.2.3 La percepción de las probabilidades

Como fue mostrado en varios trabajos (por ejemplo Hand y otros 2015), en general los valores asociados al pronóstico probabilístico tienden a ser subestimados cuando son probabilidades altas y sobreestimados cuando son probabilidades muy bajas. Es decir, los fenómenos muy raros tienden a verse más frecuentes de lo que en realidad son e inversamente los altamente frecuentes menos frecuentes de lo que son. Esta dificultad cognitiva de los seres humanos puede hacernos replantear la necesidad de producir para el público valores de probabilidad precisos, sobre todo cuando se acercan a los extremos del intervalo de probabilidades.

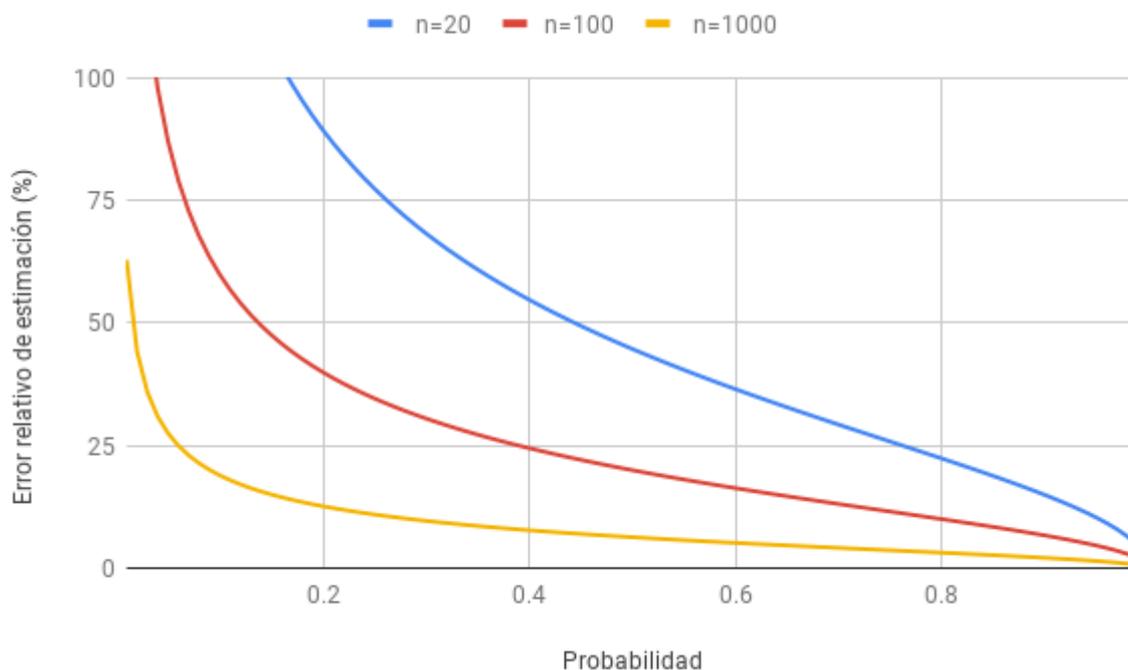
### 3.3 La estimación de las probabilidades

Además de los mencionados problemas de *interpretación* también existe el problema de *estimación* de las probabilidades. Siendo la interpretación Frecuentista clave en estos desarrollos, generalmente podemos pensar la probabilidad como un cociente entre casos a favor sobre casos totales. Es claro, entonces, que para obtener probabilidades muy bajas se necesitan muchos datos, aún más si se quiere tener robustez estadística (que el valor no sea demasiado dependiente del tamaño de la muestra). El error relativo  $Er$  de estimación de una frecuencia o probabilidad puede ser aproximado por

$$Er = 200 \sqrt{\frac{1-p}{pn}}$$

donde  $p$  es la probabilidad estimada y  $n$  el tamaño de la muestra, el factor 100 proviene de la transformación en porcentaje y el factor 2 de considerar las dos direcciones del intervalo de confianza cubriendo un 70% de los casos (se puede deducir de la página 265 de Schaefer y McClave 1990).

En realidad, esta estimación no es precisa para valores de probabilidad cercanos a cero y uno pero da una idea de lo “caro” que es dar probabilidades precisas (hay mejores aproximaciones pero son complejas, ver por ejemplo Agresti y Coull 1998). La Figura 6 ilustra el error relativo en la estimación de la probabilidad para todos los valores del intervalo y para diferentes tamaños de muestra  $n$ . Esta función es altamente asimétrica con valores bajos de error cuando la probabilidad es cercana a 1 y tienden a infinito cuando nos acercamos a  $p=0$ . Esto muestra claramente las necesidades de tener grandes muestras si se ambiciona obtener valores de probabilidad bajos. Por ejemplo, para estimar una probabilidad de  $p=0.1$  con 100 miembros (curva roja) se obtiene un error relativo de estimación de más del 50% (lo que daría un intervalo de confianza de  $\pm 0.05$ ). El caso de 20 miembros, típico en pronósticos a pocos días por ensambles muestra que  $p=0.1$  tiene un error muy grande que excede el 100% ( $\pm 0.1$ ).



**Figura 6:** Error relativo de estimación de probabilidades para diferentes tamaños de muestra  $n$ . Se puede ver que para probabilidades cercanas a 1 los errores de estimación son mucho menos importantes que para las probabilidades muy bajas, independientemente del tamaño de la muestra.

### 3.4 Malos entendidos asociados a las probabilidades

La Figura 7 ilustra otro problema de interpretación asociados a los pronósticos probabilísticos: ¿A qué refiere exactamente? Como se puede ver allí, los receptores del mensaje parecen no coincidir en esto. **Dependiendo del fenómeno, no siempre es fácil saber a qué exactamente se refiere un pronóstico sin conocer el mecanismo de verificación.**

Este es un tema en que el emisor del pronóstico debe hacer lo posible para poder transmitirlo correctamente. En los casos de pronósticos de fenómenos muy complejos --como el de granizo-- es probable que la misma institución que produce el pronóstico no lo tenga claro.

<i>Interpretación del pronóstico</i> "Hay una probabilidad de precipitación de 60% para mañana"	<i>Porcentaje de respuestas</i>
Lloverá mañana en el 60% de la región	16%
Lloverá mañana durante un 60% del día	10%
Lloverá en 60% de los días como mañana *	19%
El 60% de los pronosticadores creen que lloverá mañana	22%
No sé	9%
Otros	24%
<i>*De acuerdo a la interpretación de Gigerenzer y otros (2005), esta es la interpretación correcta teniendo en cuenta como las probabilidades de precipitación son verificadas.</i>	

**Figura 7:** Interpretación de la probabilidad de precipitación según un trabajo de Morss y otros (2008). Respuesta a la pregunta sobre el significado del pronóstico "Hay una probabilidad de precipitación de 60% para mañana", con una muestra de 1330 personas. Las opciones son provistas por el entrevistador. Otro ejemplo de esta discusión puede verse en Tak y otros (2015).

### 3.5 Precisión y calibración de pronósticos probabilísticos

Los pronósticos cuantitativos expresados en probabilidades son víctimas de un "pecado original" del que es difícil extraerse. Este se hace más evidente cuando se usan porcentajes (e.j. 80% de probabilidades de precipitación). Este porcentaje --le guste o no al pronosticador-- transmite una aparente precisión hacia el usuario: "Si dicen 80% no es ni 79 ni 81", o al menos "Si dicen 80% no es ni 75 ni 85". Esto no es necesariamente lo que piensa el pronosticador, que en su mente puede tener muchas menos "categorías" en las que se siente confiado que en las 100 que está obligado a utilizar en términos de porcentaje.

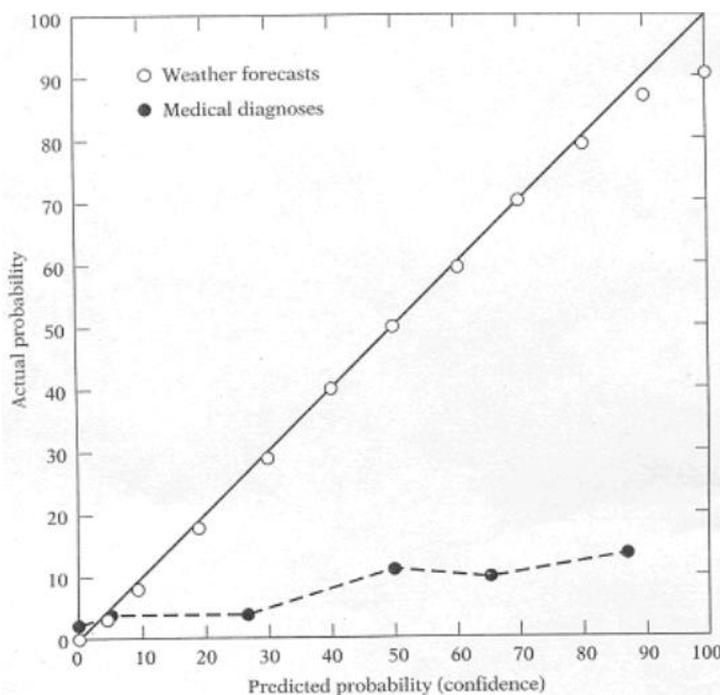
En términos de porcentajes puede pensarse que cada categoría corresponde a un intervalo de porcentajes, no a un valor específico. Estos intervalos tienen importancia a la hora de verificar los pronósticos y de estimar si son calibrados o no. Sin embargo, es importante tener en cuenta que para ciertas interpretaciones y usos de las probabilidades el concepto de intervalo puede no ser práctico o directamente no tener sentido. Más aún, si la probabilidad se la usa como estimador por excelencia de la incertidumbre, hablar de incertidumbre en el valor de la probabilidad comienza una cascada sin fin (¿por qué no tener un intervalo de confianza para los valores del intervalo de confianza?). En la comunidad que se interesa en estos temas se debate la necesidad o no de utilizar "probabilidades de segundo orden" --o probabilidades de probabilidades-- (ver por ejemplo Weatherford 1982). Es por eso más recomendable decidirse por un "granulado" del rango de 0 a 100% y manejarse con valores específicos (por ejemplo 0, 10, 20, etc).

Al aceptar expresarse en términos probabilísticos uno acepta no sólo la cuantificación --que esta es posible, que es más conveniente y más objetiva-- sino también implícitamente que lo hace dentro de un marco donde la verificación y la posterior calibración son esenciales. Para que un pronóstico probabilístico no sea más que una cifra sin contenido, este debe ser calibrado. Es decir, que cuando uno anuncia que hay 80% de chance de un fenómeno dado, la estadística nos muestre que efectivamente ese evento ocurrió en el 80% de los casos pronosticados de esa manera (nota: es importante remarcar que la probabilidad calibrada es condicional al método elegido, por lo cual un mismo fenómeno puede tener dos pronósticos calibrados con valores distintos pero de igual habilidad en un sentido estadístico). Esta calibración puede ser tanto

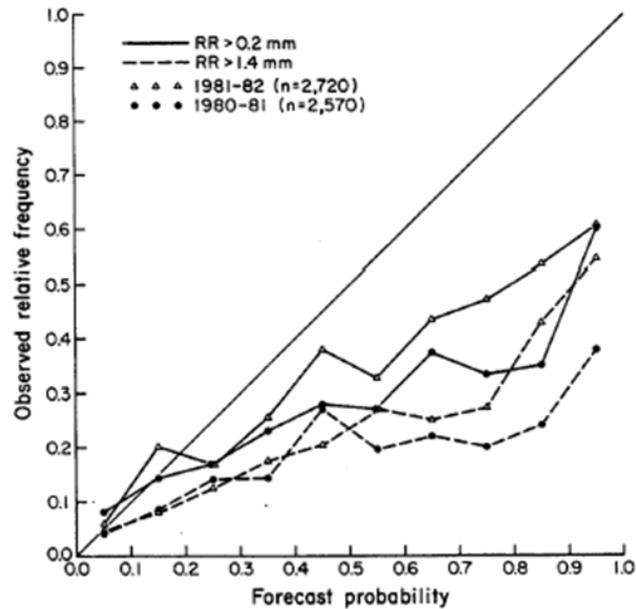
subjetiva como ser el resultado de un sistema de posprocesamiento de la información. Evidentemente desvíos leves por sobre la calibración no son graves, pero sin verificación uno puede tener grandes desvíos (ver caso de los médicos clínicos en Figura 8 y el aprendizaje de los meteorólogos en Figura 9). **En el pronóstico probabilístico cuantitativo es entonces esperable que haya verificación y calibración.**

Las dificultades de la verificación (y por lo tanto de la calibración) no se agotan con la emisión de pronósticos cuantitativos. Un servicio meteorológico tiene la responsabilidad de emitir pronósticos para todo un país, sin embargo será capaz de verificarlo solamente en lugares puntuales con mediciones in situ. Esta dificultad se supera asumiendo cierta uniformidad en el clima cercano a las estaciones de observación, por lo que la verificación puntual tiene el valor de una verificación en la región. Esto es válido cuando las regiones son homogéneas; de no serlo, estaciones de observación adicionales son necesarias. Variaciones del clima en cortas distancias que obligan a aumentar la densidad de observaciones suelen ocurrir en terrenos cercanos a topografía o cuerpos de agua.

Para eventos de baja ocurrencia y de alta variabilidad espacial -- como el granizo--, una red poco densa de observación implica la colección de una estadística demasiado pobre como para realizar verificaciones de utilidad. Esto implica necesariamente que siguiendo esta metodología los pronósticos no tienen chance de mejorarse a través de la auto corrección de los pronósticos emitidos. Este problema apenas disminuiría si uno doblara o cuadruplicara el número de estaciones. El uso de sensores remotos y tecnologías asociadas a las redes sociales pueden ser una solución a este problema, como se menciona en Lohigorry y otros (2018).



**Figura 8:** Curvas de calibración de pronosticadores meteorológicos para el caso de precipitación (círculos vacíos) y diagnósticos de neumonía hecho por médicos (círculos llenos). Se puede ver como los pronósticos de lluvia son casi perfectamente calibrados mientras que los médicos muestran un enorme exceso de confianza. Cuando anuncian un diagnóstico con 90% chances de ser neumonía, los casos donde la enfermedad se confirma apenas superan el 10%. Los datos sobre los pronosticadores meteorológicos provienen de Murphy y Winkler (1984), mientras que los datos médicos provienen de Christensen-Szalanski y Bushyhead (1981).

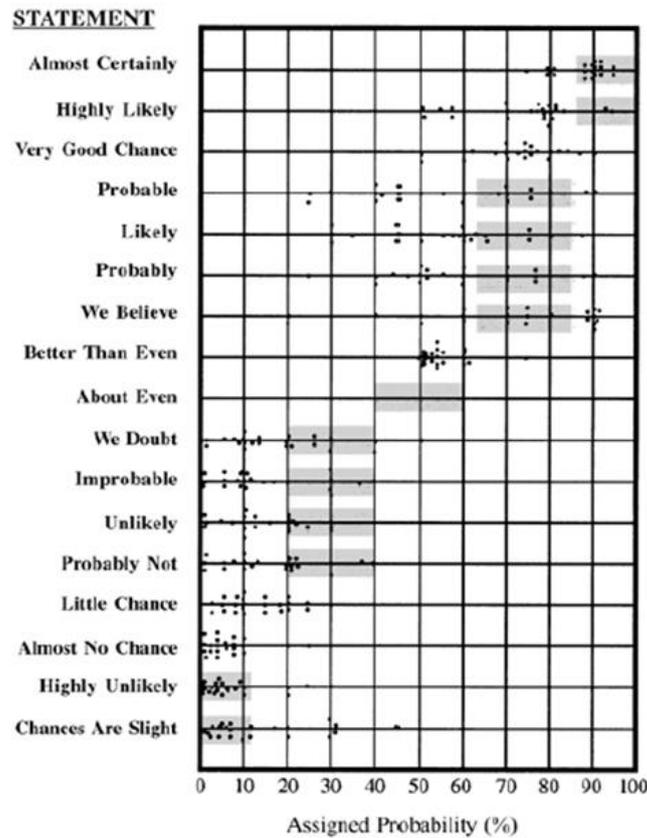


**Figura 9:** Evolución en la calibración de pronósticos de lluvias para los primeros dos años de jóvenes pronosticadores. El primer año en línea de puntos y el segundo en línea llena, más cerca de la perfecta calibración (diagonal). Cada año incluye resultados de más de 2500 pronósticos. Se puede ver como con el aprendizaje de los propios errores se puede tender a un pronóstico calibrado, mismo si subjetivo (sacado de Murphy y Daan 1984).

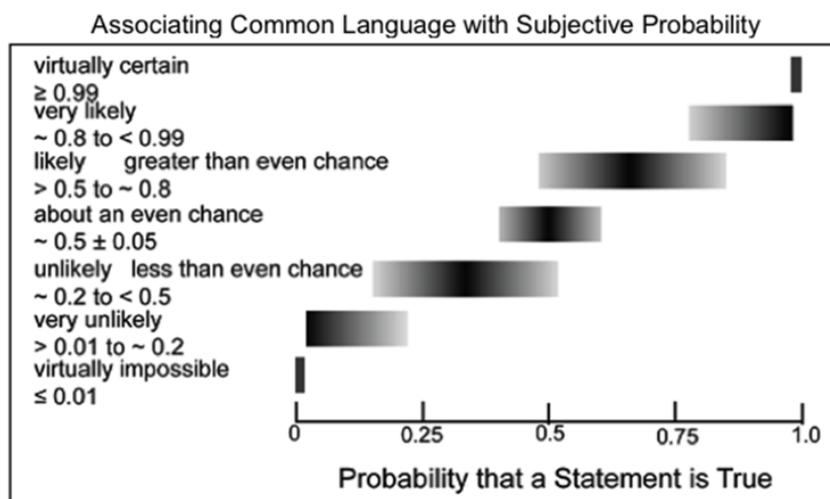
### 3.6 Terminología cualitativa

Una manera de evitar las dificultades asociadas a la falta de comodidad de mucha gente con sutilezas aritméticas, es la utilización de pronósticos que a través de palabras que den una idea intuitiva de la incertidumbre asociada al pronóstico. El SMN ha utilizado mucho este lenguaje en sus pronósticos al público. Desafortunadamente muchos estudios muestran que esta manera de transmitir la información es inherentemente ambigua y que por lo tanto la comprensión del receptor puede no coincidir con la voluntad del emisor (ver Figuras 10 y 11).

En general estos estudios se concentran sobre la falta de comprensión del usuario pero no sobre las necesidades del pronosticador. Hay muchas ocasiones en que un pronosticador no se siente cómodo emitiendo cifras que dan una cierta idea de precisión (por ejemplo, 80% de probabilidad). En este caso expresiones como “alta probabilidad” pueden darle cierta tranquilidad. Lamentablemente, si este tipo de frases no se asocian eventualmente con intervalos de probabilidad, los pronósticos no pueden ser ni verificados ni utilizados en tomas de decisión optimizadas. Esto naturalmente atenta contra el progreso del pronóstico.



**Figura 10:** Equivalencia entre términos que denotan incerteza y valores cuantitativos de probabilidad. A los participantes de un experimento se les pide asociar una palabra de la lista con un rango de probabilidades. Notar cómo cada término es asociado con un amplio rango de valores. El más amplio de estos rangos lo tiene la palabra “probable”, entre 20 y 90% (ver Heuer 2005).



**Figura 11:** Interpretación en términos cuantitativos de palabras recomendadas para transmitir nociones de incertidumbre en relación al cambio climático. Notar la superposición de intervalos. Tomado de Granger Morgan y otros (2009).

### 3.7 ¿Puede un pronóstico probabilístico estar errado?

Dependiendo del tipo de encuadre metodológico en que se los piense, los pronósticos se verifican e interpretan de manera distinta. En el caso de pronósticos categóricos deterministas, por ejemplo “llueve” o “no llueve”, es evidente que si la definición del evento “lluvia” es clara y verificada con observaciones de lluvia en el lugar correspondiente, habrá pronósticos acertados y pronósticos errados.

Los pronósticos probabilísticos se rigen por otra lógica. Cuando uno anuncia 80% de probabilidad de tormentas, no hay acierto ni fallo esperable como resultante. Es posible, no obstante, que el receptor del pronóstico tienda a entender que “se pronosticaron tormentas y no hubo”. En realidad, los pronósticos probabilísticos se verifican estadísticamente y, como se dijo antes, lo que se le pide a este tipo de pronósticos son tres cosas:

1- que haya verificación: que el evento esté bien definido, que su ocurrencia sea observable y que se practique la verificación en sentido estadístico con suficiente cantidad de casos.

2- que sea calibrado (en inglés usualmente referido como “reliable”): que en promedio, cuando se anuncia 80% probabilidades de tormentas, se verifiquen estas aproximadamente en el 80% de los casos. Esta calibración puede ser innata al sistema o lograda con postprocesamiento.

3- que se aleje de la probabilidad climática  $p_o$  lo más posible: producir pronósticos más “agudos” (usualmente se usa el término inglés “sharp”, siendo el caso ideal pronosticar únicamente  $P=0$  o  $P=1$ ). Ver Figura 12.

Dadas las primeras dos condiciones, un pronóstico es mejor que otro si y sólo si en general produce pronósticos más “agudos”, como se muestra en los ejemplos de la Figura 12. Un valor cercano a 100% o a 0% de probabilidades calibradas habla de un evento con poca incertidumbre (casi seguro que sí, y casi seguro que no, respectivamente), mientras que los valores intermedios revelan situaciones con menos claridad.

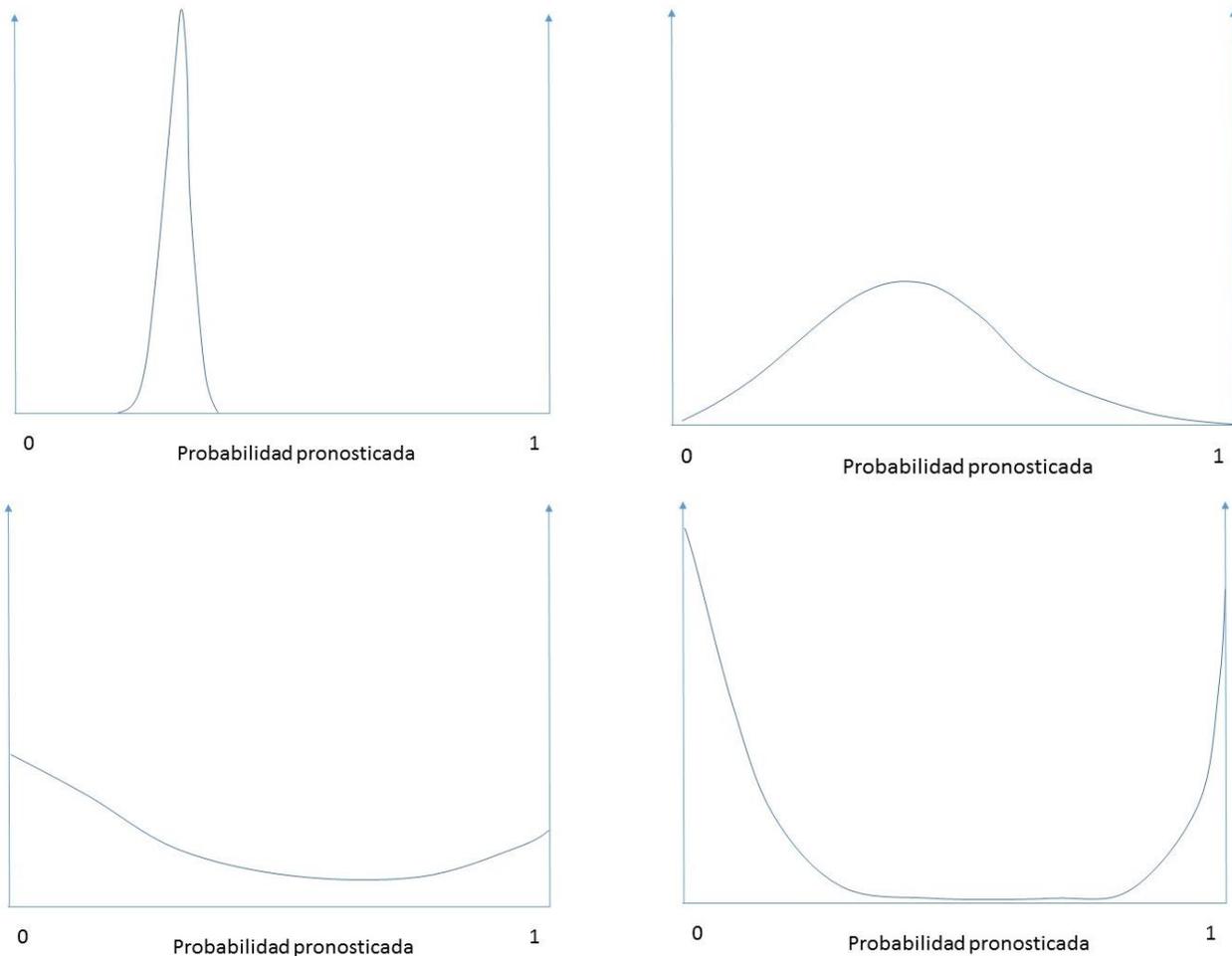
## 4. EL CONCEPTO DE RIESGO

El nivel de incertidumbre de un pronóstico no es la única ni la más completa manera de caracterizar un pronóstico. En general uno también puede pensar un pronóstico con incertidumbre asociándolo a sus efectos y expresarlo en términos de niveles de riesgo  $R$ , y definirlo como

$$R = p L ,$$

donde  $p$  es la probabilidad del evento y  $L$  las pérdidas asociadas. Esta es una definición muy común del concepto de riesgo y es utilizada en muchos sectores, desde las compañías de seguros hasta la gestión de situaciones que presentan peligros para la población (ver por ejemplo Schneider 2002).

Esta medida da una apreciación más justa de lo que se pone en juego ante la posibilidad de un evento dado. Si hay alguna probabilidad de un evento intrascendente (asociado a pocas pérdidas), uno puede hablar de bajo riesgo. En este caso la incertidumbre asociada no tiene mucha relevancia. Pero si existe una probabilidad no despreciable de una gran catástrofe (riesgo alto), la perspectiva del evento toma gran importancia y las respuestas del SMN y los organismos de defensa civil serán seguidas con gran atención.



**Figura 12:** Diagrama de frecuencias (o histogramas) de la probabilidad pronosticada para cuatro hipotéticos sistemas de pronóstico diferentes, que van desde el caso en que la probabilidad está centrada en un pico (probabilidad climática) y difiere poco de este (arriba a la izquierda), hasta cuando los pronósticos son casi determinísticos ya que están muy cerca de cero o uno (abajo a la derecha). El primero no provee casi información agregada con respecto a la probabilidad climática, mientras el último es el que más información provee. Notar que se asume un pronóstico calibrado; en caso contrario las distribuciones mostradas no tienen relación con la calidad del pronóstico.

Es importante notar que la probabilidad  $p$  dentro de la expresión de riesgo puede ser pensada tanto como la probabilidad climática del evento o como la probabilidad pronosticada para un momento específico (que varía de pronóstico en pronóstico) obtenida a través de un sistema de pronóstico calibrado. En el primer caso, el riesgo es una constante ya que ambos factores lo son. En el segundo caso el riesgo fluctúa con el correr de los días a medida que el pronóstico sugiere que un evento sea más o menos probable que su climatología. En todos los casos es clave definir correctamente el evento para poder asociar probabilidades y pérdidas.

La definición matemática de riesgo no es completamente arbitraria sino que es una buena aproximación al comportamiento humano. En general no somos neutros a las pérdidas al apreciar una probabilidad. Una

probabilidad de  $\frac{1}{6}$  en un juego de dados nos parece baja mientras que  $\frac{1}{6}$  en una ruleta Rusa intolerablemente alta. La definición de Riesgo ayuda a “modelar” esta diferente apreciación.

El concepto de riesgo es muy útil para elaborar el sentido de los pronósticos probabilísticos. Primero puede verse la importancia de la calibración de los mismos ya que un exceso de confianza --probabilidades muy altas en eventos que finalmente no ocurren-- puede generar alarmas muy costosas (esta es prácticamente la definición de “alarmista”). Segundo, **es claro que un pronóstico probabilístico que supera en mucho la probabilidad climatológica aumenta de la misma manera su riesgo, mismo si la probabilidad es baja. Por ejemplo, un pronóstico que nos da 10% de chances de la aparición de un tornado F5 puede parecer una probabilidad baja; sin embargo es posible que el riesgo con respecto a un día común –el valor agregado-- sea 100.000 veces más alto** (este último número es una cruda estimación inspirada de Krocak y Brooks, 2018). Como en el caso de la ruleta Rusa discutido arriba, el alto riesgo hace crecer la sensación de incertidumbre que en principio uno no le atribuye a una probabilidad de 10%.

Interesantes discusiones sobre el concepto de riesgo asociado a eventos meteorológicos pueden verse en Marin Ferrer y otros (2017), El sitio web del grupo de NCAR Weather Risks and Decisions in Society (WRaDS, <https://www.mmm.ucar.edu/wrads>) es un buen sitio también en donde recabar información.

Es importante mencionar que cuando se discutió el concepto de Entropía se lo llamó también Incertidumbre objetiva. La inclusión de la palabra “objetiva” apunta a diferenciar de una incertidumbre psicológica que es mucho más dependiente de este concepto de riesgo. Claramente la incertidumbre que tiene en cuenta el riesgo no posee la curva simétrica presentada en Figura 4, sino que ante un riesgo alto uno espera la incertidumbre crecer violentamente apenas la probabilidad adquiere valores de un dígito. Para una discusión sobre este punto de vista ver van der Bles y otros (2019).

## 5. EL VALOR DE UN PRONÓSTICO

El valor de un pronóstico no tiene una relación unívoca con su calidad. Si bien el término “valor” puede tener diversos significados, en general **se considera que un pronóstico tiene valor si afecta positivamente la toma de decisión de los usuarios**, y que a raíz de estas decisiones los mismos pueden obtener una disminución de las pérdidas previstas (si se trata de un evento negativo como una helada), aprovechar posibles ganancias (como un vendedor de helados frente a una ola de calor), o la protección de la vida humana (gente practicando deportes al aire libre en un día con tormenta eléctrica).

En las situaciones que dependen además de otras variables que exceden la meteorología, este tipo de decisiones son frecuentemente modeladas con análisis basados en la teoría de la Utilidad Esperada (en inglés *Expected utility theory*, ver Baron 2000).

En general el caso típico puede describirse de la siguiente manera: Un productor agropecuario A es sensible a un tipo de evento (por ejemplo helada) y el pronóstico anuncia la probabilidad de este evento la mañana siguiente. Sus opciones son actuar para prevenir daños en la plantación (prender calentadores, regar, etc) o no hacerlo. Los preparativos para esta acción tienen un costo que el productor debe asumir. Está claro que sería malo para sus finanzas hacer estos preparativos todas las noches o incluso todas aquellas en que hubiera la más mínima amenaza de helada. ¿qué es lo que debe hacer? La teoría dice que debe actuar --en promedio para el largo plazo-- de tal manera que el costo de sus operaciones sea menor que el de la amenaza. En el caso de pronósticos probabilísticos esto se asocia a actuar cuando la probabilidad del evento pasa un umbral específico y tiene como valores asociados el costo total de la amenaza concretada, y el costo de la protección de los bienes (un interesante y sofisticado ejemplo sobre pronósticos probabilísticos puede verse en un estudio sobre lanzamiento de vehículos aeroespaciales por el Programa Espacial Brasileño en Caruzzo y otros 2018).

Si bien estos cálculos para optimizar la toma de decisión son muy informativos sobre el proceso de decisión, son en general muy complejos, poco prácticos y tampoco siempre representativos de lo que la gente desea. Por ejemplo, personas que tienden a tener actitudes más bien conservadoras, o contrariamente, arriesgadas, pueden no encontrar los resultados satisfactorios con respecto a su percepción de la situación. Por esta razón el valor de un pronóstico rara vez puede medirse de manera tan analítica.

Esto hace que los algoritmos que llevan a la toma de decisión que incluye información meteorológica pueden tener consecuencias independientemente del nivel de precisión del pronóstico y más allá de lo que piense el pronosticador sobre el evento pronosticado. De esta manera un valor dado de probabilidad es interpretado (o, mejor dicho, *accionado*) diferentemente por cada usuario a partir de su experiencia (su algoritmo informal) o a través de un proceso de decisión complejo (algoritmo formal).

Al inicio de esta sección se discutió la necesidad de que los pronósticos formen parte de la toma de decisión para acceder a tener un valor medianamente cuantificable. La Tabla II muestra un desglose más específico de las necesidades que debe cumplir la cadena de transmisión de un pronóstico para satisfacer las necesidades del cliente. Como se puede ver, a la calidad del pronóstico en las variables específicas que necesita el usuario, se le suman otras etapas que tiene que ver con el acceso a la información, la comprensión de la misma, la habilidad de responder a tiempo o de influir en la toma de decisión y la efectividad de las medidas que se toman. En los puntos mencionados, el productor del pronóstico tiene un decreciente control sobre el éxito de cada etapa de la cadena, pero no obstante tiene un rol a jugar en las mismas (incluso en la última: por ejemplo, el SMN en sus advertencias de olas de calor da indicaciones con respecto a las acciones a tomar, ver <https://www.argentina.gob.ar/salud/desastres/cuidados-oladecolor>).

**Tabla II:** Diferentes etapas en la transmisión de la información que deben cumplirse exitosamente para maximizar el valor de un pronóstico. La columna de la derecha indica, para el caso específico del transporte terrestre estudiado por Nurmi y otros (2013), el porcentaje de satisfacción de cada ítem. Por ejemplo, la quinta fila indica que solo el 40% de los usuarios recibió esta información con suficiente antelación como para responder a tiempo a la misma.

<i>Etapas de la transmisión de la información</i>	<i>Comentarios</i>	<i>Satisfacción para transporte terrestre (Numi y otros 2018)</i>
Calidad del pronóstico	Calidad dependiente de scores específicos al usuario	86%
Acceso por parte del usuario	¿Libre, fácil acceso?	75%
Comprensión de la información por parte del usuario	Problema de formato/ conocimientos / creencias a priori	85%
Habilidad del usuario de responder a tiempo o de influir en la toma de decisión	Oportuna recepción del pronóstico y convicción de actuar del usuario	40%
Efectividad de la toma de decisión en lo que respecta costos o beneficios	Conocimiento profundo de su actividad	80%

## 6. CONSTRUCCIÓN Y DECONSTRUCCIÓN DE UN PRONÓSTICO

La complejidad de los pronósticos probabilísticos queda expuesta por el hecho de que una simple expresión frecuentemente empleada por los servicios meteorológicos, conlleva varias preguntas asociadas. La tabla III muestra algunos puntos discutidos anteriormente para el caso de un pronóstico muy típico.

**Tabla III:** Lista de elementos clave para el análisis y la generación de un pronóstico probabilístico. El caso ilustrado es sólo un ejemplo y no se refiere específicamente a pronósticos operacionales del SMN.

<b>“Para la Capital: durante la tarde, 60% de probabilidad de chaparrones”</b>	
<b>Cuándo</b>	La Tarde es un concepto claro, pero un período sin definición precisa. En caso de querer calibrarse, se necesita definirlo mismo si no es transmitido a la población.
<b>Dónde</b>	Dependiendo de cómo se calibra el pronóstico (objetiva, subjetivamente, o si no se calibra), el término “Capital” puede significar “en cualquier lado de la Capital”, “en algún lado de la Capital”, “sobre las estaciones del SMN de la Capital”, etc. Seguramente el público está pensando en un lugar específico.
<b>Qué fenómeno</b>	Chaparrón, se esperan lluvias intermitentes (uno, dos, tres...). No grandes tormentas. Para calibrarlo, debe estar bien definido, por ejemplo a través de cantidad total de agua caída o de la intensidad durante un período.
<b>Incertidumbre asociada al valor de probabilidad</b>	Bastante alta, lejos de 100 y de 0%. No es lo que espera el público. La Entropía H ayuda a dar una medida objetiva sobre la incertidumbre asociada.
<b>Precisión de la probabilidad</b>	Esto no lo sabemos. Ya sea porque se utiliza un número bajo de ensambles o porque es realizado de manera subjetiva, el valor “60%” podría más bien considerarse como un intervalo de valores alrededor de 60 (por ejemplo 55 a 65). Es probable que la comunicación de este rango solo dificulte la interpretación de probabilidad, ya que en algunos casos ni siquiera tiene sentido.
<b>Qué se entiende por probabilidad</b>	Los pronosticadores saben de dónde ha surgido este valor de probabilidad. Si fue utilizando un ensamble o es subjetivo, o una mezcla de ambos. También saben si por razones extra-científicas han decidido modificar ese valor, por ejemplo “para cubrirse” de posibles reacciones del público. En términos de ensambles diríamos que “un estado de la atmósfera como el de hoy puede evolucionar de tal manera que mañana a la tarde puede llover o no”. Alrededor del 60 % de los miembros dicen que sí. Si no trabajamos con ensambles pero con más de un modelo, podemos decir que “algunos dan lluvia y otros no y que el pronosticador por su experiencia en casos semejantes elige el valor 60%”. La experiencia del pronosticador con cada caso particular es relativa, y se nutre de análogos no tan parecidos.

<b>Calibración (sí/no y cómo)</b>	El mensaje no aclara si la probabilidad es calibrada ni cuantos datos se utilizaron para esta calibración (esto afecta la precisión discutida arriba).
<b>Probabilidad de referencia</b>	Probabilidad climática de tardes con chaparrones en este mes ( $p_c$ ). Solo es posible de definir bien si el evento está bien descrito (tres primeras categorías de esta tabla). El mensaje no menciona la referencia, pero la población puede llegar a tener una idea intuitiva de este valor.
<b>Valor agregado</b>	Asumiendo una $p_c=10\%$ , un pronóstico con probabilidad de 60% es un incremento sustancial. Para estimar este valor agregado se puede utilizar la función de Contenido de Información IC. Si bien un porcentaje de 60% contiene una alta incerteza, el mensaje contiene abundante valor agregado.
<b>Riesgo</b>	Depende del usuario, pero al no ser un fenómeno extremo el pronosticador supone poco riesgo para los ciudadanos. No tiene entonces alertas asociados ni la presión de llamar la atención al público.
<b>Costo / beneficio</b>	Depende del usuario, de quién tome decisión con esta información. La expresión "60% de probabilidad" tiene bastante incerteza por lo que las tomas de decisiones con esta información estarán lejos de ser satisfactorias.
<b>Cómo se verifica</b>	La verificación tiene influencia en muchas de las categorías mencionadas arriba. Por ejemplo, si un pequeño chaparrón detectado en el radar en alguna zona de la ciudad se toma como verificación positiva, esto es equivalente a decir que el pronóstico anuncia los "60% de probabilidades" para "algún lugar de la Capital." Si en cambio, se verifica únicamente con la estación del Villa Ortuzar, al centrarse en un punto específico es equivalente a definirlo para todo punto de la región. Esta definición no solo modifica la interpretación del "dónde", sino también la probabilidad climática y el valor específico que saldría de la calibración.
<b>Dificultad de la verificación</b>	El chaparrón es un fenómeno recurrente lo cual no solo da muchos datos para verificar, sino también buen sentido intuitivo para lograr una calibración subjetiva. La verificación del aspecto espacial no es tan simple y debe hacerse con cuidado.

Como se puede ver en la Tabla III, la lectura de un simple pronóstico probabilístico conlleva en verdad mucha información sobre la cual uno puede hacerse preguntas. Algunas de estas rozan lo académico, mientras que otras dependen de una respuesta para alcanzar una interpretación más acabada. El hecho de que muchas de estas preguntas permanezcan sin respuesta tanto en la cabeza del pronosticador como en la del usuario indica que más allá de esta imprecisión es posible que los pronósticos siguen siendo de utilidad, mismo si lo cuantitativo resulta en realidad puramente decorativo.

## 7. DISCUSIÓN

Uno de los objetivos de este texto es ilustrar la complejidad que esconden los aparentemente simples pronósticos probabilísticos, y las casi infinitas puertas que se abren a la duda si uno se dispone a indagar alguno de los conceptos involucrados. Hemos abierto aquí algunas de esas puertas y comentado la manera

en que la comunidad especializada tiende a pensarlos. Uno recorre un camino que parece a veces circular; en el cual comienza pensando que la probabilidad es simple, luego avanza realizando que esa simplicidad es ilusoria, para luego volver casi al lugar desde donde se partió notando que en realidad estos conocimientos no han generados cambios capitales en las acciones a tomar. Esto tiene cierta semejanza con el concepto de “aprendizaje negativo” descrito por Oppenheimer y otros (2008), en donde a pesar de ganarse conocimiento no necesariamente uno constata una aproximación a la solución del problema que se tiene en mente. Es por ello que es de interés hacer una breve recopilación de los mensajes claves aquí discutidos que deben tenerse en cuenta al lidiar con pronósticos probabilísticos:

- Es importante incluir información sobre incerteza en los pronósticos, pero esto no implica que esta es siempre apreciada por los usuarios.
- El pronóstico probabilístico es una de las maneras de expresar la incerteza, y a pesar de su uso tan frecuente ciertos temas resisten una simple matematización y/o conceptualización.
- El concepto de probabilidad no tiene una interpretación unívoca, y es claro que mismo en meteorología diferentes áreas puedan pensarla de diferentes maneras; mismo una persona puede oscilar entre diferentes interpretaciones dependiendo de la actividad que esté practicando.
- La diversidad de interpretaciones no es un obstáculo para su uso, pero sí puede serlo a la hora de consensuar acerca de qué se está exactamente hablando.
- Todos los rangos de valores de probabilidad no se perciben de la misma manera. Si bien puede pensarse como un simple intervalo entre 0 y 1, en la práctica se comporta como un intervalo con una geometría curiosa, en general con particular atención dedicada a los valores muy cercanos a cero y a los rangos medios.
- El sentido del pronóstico probabilístico se fortalece si existe un valor climatológico del fenómeno  $p_c$ , al menos aproximado.
- La cantidad de información que brinda un pronóstico depende de cuán dramático es el incremento de probabilidades entre  $p_c$  y el pronóstico  $p$ .
- Contrariamente a lo que naturalmente tendemos a pensar, la adquisición de nueva información sobre las chances de ocurrencia de un evento puede *augmentar* la incertidumbre en las que nos encontramos sobre la ocurrencia del mismo. Hay en esto también una cierta semejanza con el “aprendizaje negativo” mencionado anteriormente: ahora sabemos algo que antes no, pero nos aleja de una decisión simple.
- En la práctica resulta difícil manejarse con cuantificaciones de probabilidad sin migrarlas a expresiones verbales (conscientes o no), por lo cual estas cuantificaciones sufren deformaciones debido a la “percepción” de cada individuo.
- Estas expresiones verbales (del tipo “es muy probable que”) resultan cómodas para la comunicación pero pueden ser tan o más confusos que la transmisión cuantitativa, por lo cual sólo producen una aparente ventaja.
- Si bien es común ver asignados valores de probabilidad a eventos muy infrecuentes, en la práctica estas estimaciones son muy pobres, lo cual le agrega una capa de complejidad a la interpretación de las mismas.
- Es común también ver las chances de ocurrencia de un evento descrito como un intervalo de probabilidades (por ejemplo, “hay un 40-70% de chances de precipitación). Esto puede darle un cierto confort a los pronosticadores, pero este se gana con una dosis de perplejidad para los usuarios.
- Los pronósticos probabilísticos no son siempre bienvenidos por los usuarios, por más esfuerzo que se realice en su producción. Algunos consideran que los meteorólogos son los que deban tomar la responsabilidad de anunciar si un fenómeno ocurrirá o no.

- Si un pronóstico probabilístico cuantitativo no forma parte de un sistema que trabaja con post procesos de calibración, el uso de números en lugar de palabras tiene solo fines decorativos (o quizás la promesa de ser eventualmente calibrados, ya que hay que empezar en algún lado).
- Es difícil saber a qué se refiere exactamente un pronóstico sin conocer su mecanismo de verificación.
- Es difícil establecer un mecanismo de calibración satisfactorio sin una red de medición adecuada.
- Cuanto más cerca de 0 ó 1 está un pronóstico calibrado, menos incertidumbre portan y son de más fácil uso.
- Un pronóstico calibrado es mejor que otros si produce más valores cercanos a probabilidad 0 y 1 que los otros.
- A pesar de no estar calibrado un pronóstico probabilístico puede ser de utilidad. No obstante, esta utilidad resulta difícil de medir y de automatizar.
- El concepto de riesgo tiende a deformar aún más nuestra percepción de las probabilidades: no es igual si se está en tren de apostar a los dados con fichas sin valor monetario, que hacerlo en los casinos de Las Vegas con todo sus ahorros, o jugando a la ruleta rusa entre gánsteres.
- La predicción de fenómenos que se encuentran al límite de su nivel de predictibilidad produce pronósticos lejanos a 0 y 1, y tienen por lo tanto alto nivel de incertidumbre.
- Un excelente sistema de pronósticos puede para un dado usuario no tener valor, e inversamente, un mal sistema de pronóstico puede encontrar un usuario satisfecho.
- La utilidad de un pronóstico también es función de la cadena de transmisión de la información hasta el usuario. Parte de esta cadena es la comprensión del mismo por el usuario.

Si bien el profundizar sobre la variada problemática del pronóstico probabilístico puede tener algo de frustrante, queda claro que ante la perspectiva de establecer un pronóstico probabilístico es bueno sentarse y preguntarse exactamente cuál es el significado de cada paso del proceso, como debiera ser interpretado, y cuáles son las ventajas para los usuarios.

**Agradecimientos:** Si bien la responsabilidad final del texto es del autor, tanto Paula Etala, Carolina Cerrudo, Sol Osman, Juan Ruiz como Waldo Belloso han contribuido con sus comentarios a la mejora del mismo.

## 8. REFERENCIAS

Agresti A. y B.A. Coull, 1998: Approximate is better than 'exact' for interval estimation of binomial proportions. *The American Statistician*, 52, 119-126.

Baron J., 2000: *Thinking and deciding*. Cambridge University Press, Cambridge, p 570.

Caruzzo A., M.C.N. Belderrain, G. Fisch, G.S. Young, C.J. Hanlon, y J. Verlinde, 2018: Modelling weather risk preferences with multi-criteria decision analysis for an aerospace vehicle launch. *Met. Apps*. doi:10.1002/met.1713.

Christensen-Szalanski, J.J. y J.B. Bushyhead, 1981: Physicians' use of probabilistic information in a real clinical setting. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 7, 928-935.

- de Elía R., y R. Laprise, 2005: Diversity in interpretations of probability: Implications for weather forecasting. *Monthly Weather Review*, 133(5), 1129-1143.
- Demeritt D., S. Nobert, H. L. Cloke, y F. Pappenberger, 2010: Challenges in communicating and using ensembles in operational flood forecasting. *Meteor. Appl.*, 17, 209–222.
- Demeritt D., 2012: The Perception and Use of Public Weather Services by Emergency and Resilience Professionals in the UK. Report for the Met Office Public Weather Service Customer Group.
- Franklin J., 2001: The science of conjecture before Pascal. Johns Hopkins University Press.
- Fundel V.J., N. Fleischhut, S.M. Herzog, M Göber, y R. Hagedorn, 2019: Promoting the use of probabilistic weather forecasts through a dialogue between scientists, developers and end-users. *Q J R Meteorol Soc.* 1–22.
- Hand M.S., M.J. Wibbenmeyer, D.E. Calkin, y M.P. Thompson, 2015: Risk preferences, probability weighting, and strategy tradeoffs in wildfire management. *Risk Anal.* 35: 1876–1891.
- Gigerenzer G., 2005: A 30% Chance of Rain Tomorrow: How Does the Public Understand Probabilistic Weather Forecasts? *Risk Analysis*, Vol. 25, No. 3, pp. 623-629, June 2005.
- Gill J., 2008: Communicating forecast uncertainty for service providers. *WMO Bulletin*, 57, 237-243.
- Gillies D., 2000: *Philosophical Theories of Probability*. Routledge, 223 pp.
- Granger Morgan M., H. Dowlatabadi, M. Henrion, D. Keith, R. Lempert, S. McBrid, M. Small, y T. Wilbanks, 2009: Best practice approaches for characterizing, communicating, and incorporating scientific uncertainty in decisionmaking. National Oceanic and Atmospheric Administration, Washington D.C., USA. 87 pp.
- Hacking I., 1975: *The emergence of probability*. Cambridge University press, London.
- Heuer R.J., 2005: *Psychology of Intelligence Analysis*, Nova Biomedical 216p.
- Keith R. y S. Leyton, 2007: An experiment to measure the value of statistical probability forecasts for airports. *Wea. Forecasting*, 22, 928–935.
- Krocak, M.J. y H.E. Brooks, 2018: Climatological Estimates of Hourly Tornado Probability for the United States. *Wea. Forecasting*, 33, 59–69, <https://doi.org/10.1175/WAF-D-17-0123.1>
- Lazo J.K., R.E. Morss, y J.L. Demuth, 2009: 300 billion served: Sources, perceptions, uses, and value of weather forecasts. *Bulletin of American Meteorological Society*, 785-798.
- Lazo J.K., R.S. Raucher, T.J. Teisberg, C.J. Wagner y R.F. Weiher, 2009: *Primer on Economics for National Meteorological and Hydrological Services*. Boulder, University Corporation for Atmospheric Research.
- Lohigorry P., R. de Elía, y G. Russian, 2018: Pronóstico de muy corto plazo en el Servicio Meteorológico Nacional. Nota Técnica SMN 2018-46.
- Marin Ferrer K., M., De Groeve, y T., Clark, I., (Eds.), 2017: *Science for disaster risk management 2017: knowing better and losing less*. EUR 28034 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2017, ISBN 978-92-79-60678-6, doi:10.2788/688605, JRC102482.
- Marimo, P., T. Kaplan, K. Mylne, y M. Sharpe, 2012: Communication of uncertainty in weather forecasts, MPRA Paper, University Library of Munich, Germany, <https://EconPapers.repec.org/RePEc:pra:mprapa:38287>.

- Morss R.E., J.L. Demuth, y J.K. Lazo, 2008: Communicating Uncertainty in Weather Forecasts: A Survey of the U.S. Public. *Weather and Forecasting*, vol. 23, no. 5, pp. 974--991.
- Murphy A.H., y R.L. Winkler, 1984: Probability forecasting in meteorology. *Journal of American Statistical Association*, 79, 489-500.
- Murphy A.H., y H. Daan, 1984: *Impacts of feedback* and experience on the quality of subjective probability forecasts: Comparison of results from the first and second years of the Zierikzee experiment. *Monthly Weather Review*, 112, 413-423.
- Murphy J., y otros, 2009: UK Climate Projections Science Report: Climate change projections. Met Office Hadley Centre: Exeter.
- NRC, 2006: Completing the Forecast: Characterizing and Communicating Uncertainty for Better Decisions Using Weather and Climate Forecasts. National Academies Press, 124 pp.
- Nurmi P., A. Perrels and V. Nurmi, 2013: Expected impacts and value of improvements in weather forecasting on the road transport sector. *Meteorological Applications*, 20:217–223.
- Oppenheimer M., B.C. O'Neill, y M. Webster, 2008: Negative learning. *Climatic Change*, 89: 155.
- Perrels A., T. Frei, F. Espejo, L. Jamin y A. Thomalla, 2013: *Socio-economic benefits of weather and climate services in Europe*. *Advances in Science and Research*, 10(1), 65–70.
- Ramos M.H., S.J. van Andel, y F. Pappenberger, 2013: Do probabilistic forecasts lead to better decisions?, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17, 2219-2232.
- Scheaffer R. y McClave J.T., 1990: Probability and statistics for engineers. PWS-Kent, Boston.
- Schneider S.H., 2002: Can We Estimate the Likelihood of Climatic Changes at 2100? *Climatic Change* 52(4):441–451.
- Tak S., A. Toet, y J. van Erp, 2015: Public understanding of visual representations of uncertainty in temperature forecasts. *J. Cognit. Eng. Decis. Making*, 9, 241–262.
- Timme N.M., y C. Lapish, 2018: A Tutorial for Information Theory in Neuroscience. *eNeuro* 29 June 2018, 5 (3) ENEURO.0052-18.2018.
- van der Bles A.M., S. van der Linden, A.L.J. Freeman, J. Mitchell, A.B. Galvao, L. Zaval, D.J. Spiegelhalter, 2019: Communicating uncertainty about facts, numbers and science. *R. Soc. open sci.* 6: 181870.
- Von Gruenigen S., S. Willemse, y T. Frei, 2014: Economic Value of Meteorological Services to Switzerland's Airlines: The Case of TAF at Zurich Airport. *Weather, Climate, and Society*, 6, 264-272. <https://doi.org/10.1175/WCAS-D-12-00042.1>
- Weatherford R., 1982: *Philosophical Foundations of Probability*. Theory. Routledge and Kegan Paul, 282 pp.
- Wilks D.S., 2011: *Statistical methods in the Atmospheric sciences*. Third edition. Elsevier, Amsterdam, 676 páginas.
- Wilson K.A., P.L. Heinselman, P.S. Skinner, J.J. Choate, y K.E. Klockow-McClain, 2019: Meteorologists' Interpretations of Storm-Scale Ensemble-Based Forecast Guidance. *Wea. Climate Soc.*, 11, 337–354.
- WMO, 2003: Guide to practices for meteorological offices serving aviation. Report number: WMO-No. 732.

## Instrucciones para publicar Notas Técnicas

En el SMN existieron y existen una importante cantidad de publicaciones periódicas dedicadas a informar a usuarios distintos aspectos de las actividades del servicio, en general asociados con observaciones o pronósticos meteorológicos.

Existe no obstante abundante material escrito de carácter técnico que no tiene un vehículo de comunicación adecuado ya que no se acomoda a las publicaciones arriba mencionadas ni es apropiado para revistas científicas. Este material, sin embargo, es fundamental para plasmar las actividades y desarrollos de la institución y que esta dé cuenta de su producción técnica. Es importante que las actividades de la institución puedan ser comprendidas con solo acercarse a sus diferentes publicaciones y la longitud de los documentos no debe ser un limitante.

Los interesados en transformar sus trabajos en Notas Técnicas pueden comunicarse con Ramón de Elía ([rdelia@smn.gov.ar](mailto:rdelia@smn.gov.ar)), Luciano Vidal ([lvidal@smn.gov.ar](mailto:lvidal@smn.gov.ar)) o Martin Rugna ([mrugna@smn.gov.ar](mailto:mrugna@smn.gov.ar)) de la Gerencia de Investigación, Desarrollo y Capacitación, para obtener la plantilla WORD que sirve de modelo para la escritura de la Nota Técnica. Una vez armado el documento deben enviarlo en formato PDF a los correos antes mencionados. Antes del envío final los autores deben informarse del número de serie que le corresponde a su trabajo e incluirlo en la portada.

La versión digital de la Nota Técnica quedará publicada en el Repositorio Digital del Servicio Meteorológico Nacional. Cualquier consulta o duda al respecto, comunicarse con Melisa Acevedo ([macevedo@smn.gov.ar](mailto:macevedo@smn.gov.ar)).