

# UN NUEVO ENFOQUE PARA LA CONSTRUCCIÓN DE ESCENARIOS PROBABILÍSTICOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

*Francisco ESTRADA PORRÚA, Carlos GAY GARCÍA, Cecilia CONDE ÁLVAREZ*  
*Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México*  
feporrua@atmosfera.unam.mx, cgay@servidor.unam.mx, conde@servidor.unam.mx

## **RESUMEN.**

En este trabajo se muestra el análisis de las propuestas existentes para la generación de escenarios probabilísticos de cambio climático presentado en GAY y ESTRADA (2007), así como la metodología propuesta por dichos autores. Se discute la imposibilidad de crear escenarios probabilísticos de cambio climático, “best estimates” y “likely ranges” que sean objetivos y que, por lo tanto, las suposiciones subjetivas necesarias para la construcción de dichos escenarios y medidas deben traerse al frente y estar claramente descritas. Bajo estos conceptos, se analizan algunos de los enfoques adoptados en el Cuarto Reporte de Evaluación del IPCC, así como algunos otros que han sido sugeridos en la literatura. Los resultados muestran que los enfoques actuales pueden llevar a una reducción injustificada de la incertidumbre, que puede resultar en una combinación potencialmente peligrosa de subestimación del riesgo y un falso sentido de objetividad.

**Palabras clave:** Incertidumbre, probabilidades frecuentistas y subjetivas, escenarios probabilísticos de cambio climático, Principio de Máxima Entropía, Cuarto Reporte de Evaluación del IPCC

## **ABSTRACT**

This paper presents the analysis in GAY y ESTRADA (2007) regarding the current methodologies for constructing probabilistic climate change scenarios, as well as the new methodology proposed by the authors. The unfeasibility of constructing objective probabilistic climate change scenarios, “best estimates” and “likely ranges” is discussed, and that therefore the subjective assumptions needed to construct such scenarios and measures should be brought forward and be clearly stated. In the light of this discussion, some of the approaches adopted by the IPCC’s Fourth Assessment Report, as well as other approaches suggested in the literature, are analyzed. Results show that current approaches lead to an unjustifiable dismissal of uncertainty, which can provide a potentially dangerous combination of underestimation of risk and a fake sense of objectiveness.

**Key words:** Uncertainty, frequentist and subjective probabilities, probabilistic climate change scenarios, Maximum Entropy Principle, IPCC’s Fourth Assessment Report

## 1. INTRODUCCIÓN

El uso eficiente de los recursos económicos para enfrentar el calentamiento global, en términos de adaptación e impactos (remediación y prevención), depende de la cantidad, calidad e interpretación de la información y de las incertidumbres conocidas. La toma de decisiones y la evaluación de riesgo dependen de manera crítica de cómo se maneje la incertidumbre (GAY y ESTRADA, 2007).

Es importante notar que gran parte de la relevancia de la ciencia desarrollada alrededor del cambio climático está en función de su utilidad para la toma de decisiones. Por esta razón, se han dedicado grandes esfuerzos en la ciencia de cambio climático para tratar de evaluar los impactos potenciales en sistemas humanos y naturales (IPCC, 2001a). Como se menciona en SCHNEIDER (2003), aunque en los últimos años se han logrado avances importantes en la modelación del clima, es necesario integrar la incertidumbre en el proceso de toma de decisiones y de desarrollo de políticas. Sin embargo, para esto último es necesaria la estimación de probabilidades de los distintos escenarios que se construyan. Desafortunadamente, debido a la falta de metodologías adecuadas para el manejo de incertidumbre, gran parte de la información que se está generando no está siendo aprovechada para la estimación del riesgo ni para la toma de decisiones.

Por ejemplo, una de las metodologías más utilizadas para el manejo de incertidumbre se basa en escoger, utilizando opinión de experto, dos escenarios distintos para dar una idea de la incertidumbre. Claramente esta metodología es inadecuada ya que elimina injustificadamente la mayor parte de los posibles resultados e información potencialmente de interés para la toma de decisiones. Los resultados obtenidos con esta metodología pueden estar sesgados y no ser representativos del estado del conocimiento en cambio climático, son difíciles de interpretar y resultan difíciles para comunicar riesgo.

Hasta ahora, la mayor parte de los estudios sobre cambio climático y sus impactos se ha basado en esta metodología, incluyendo estudios de gran escala como las Comunicaciones Nacionales y los reportes del IPCC hasta el Tercer Reporte de Evaluación. Como se comenta más adelante, las estimaciones mostradas en el Cuarto Reporte de Evaluación siguen basándose en gran medida en esta metodología. Es interesante notar que este tipo de enfoque también ha llevado, por argumentos no muy claros, a que exista un sesgo en la literatura disponible sobre escenarios de cambio climático y sobre sus impactos potenciales hacia las familias de emisiones A2 y B2.

En años recientes, se propuso la construcción de escenarios probabilísticos de cambio climático y se inició un gran debate en la comunidad científica. Una de las complicaciones fue la decisión de los autores del Special Report on Emission Scenarios (IPCC, 2000) de no asignar probabilidades de ocurrencia a los escenarios de emisiones para no emitir ninguna opinión que se pudiera interpretar como una preferencia o recomendación de política. Esta decisión deja, de facto, a los tomadores de decisiones el trabajo sucio de asignar probabilidades arbitrarias a los distintos escenarios para que sean de utilidad en estimaciones de riesgo y creación de políticas (ver SCHNEIDER, 2001).

En el Special Report on Emission Scenarios (SRES) el IPCC, califica de igualmente sólidos a todos los escenarios de emisiones e indica que ningún escenario en particular es “ni más, ni

menos probable que cualquier otro”. Este par de afirmaciones ha llevado a muchos a interpretar las diferentes líneas de emisiones como igualmente probables y a la conclusión de que la distribución de probabilidades más razonable sería una uniforme. Desde los tiempos de Bernoulli y Laplace este ha sido una de las maneras más comunes para representar la incertidumbre cuando existe simetría entre los posibles resultados.

Siguiendo estas conclusiones, SCHNEIDER (2001) aborda la pregunta ¿qué tan probable es que el planeta se caliente 6°C para el 2100? Sus experimentos muestran que al asignar la misma probabilidad a cada escenario de emisiones y correr varios modelos de clima con dichos escenarios, el histograma que se obtiene dista mucho de una distribución uniforme y se asemeja a una distribución normal o tipo Weibull. Por lo tanto, Schneider concluye que en un sentido frecuentista existen valores más probables en los escenarios de cambio en las temperaturas, aún bajo la suposición de que los escenarios de emisiones son igualmente probables. También argumenta la importancia para la toma de decisiones de que la distribución no sea uniforme. Ciertamente, cuando el rango de cambios en la temperatura para el 2100 es de una magnitud casi igual a la diferencia entre una era glacial e interglacial, y la distribución de probabilidades asociada a estos cambios es la uniforme, se corre el riesgo de “congelar” a los tomadores de decisión.

Los autores del SRES inmediatamente rechazaron las conclusiones de Schneider y las calificaron de “peligrosas” ya que consideran que reduce la incertidumbre de manera no justificada (GRÜBER y NAKICENOVICH, 2001). En el mismo artículo, los autores cuestionaron hasta la posibilidad de asignar probabilidades ya sean objetivas o subjetivas. En GAY y ESTRADA (2007) se argumenta que esta afirmación es cuestión de opinión y no una infactibilidad técnica, al menos en el caso de las probabilidades subjetivas.

Consideramos que para el problema de la incertidumbre en los escenarios climáticos, un enfoque frecuentista (objetivo) no es adecuado y por lo tanto la pregunta de Schneider sobre qué tan probable es que el mundo se caliente 6°C para el 2100 es demasiado ambiciosa e imposible de contestar. Tenemos que resignarnos a una pregunta mucho más modesta: con la información disponible ¿qué tanto creemos que el mundo se caliente 6°C para el 2100?

Como se menciona en GAY y ESTRADA (2007), es importante recordar que las frecuencias y las probabilidades guardan una estrecha relación pero que, sin embargo, son conceptos distintos. Desde la perspectiva frecuentista, la probabilidad “objetiva” de un evento, que sea empíricamente medible mediante la observación de un experimento aleatorio, puede aproximarse por frecuencias relativas cuando el número de repeticiones tiende a infinito. Las predicciones obtenidas al asignar una distribución de probabilidades en esta forma son, en principio, verificables y si las probabilidades fueron asignadas correctamente deben representar de manera adecuada las variaciones de la variable aleatoria de interés (ver JAYNES, 1957). Por lo tanto, la asignación de probabilidades por medio de frecuencias relativas a los distintos escenarios de cambio climático presentan los siguientes inconvenientes: 1) el evento en estudio no es observable y no puede ser empíricamente medido (ver KINZING y STARRETT et al. 2003); 2) la gama de salidas de los modelos no se puede considerar como generada mediante un experimento aleatorio ya que entre otras cosas implicaría la realización de un cierto número de repeticiones bajo las mismas condiciones: el uso de diferentes escenarios de emisiones (y/o modelos) no lo permite; 3) sólo existe un número pequeño disponible de salidas de modelos de circulación general y con este limitado número se pretende estimar probabilidades mediante

frecuencias relativas. En este sentido es conveniente recordar que, por ejemplo, cuando se quiere aproximar la distribución de una variable no muy sencilla mediante métodos de Monte Carlo, generalmente se requieren varios miles de realizaciones. Más aún, cuando se revisan con cuidado las gráficas de emisiones y temperaturas futuras mostradas en el Tercer Reporte de Evaluación del IPCC (2001), se puede observar que los escenarios tienden a formar “clusters” y producen “agujeros” para algunos rangos de valores. Usando el enfoque frecuentista, estos agujeros implican probabilidad cero para algunos intervalos y claramente no existe ninguna razón física para que esto ocurra. ¿Es imposible que hay un aumento de entre, supongamos, 4.5 y 5.8°C pero si de 4 o 6°C?. Evidentemente esto es el producto de un problema de muestreo. Este problema no es trivial y podría generar sesgos importantes en la distribución que se pretende aproximar por frecuencias relativas; 4) no se puede verificar el ajuste de la distribución de probabilidades ya que no existen observaciones para, por ejemplo, el 2100; 5) los escenarios de cambio climático pueden tender a agruparse alrededor de un valor particular debido a que están basados en la misma información y a que los modelos que los produjeron comparten las mismas estrategias de modelación y no porque ese valor en particular sea más probable. De alguna manera es similar a pensar que el hecho de que una noticia aparezca en dos medios distintos, que comparten la misma fuente, la haga más creíble (Allen, 2003).

Finalmente, es importante distinguir entre dos tipos de incertidumbre: aleatoria y epistémica. La primera se refiere los casos en los que las probabilidades se pueden establecer mediante la observación y repetición de experimentos aleatorios y; la segunda se refiere a los casos en los que el resultado de un experimento es incierto porque existe conocimiento limitado, información incompleta o falta de comprensión. Es claro que la incertidumbre en cambio climático es de tipo epistémica y por lo tanto un enfoque frecuentista no sería capaz de proveer una estimación razonable de las probabilidades.

Basados en los argumentos anteriores, GAY y ESTRADA (2007) concluyen que es imposible conocer las “verdaderas” probabilidades de los distintos escenarios de cambio climático y que por lo tanto el objetivo debe ser encontrar las probabilidades que sean lo más consistentes con el *estado del conocimiento* y la información subjetiva o juicio de experto disponibles. En la creación de escenarios probabilísticos de cambio climático las creencias subjetivas deben ponerse al frente, estar claramente planteadas y deben ser una expresión que tenga significado para el tomador de decisiones, en lugar de esconderse detrás de un artefacto estadístico que resulta inadecuado y cuyo resultado es dar un falso sentido de objetividad. La información subjetiva tiene, y debe tener, un papel crucial en la estimación de probabilidades cuando la información es incompleta.

Las probabilidades “objetivas” obtenidas con métodos frecuentistas deben considerarse igual de subjetivas que cualquier otra asignación de probabilidades, con la desventaja de que los supuestos “subjetivos” son desconocidos e iguales para cada persona.

### **1.1. Crítica a los enfoques adoptados por el Cuarto Reporte de Evaluación del IPCC**

El Cuarto Reporte de Evaluación (AR4) del IPCC propone un enfoque distinto a los reportes anteriores en cuanto al manejo de incertidumbre. De acuerdo con el AR4 (IPCC, 2007), los avances en la modelación de cambio climático ahora permiten proveer “best estimates” y “likely ranges” para el calentamiento proyectado para distintos escenarios de emisiones. Así mismo, menciona que las proyecciones del AR4 no son comparables con las del Tercer Reporte de Evaluación ya que las del AR4 son más avanzadas. El IPCC hace énfasis en que se presentan los resultados obtenidos con distintos escenarios de emisiones para que evitar que se

pierda *información relevante para la toma de decisión*. Sin embargo, en nuestra opinión, existen razones para argumentar que el manejo de incertidumbre en el AR4 resulta cuestionable, elimina información relevante y subestima el riesgo que será considerado para la toma de decisiones.

Considerando que la mayoría de los tomadores de decisión y hacedores de políticas en general no tienen un entrenamiento formal en el manejo de incertidumbre y clima, resulta particularmente delicado el manejo de incertidumbre presentado en el Summary for Policy Makers (SPM) del Grupo de Trabajo I del Cuarto Reporte de Evaluación del IPCC.

En el AR4, el IPCC aborda el tema de estimar la incertidumbre en los modelos y provee “best estimates” o promedios de diferentes modelos y “likely ranges” para seis de los escenarios de emisiones “marker” utilizando un “gran” numero de modelos (21 en el mejor caso, 16 en el peor), y no considera gran parte de la incertidumbre producto de los distintos escenarios de emisiones. De hecho, en el AR4 la incertidumbre por escenarios de emisiones se reduce ya que sólo se analizan 3 (los marker de A1B, A2 y B1) de los 40 posibles escenarios de emisiones.

Es importante considerar lo siguiente: los “best estimates” están basado en un enfoque frecuentista y por lo tanto la crítica mostrada en la sección anterior es aplicable. Si bien es cierto que la media de un ensamble compuesto por un número grande de realizaciones independientes tiende a ser un mejor pronóstico debido a que los sesgos individuales se cancelan, en el caso de los escenarios de cambio climático estas condiciones no se dan. Difícilmente se puede considerar que los modelos de clima son independientes y el número de simulaciones está lejos de poder ser considerado “grande”.

La idea detrás del AR4 es asignar mayor probabilidad a los valores en los que un número mayor de modelos tiende a agruparse. Sin embargo esto puede ocurrir por diversos motivos: pueden compartir estrategias similares de modelación, basarse en la misma información, y también ajustar sus estimaciones observando las estimaciones de los demás modelos para evitar ser calificados como “outliers” (Allen, 2003).

Los “likely ranges” mostrados en el AR4 representan alrededor del 66% de la masa de probabilidad. Las primeras y más obvias preguntas son: ¿Por qué hacer tanto énfasis en este muy limitado rango de incertidumbre?, ¿es esto lo que se quiere transmitir a los tomadores de decisión?, bajo un enfoque de riesgo ¿no deberíamos todos estar preocupados por los posibles eventos de baja probabilidad/alto impacto?, más aún, ¿hay razones sólidas para asignar probabilidades arbitrariamente bajas a algunos escenarios y/o modelos? Si estas estimaciones se basan en un enfoque frecuentista, deberían interpretarse con cuidado y considerarse tan subjetivas como cualquier otra. De manera contraria, si estuvieran basadas en un enfoque subjetivo, sus suposiciones deberían estar claramente especificadas. Es necesario subrayar que el fin de estas estimaciones, de acuerdo con el propio IPCC, es asistir la toma de decisiones y por eso resulta tan delicado el manejo de incertidumbre.

Adicionalmente, como se puede observar en la tabla SPM-3 los “likely ranges” son una proporción fija del “best estimate”. Para cualquier valor de “best estimate”, los “likely ranges” de 66% de probabilidad se pueden construir sumando y restando proporciones constantes de dicho valor. Esto es o un comportamiento sistemático muy peculiar de las distribuciones o el producto de una sobre-simplificación. Si este es el caso, ¿cuál es el propósito de haber corrido un número tan “grande” de modelos? Más aún, el IPCC sigue evitando la incertidumbre en los

escenarios de emisiones y por lo tanto no se puede construir realmente escenarios probabilísticos de cambio climático futuro. Por esta razón, realmente el enfoque del IPCC en el AR4 sigue estando basado en la elección subjetiva de algún escenario de emisiones y la incertidumbre de este tipo no está siendo considerada.

Finalmente, el IPCC en el AR4 está tomando una posición muy fuerte al entregar a los tomadores de decisión valores más probables y rangos posibles, basándose en métodos que, como se discute en la sección anterior, son discutibles y reducen la incertidumbre de manera no justificada. Esta reducción de incertidumbre producirá, claramente, una subestimación de los riesgos potenciales de cambio climático.

La crítica es similar para el caso de los escenarios para precipitación mostrados en el AR4 ya que también están basados en el promedio de ensambles de modelos corridos bajo el mismo escenario de emisiones. En este caso es conveniente notar que, además de lo cuestionable que resulta la metodología presentada por el IPCC en el AR4 para el manejo de incertidumbre, ha generado confusión y esto es claro en algunas aplicaciones. La Tercera Comunicación Nacional de México ante la Convención Marco sobre Cambio Climático, provee un claro ejemplo de esto. En dicho documento se muestra un tratamiento diferenciado entre los escenarios de temperatura y precipitación: para el primer caso se usa la media y la desviación estándar y, para la precipitación la mediana y el rango intercuartil. ¿Existe alguna razón para pensar que los escenarios de cambio climático para precipitación sean consistentemente más sesgados, y para cada punto de la malla, que los de temperatura que justifique un tratamiento distinto? En principio, no habría razón para tratar la incertidumbre de forma distinta y tampoco forma parte de las propuestas del AR4 del IPCC. El argumento en el que se basa dicha diferenciación es que para el caso de la temperatura la medida de tendencia central adecuada es la media y la de dispersión es la desviación estándar, mientras que en el caso de la precipitación, que se supone sigue una distribución sesgada, la medida de tendencia central debe ser la mediana y la de dispersión el rango intercuartil. Claramente esto es producto de una confusión entre el proceso generador de datos de las variables y la incertidumbre en los escenarios. Es fundamental distinguir entre estos dos procesos.

## 2. METODOLOGÍA

En este apartado se presenta parcialmente la metodología propuesta en GAY y ESTRADA (2007) para la estimación de escenarios probabilísticos de cambio climático.

### 2.1. El principio de Máxima Entropía

Jaynes (1957, 1962), basado en la medida de entropía de Shannon, propuso el Principio de Máxima Entropía como una manera de asignar distribuciones de probabilidad con base en información incompleta. La metodología que aquí se presenta para asignar distribuciones de probabilidad a los escenarios de cambio climático es una aplicación del problema del dado de JAYNES (1962).

El formalismo del Principio de  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  Máxima Entropía se presenta a continuación. Suponga que la cantidad  $x$  puede tomar los valores donde  $n$  puede ser finito o infinito y que se tiene información expresada en términos de valores promedio o de algún otro  $\{f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)\}$  momento, donde  $m < n$ . El objetivo es determinar las probabilidades de

cada valor posible de  $x$  que sean consistentes con la información dada. El problema se puede expresar de la siguiente forma:

$$\max_p H(X) = -K \sum_{i=1}^n p_i \log(p_i) \quad (1)$$

sujeto a

$$\sum_{i=1}^n p_i f_k(x_i) = y_k, \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (\text{restricciones}) \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n p_i = 1 \quad (\text{condición de normalización}) \quad \text{donde } p_i \geq 0 \quad (3)$$

Cabe notar que el problema está subdeterminado. Las probabilidades que son consistentes con las restricciones (2) y (3) pueden recuperarse mediante la maximización de la función Lagrangiana

$$L = -\sum_{i=1}^n p_i \ln(p_i) + \sum_{k=1}^m \lambda_k \left[ y_k - \sum_{i=1}^n p_i f_k(x_i) \right] + \mu \left[ 1 - \sum_{i=1}^n p_i \right]$$

Cuyas condiciones de primer orden son:

$$\frac{\partial L}{\partial p_i} = -\ln(\hat{p}_i) - 1 - \sum_{k=1}^m \hat{\lambda}_k f_k(x_i) - \hat{\mu} = 0$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_k} = y_k - \sum_{i=1}^n \hat{p}_i f_k(x_i) = 0$$

$$\frac{\partial L}{\partial \mu} = 1 - \sum_{i=1}^n \hat{p}_i = 0$$

La solución formal de este sistema de  $n+m+1$  ecuaciones y parámetros es

$$\hat{p}_i = \frac{1}{\Omega(\hat{\lambda}_1, \hat{\lambda}_2, \dots, \hat{\lambda}_m)} \exp \left[ -\sum_{k=1}^m \hat{\lambda}_k f_k(x_i) \right]$$

donde

$$\Omega(\hat{\lambda}) = \sum_{i=1}^n \exp \left[ -\sum_{k=1}^m \hat{\lambda}_k f_k(x_i) \right]$$

es un factor de normalización llamado la función de partición.

La distribución de máxima entropía no tiene una solución cerrada y por lo tanto técnicas de optimización numérica se requieren para calcular las probabilidades. Es importante notar que máxima entropía asigna probabilidades positivas a todo evento que no es excluido por la información inicial; ninguna posibilidad es ignorada.

Del número infinito de distribuciones de probabilidad que satisfacen las restricciones (1) y (2), la distribución de máxima entropía es la estimación menos sesgada posible: cualquier otra asignación de probabilidades implicaría hacer supuestos que la información disponible no justifica. Máxima entropía permite razonar lo mejor posible sobre las probabilidades (no su frecuencia relativa) de cada uno de los  $n$  posibles valores de  $x$ , y hacer las mejores predicciones consistentes con la información disponible. Esto no quiere decir que las predicciones sean correctas, solo que para poder hacer mejores predicciones se necesitaría tener más información (JAYNES, 1957).

## 2.2. Escenario probabilísticos de cambio climático

Debido a que es imposible conocer las “verdaderas” probabilidades de los diferentes escenarios y cambios en las variables climáticas, el objetivo debe ser encontrar las probabilidades que son lo más consistente posible con el estado del conocimiento y nuestro sistema de creencias.

Para obtener la distribución de máxima entropía se requieren dos elementos: 1) el rango de los posibles valores de los escenarios de cambio climático obtenidos a través de los distintos modelos de clima y escenarios de emisiones  $y$ ; 2) el valor promedio de el cambio medio de la variable de interés. Es importante notar que una vez que el promedio del cambio es escogido, el resto del procedimiento es totalmente objetivo.

Diferentes personas tendrán información y apreciaciones distintas sobre el valor promedio y por lo tanto la distribución de máxima entropía será distinta para cada una de ellas. Evidentemente, no todas ellas pueden ser correctas. Sin embargo, cada persona estará haciendo las mejores predicciones que son consistente con la información que tiene disponible, ya sea correcta o no. En este caso, la toma de decisiones puede ser óptima: no importa cual sea el verdadero resultado, y por lo tanto, si la decisión fue correcta o no, sigue siendo la respuesta óptima dada la información disponible.

El Principio de Máxima Entropía es capaz de producir escenarios de cambio climático que conservan la mayor cantidad de incertidumbre posible, respetando lo que no se conoce, sujeto a que la distribución sea consistente con la información subjetiva y el estado del conocimiento disponibles.

La distribución de máxima entropía se propone como la representación probabilística de las creencias del tomador de decisiones (o experto) sobre el cambio en la media de las variables climáticas en el futuro. Esta distribución maximiza la incertidumbre sujeto a los distintos tipos de información disponible: la información objetiva “científica” y la información subjetiva de expertos o creencias del tomador de decisiones.

## 3. RESULTADOS

De acuerdo con el SPM del Grupo de Trabajo I, dependiendo del escenario de emisiones, considerando los “best estimates” la temperatura global anual aumentaría en un rango de 1.8 a 4°C para el 2100. En esta sección se aborda la pregunta de qué tanta masa de probabilidad se podría estar quedando fuera de estas estimaciones, utilizando la metodología descrita y distintas suposiciones arbitrarias sobre el cambio promedio.

Para los resultados que se muestran en la Tabla 1, el valor arbitrario del cambio promedio necesario para estimar la distribución de máxima entropía se fijó con referencia a los 6 escenarios de emisiones marker del SRES (IPCC, 2000) y se tomó como estado del conocimiento el rango de incrementos de 1.1 a 6.4°C. Adicionalmente, en dicha tabla se muestra el caso en el que la media se escoge para un escenario (A2 MES) con sensibilidad del clima alta.

Como se puede observar en la Tabla 1 las probabilidades de incrementos superiores al rango considerado por el IPCC no son despreciables, salvo en el caso de asumir una media arbitraria muy baja (creencias tipo B1).

Creencias	Promedio (°C)	P>=4
A1FI	4	59.25%
A1B	2.8	27.00%
A1T	2.4	17.35%
A2	3.4	42.74%
B2	2.4	17.35%
B1	1.8	5.87%
A2 MES (HIGH)	4.7	78.50%

Tabla 1. PROBABILIDADES DE REBASAR 4°C PARA DISTINTAS SUPOSICIONES ARBITRARIAS SOBRE EL CAMBIO PROMEDIO

#### 4. CONCLUSIONES

En este trabajo se revisan algunas de las propuestas que se han realizado para el manejo de incertidumbre y la creación de escenarios probabilísticos de cambio climático.

El IPCC en el Cuarto Reporte de Evaluación realizó un esfuerzo muy importante para manejar la incertidumbre y proveer información que resultara manejable para los tomadores de decisión. Sin embargo, como se muestra en el texto, el enfoque propuesto es discutible y podría llevar a una subestimación del riesgo, así como a crear un falso sentido de objetividad. Es importante reconocer que existen grandes inconvenientes bajo el enfoque frecuentista que hacen inalcanzable la estimación de probabilidades objetivas para los escenarios de cambio climático. Las probabilidades “objetivas” obtenidas con métodos frecuentistas deben considerarse igual de subjetivas que cualquier otra asignación de probabilidades, con la desventaja de que los supuestos “subjetivos” son desconocidos e iguales para cada persona.

Por lo tanto, la información subjetiva tiene, y debe tener, un papel crucial en la estimación de probabilidades cuando la información es incompleta. En la creación de escenarios probabilísticos de cambio climático las creencias subjetivas deben ponerse al frente, estar claramente planteadas y deben ser una expresión que tenga significado para el tomador de decisiones, en lugar de esconderse detrás de un procedimiento estadístico que resulta inadecuado.

En este sentido, la metodología presentada por GAY y ESTRADA (2007) busca contribuir a la discusión haciendo uso de toda la información disponible, ya sea objetiva o subjetiva. Este nuevo enfoque, basado en el Principio de Máxima Entropía, busca conservar lo más posible la incertidumbre, sujeto a que las probabilidades estimadas sean consistentes con el estado del conocimiento y la información subjetiva disponibles. Los resultados de este trabajo muestran que dependiendo de las creencias que se asuman, más del 50% de la masa de probabilidad podría quedar fuera del intervalo de “best estimates” considerado por el AR4 del IPCC.

## 5. REFERENCIAS

- ALLEN M. R., (2003). Possible or probable? *Nature*, 425: 242.
- Gay, C., F. Estrada. (2007). *Objective probabilities about future climate are a matter of opinion*. Sometido a *Climatic Change*.
- GRÜBLER, A. AND NAKICENOVIC, N., (2001). *Identifying dangers in an uncertain climate*. *Nature* 412, 15.
- IPCC (2000). *Special Report on Emissions Scenarios*. Nebojsa Nakicenovic and Rob Swart (Eds.) Cambridge University Press, UK. pp 570
- IPCC (2001), *Climate Change 2001: Synthesis Report 2001- Contribution of Working Group I, II, and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. (R.T. Watson and the Core Writing Team eds.), 397 pp (Cambridge University Press, Cambridge, 2001).
- IPCC (2007). Summary for Policymakers. En: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- JAYNES E. T. (1957). *Information Theory and Statistical Mechanics*. *The Physical Review*, Vol. 106 No. 4, 620-630.
- JAYNES E. T. (1962). *Information Theory and Statistical Mechanics*. *Brandeis University Summer Institute Lectures in Theoretical Physics*. K. W. Ford (ed.). Vol. 3, 181-218.
- KINZIG A., STARRETT D., ARROW K., ANIYAR S., BOLIN B., DASGUPTA P., EHRLICH P., FOLKE C., HANEMANN M., HEAL G., HOEL M., JANSSON AM., JANSSON B-O., KAUTSKY N., LEVIN, S., LUBCHENCO, J., MÄLER, K-G., PACALA, S.W., SCHNEIDER,S.H., SINISCALCO, D., WALKER, B. (2003). *Coping with uncertainty: a call for a new science-policy forum*. *Ambio* 32: 330-335.
- SCHNEIDER, S. H. (2001). *What is 'Dangerous' Climate Change?* *Nature*, 411: 17-19.
- SCHNEIDER, S. H. (2003). Imaginable Surprise. En *Handbook of Weather, Climate and Water: Atmospheric Chemistry, Hydrology, and Societal Impacts*. Thomas D. Potter and Bradley Colman (eds.). Wiley.