



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
Posgrado en Filosofía de la Ciencia

Facultad de Filosofía y Letras
Facultad de Ciencias
Instituto de Investigaciones Filosóficas
Dirección General de Divulgación de la Ciencia

Campo: Filosofía de la ciencia

El carácter epistemológico de los modelos climáticos en el marco del IPCC

Tesis

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRO EN FILOSOFÍA DE LA CIENCIA**

PRESENTA:
Roberto Lorenzo González

Directora de tesis:
Dra. Lizbeth Margarita Sagols Sales
Facultad de Filosofía y Letras

Ciudad Universitaria, Cd. Mx., Julio del 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Esta investigación fue realizada gracias al apoyo de una beca de posgrado de CONACYT, recibida desde agosto del 2016 hasta julio del 2018.

Agradecimientos

Mi trabajo de investigación no hubiera sido posible sin el apoyo incondicional de muchas personas, estoy en deuda con ellas, porque el trabajo filosófico no podría darse en la reclusión. Debo aclarar que se lo debo todo a esas personas, excepto los errores, que son míos.

Antes que nada quiero agradecer a la Dra. Lizbeth Sagols Sales, por su paciencia a la hora de la elaboración de este trabajo. Si mi investigación presenta coherencia, relevancia y una buena dirección, se lo debo principalmente a ella.

También fue una parte esencial el apoyo que recibí por parte de quienes se tomaron el tiempo de leer mi tesis. En particular estoy en deuda con la Dra. Siobhan Fenella y el Dr. Clemente Rueda, por sus valiosas observaciones para la finalización de este trabajo de investigación. Asimismo estoy agradecido por las indicaciones del Dr. Rafael Guevara y el Dr. Jorge Armando, para terminar de dar algunas correcciones finales al trabajo.

Al apoyo del personal académico y administrativo del Programa de Filosofía de la ciencia, principalmente la paciencia de Marisela López, siempre allí para guiarnos en los procesos, por más difíciles que estos parecieran ser. Al coordinador Francisco Hernández, quien siempre estuvo dispuesto a ayudarnos.

También estoy agradecido con las sesiones de seminario y la amistad incondicional de mis amigos en la maestría: Danica Salomón, Omar Soria, Aldo Fuentes, Lupita Razo y Daniela Orozco. Y a mi amiga Karla Vanessa, por estar siempre allí y ser un apoyo moral. Y, por supuesto a mi familia, principalmente a mi madre Sotica Palmier, apoyo incondicional.

Indice

| | |
|---|-----------|
| 1.- Introducción | 5 |
| 2.- Definiciones | 14 |
| 2.1 Clima y cambio climático | 16 |
| 2.2 Representación científica, modelo y simulación | 18 |
| 2.2.1 Representación científica | 20 |
| 2.2.2 Modelos científicos | 21 |
| 2.2.3 Simulación | 22 |
| 3.- El carácter epistémico de los modelos climáticos | 24 |
| 3.1 Modelación Robusta | 24 |
| 3.2 Adecuación a un propósito | 30 |
| 3.3 Conservadora | 35 |
| 3.4 Bayesiana | 46 |
| 3.5 Posibilidad física | 54 |
| 4.- Conclusiones | 74 |
| Bibliografía. | 77 |

1.- Introducción

El problema que mi interesa responder en este trabajo es ¿qué conocimiento esperamos de los modelos climáticos, en el marco del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés)? Mi tesis es sostener que el conocimiento que esperamos de los resultados de los modelos es el de posibilidades físicas, en el marco del IPCC. El argumento general es que si mi interpretación de los modelos climáticos supera problemas filosóficos/científicos¹ que otras interpretaciones no pueden superar, entonces estoy ofreciendo, muy posiblemente, la mejor interpretación a la mano. Como corolario mi propuesta también tiene implicaciones políticas, porque también queremos conocer el sistema climático con la finalidad de implementar acciones de mitigación o adaptación respecto al cambio climático.

Este trabajo está inserto dentro de un problema más general, a saber ¿qué clase de conocimiento esperamos de los modelos? En general creemos que podemos extraer conocimiento de los modelos, como por ejemplo, a través de la construcción y manipulación de modelos climáticos podemos aprender algo sobre el clima (Morgan 1999). O también por medio de las simulaciones, ya sea como una técnica o como una herramienta heurística para construir hipótesis, teorías o modelos (Hartmann 1996) Pero mi tesis está limitada al IPCC, entonces sólo me interesa saber qué clase de conocimiento esperamos de esos modelos. El motivo por el que limito mi trabajo al marco del IPCC es que podría no aplicar a todo tipo de modelos en ciencia. Así que cuando haga mención de los modelos estaré haciendo referencia a los modelos del IPCC o en el marco del IPCC

El IPCC es una organización internacional que tiene como tarea principal evaluar de forma objetiva, comprensiva y transparente los riesgos del cambio climático provocados por el ser humano, sus impactos y métodos de mitigación. De ese trabajo hacen un resumen para los

¹ Como el problema de la representación científica, el papel de las matemáticas en ciencia o la validación de modelos.

tomadores de decisiones con la intención de que sus investigaciones sean tomadas en cuenta en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), que tiene como objetivo la estabilización de los Gases de Efecto Invernadero (GEI).

En principio, el IPCC sólo presenta el estado del arte o compendia las investigaciones en cada uno de sus reporte, sintetizando bases científicas, impactos y mitigación del Cambio Climático. No prescribe lo que los gobiernos deben hacer, pero sí clarifica las relaciones causales que existen entre la producción de GEI y el cambio climático dañino, así como sus consecuencias a futuro y método para hacer frente a esos efectos, que presenta en tres grandes apartados, a saber:

- a) Bases científicas:
- b) Impactos, adaptación y vulnerabilidad
- c) Mitigación de cambio climático

Cada uno de esos temas es desarrollado por un grupo de trabajo. El grupo de trabajo I tiene como objetivo presentar análisis científicos del sistema climático y de cambio climático. La tarea principal del grupo de trabajo II es evaluar los impactos socioeconómicos, así como del medio natural, la vulnerabilidad y métodos de adaptación, a nivel global y regional. Por último, el grupo de trabajo III explora rutas para limitar la emisión de GEI, entre otras políticas. Dicho esto, presento qué suele usarse como bases científicas, qué ha propuesto el IPCC como métodos de mitigación y cuáles serán los impactos del cambio climático.

El grupo de trabajo I echa mano de observaciones del sistema climático, archivos paleoclimáticos, estudios teóricos de procesos climáticos y simulaciones que hacen uso de modelos climáticos. Todos estos estudios tienen como finalidad dar información del cambio del clima, sus procesos y causas, así como los efectos esperados.

Las observaciones del sistema climático, principalmente de océano, atmósfera, criósfera, dependen de mediciones directas, como las estaciones climatológicas, así como remotas, a partir de satélites. Se hacen reconstrucciones paleoclimáticas, que nos permite dar un panorama general de la variabilidad climática y de cambios a largo plazo en el sistema tierra. Y el uso de modelos climáticos nos permite reproducir configuraciones de la temperatura de la superficie terrestres (IPCC, 2013: bases científicas) y su tendencia en el futuro. Esto último es lo que me interesa investigar.

El grupo de trabajo II estudia los impactos, la adaptación y la vulnerabilidad que implica el cambio climático. Este grupo tiene al menos tres tareas principales, a saber:

i) describir las estrategias actuales para hacer frente al cambio climático, ii) examinar los riesgos y los beneficios potenciales de ese cambio en el clima y iii) exploran los métodos de adaptación más eficaces y las relaciones existentes entre adaptación, mitigación y desarrollo sostenible (IPCC, 2013).

Sólo por mencionar concretamente uno de los impactos del cambio climático, que describe el grupo de trabajo II, es el impacto en los arrecifes de coral. A pesar de que estos ocupan menos del 0.1% de la superficie marina, albergan gran parte de la biodiversidad, porque proveen un hábitat para especies marítimas, asimismo sirven como protección en las costas o promueven el turismo. Según reportes del IPCC, el incremento en la temperatura del océano, en el Atlántico y en el Caribe (Eakin et al., 2010), durante el año 2005, provocó el debilitamiento del 80% del coral (llamado blanqueamiento de coral) y la muerte del 40%. Bajo escenarios de emisiones, se espera que cerca del 99% de los arrecifes de coral, a nivel global, experimentarán al menos un blanqueamiento severo entre los años 2090 y 2099 (Logan et al., 2014).

Por último está el grupo de trabajo III evalúa opciones de mitigación a distintos niveles de gobernanza, así como caminos a seguir dependiendo de la capacidad económica y las implicaciones sociales de las políticas de mitigación, sin recomendar a los gobiernos alguna opción particular (IPCC, 2014). En ese trabajo se analizan opciones de mitigación es: sistemas

energéticos, transporte, construcción, industria, agricultura y uso de suelos; asentamientos humanos, infraestructura y ordenamiento territorial.

Voy a **trabajar a partir de la hipótesis** de que los modelos nos dan conocimiento, lo está en duda es qué tipo de conocimiento nos dan los resultados de los modelos o cómo habremos de interpretarlos. No es lo mismo decir que los modelos nos dan conocimiento de algo que *puede* suceder (postura posibilista), que es *probable* que suceda (*postura bayesiana*), e incluso que *de hecho va a pasar* (*adecuación a un propósito, análisis robusto y representación matemática*) y lo aclararemos cuando analicemos cada una de las posturas ya mencionadas.

Sostengo que para que algo sea filosóficamente relevante debe tener implicaciones filosóficas o intentar resolver algunos problemas filosóficos. De modo que si mi propuesta ofrece una interpretación de los resultados de los modelos climáticos, que supere muchas dificultades filosóficas, que otras no pueden, por ejemplo: la relación entre el modelo y lo que representa el modelo, su validación, el rol que tienen las matemáticas en los modelos, entre otros, entonces mi propuesta será filosóficamente relevante. También soy consciente de que mi interpretación podría ser superada por otra; pero argumentaré por qué parece ser la mejor.

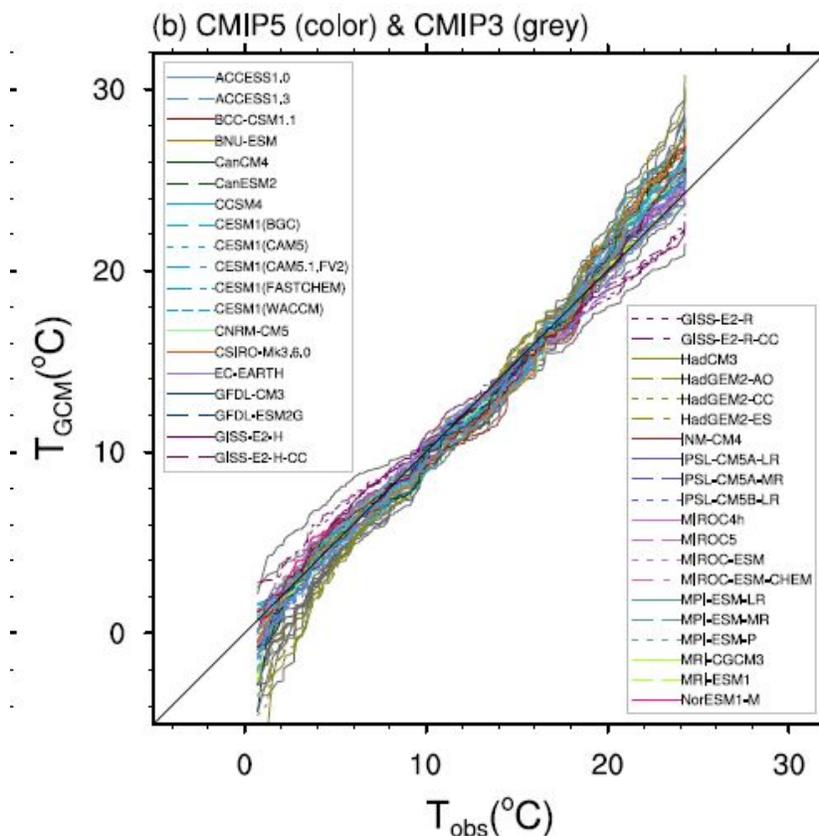


Figura 1 (IPCC, 2013: 816)

También voy a ejemplificar que de hecho hay ambigüedad de lo que nos dicen los modelos climáticos. Lo que se presenta en la figura 1 es la temperatura media mensual modelada contra los datos observados, para la región del mediterráneo, que va del año de 1961-2010. Cada línea, excepto la diagonal en gris, es una corrida de un Modelo de Circulación General (GCM, por sus siglas en inglés). Y los modelos se ajustan para tener una media de cero respecto a la diagonal.

De lo anterior se siguen problemas secundarios al problema general de ¿Cómo debemos entender los modelos climáticos? Y son los siguientes: ¿los modelos se ajustan a los datos, de modo que esa es la temperatura media en la zona del mediterráneo, en dicho lapso de tiempo? ¿Los modelos predicen lo mismo? ¿Si los modelos reproducen bien los datos observados, entonces pueden predecir estados futuros? El argumento es que si tuviéramos una interpretación clara de lo que nos dicen los modelos, entonces no habría diferentes respuestas a las preguntas

anteriores, pero las hay y las presentaré más adelante. Pero sostendré que mi propuesta supera varios problemas que otras no pueden.

Para lograr el objetivo en el segundo capítulo expondré algunas definiciones que nos den un marco general sobre qué es un modelo climático, una simulación, qué entendemos por representación, clima, etc. En el tercer capítulo presentaré al menos cinco interpretaciones epistemológicas, que dan razones de cómo debemos entender los resultados de los modelos climáticos y sus respectivos problemas filosóficos² y son las siguientes:

1. **Estándar:** Sostiene que el objetivo principal de la modelación climática es confirmar los modelos climáticos. Algunas de sus principales defensoras son E. Lloyd (2009, 2010) y W. Parker (2009), quienes sostienen que si distintos modelos nos dicen lo mismo sobre el futuro del clima, entonces los resultados son confiables.
2. **Adecuación a un propósito:** El objetivo de esta postura es sostener que no se puede evaluar los modelos climáticos como verdaderos o por adecuación empírica, a lo mucho que podemos aspirar es a evaluar si las hipótesis de un modelo climático son adecuadas para un propósito (Parker, 2009).
3. **Conservadora:** La evaluación o validación exitosa de un modelo confirma afirmaciones sobre el actual sistema climático. Esta postura es adoptada por el *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2013) y la idea que subyace a esta postura es que si los modelos son representaciones del sistema climático, lo que se descubre en los modelos, se descubre en el sistema climático.
4. **Bayesiana:** Hace uso de análisis probabilísticos, tales que si la probabilidad de una hipótesis sobre el clima es mayor a cero, entonces tenemos evidencia a favor de que la

² Cómo se relaciona el modelo con lo que quiere representar, qué es una representación, el papel de las matemáticas: explicativo o representativo, la validación de los modelos, etc.

hipótesis ocurrirá. En este sentido, la probabilidad es entendida como una herramienta de confirmación (Fitelson, 2001).

5. **Visión posibilista:** Sostiene que los modelos tienen como objetivo presentar estados físicamente posibles de nuestro sistema tierra, en otras palabras: decirnos cómo podría configurarse nuestro actual estado de cosas (Betz, 2010; Katzav, Dijkstra, & Jos de Laat, 2012, Katzav, 2014)

Por último, demostraré que la propuesta posibilista (*cf* Gendler & Hawthorne 2002) supera dificultades que las otras no pueden, para concluir que mi interpretación ofrece una respuesta al problema de qué nos dicen los resultados de los modelos en el marco del IPCC.

Voy a aclarar lo siguiente, por un lado están los modelos climáticos (modelos de circulación general océano-atmósfera (AOGCM), regional, de complejidad intermedia, etc.) y por otro las interpretaciones filosóficas-científicas de sus resultados: posibilista, bayesiana, conservadora, etc. Me centraré en el segundo trabajo: interpretaciones filosóficas/científicas de resultados de los modelos y no abordaré el primero, por ejemplo, cómo corregir modelos o construirlos

Voy a argumentar que los resultados de los modelos en el marco del IPCC *deben* ser entendidos a la luz de la *visión posibilista* (Katzav, 2015; Betz, 2010; Rolleri, 2012; Mellor 2000). Cuando decimos *deben* quiero dar a entender al menos dos cosas: i) una proposición de carácter normativa y ii) una explicación de lo que están haciendo implícitamente los científicos climáticos, pero que yo haré explícita. Por un lado, (i) afirma que los resultados de los modelos climáticos deben ser interpretados como posibilidades físicas, es decir, el conocimiento que nos dan los resultados de los modelos climáticos son estados físicos posibles del sistema climático y

para que ese sea el caso, deben cumplir con ciertas condiciones, que estarán dadas por un marco inferencial, que nos permita pasar de la probabilidad a la posibilidad física³.

Por otro lado (ii) quiero hacer explícito el tipo de conocimiento que nos están ofreciendo los resultados de los modelos climáticos. Aunque los modeladores implícitamente ven los resultados como posibilidades físicas, no hay una interpretación desarrollada sobre qué son las posibilidades físicas (en este campo) y cuál es el rol que juegan para resolver problemas como el de la representación científica, la validación de los modelos o el papel de las matemáticas en el modelado. Y yo sí voy a desarrollar esa interpretación posibilista y el rol que están jugando. Argumentaré que un aporte de mi tesis es desarrollar con precisión una interpretación posibilista y ofrecer razones para afirmar que supera problemas que ya mencioné.

En filosofía de la ciencia hay una gran discusión sobre qué son los modelos: analogías (Hesse, 1965), mediadores (Morgan, 1999), ficciones (Barberousse, 2009) o artefactos (Knuuttila, 2011) y algunas consecuencias epistemológicas. Si la ciencia climática hace uso de modelos para hacer frente a las dificultades que plantea el sistema climático, entonces una de las tareas de la filosofía de la ciencia es resolver el planteamiento sobre ¿Cuál es el carácter epistémico de estos modelos?

La justificación o relevancia filosófica es que, si tenemos una interpretación clara de los resultados de los modelos climáticos, entonces podremos superar muchos problemas filosóficos que otras propuestas tienen. Algunos de esos problemas son de raigambre filosófica, como el papel de las matemáticas en la ciencia, la representación científica, la validación de los modelos, etc. Mi intención es sostener que esta interpretación supera los problemas para este tipo de modelos en este marco específico, no para cualquier modelo en cualquier área y mucho menos solucionar esos problemas filosóficos para cualquier contexto, eso sería demasiado. Pero sí supera los problemas en este campo específico.

³ Esto es en razón de que creo que la interpretación correcta de los modelos es de carácter posibilista, pero la accesibilidad a las posibilidades físicas sólo puede darse a través de la probabilidad, para estados del mundo no lineales. Abundaremos más sobre ello en el apartado que corresponde a la modalidad física.

Como corolario, si ofrezco una interpretación más clara de los resultados de los modelos dispondremos de una herramienta más precisa que contribuya a generar políticas o toma de decisiones respecto al cambio climático (CC) e incluso contribuir a erradicar ideas como *desastre natural*: no habría tal cosa, sino malas políticas de planeación o adoptar políticas más estrictas, especialmente en México.

Expongo por qué la disminución de desastres naturales es una consecuencia de mi propuesta. Gran parte de nuestras discusiones relativas al CC están informadas por estudios científicos. La reducción de riesgos y la capacidad de resiliencia (Tomaszewskis et al., 2016), donde resiliencia es entendida como una respuesta ante una emergencia y gestión de riesgos, están respaldados por estudios científicos dedicados al CC. También el uso y manejo de recursos ecológicos (Wesche & Armitage 2014), desarrollo social (Butler *et al.* 2016), planificación de salud (Moreno, 2015), derechos humanos (Humphreys , 2010; Laut, 2016). Y el trabajo del IPCC es dar bases científicas y documentar el estado del arte en términos de impactos, vulnerabilidad, adaptación y mitigación de gases de efecto invernadero (GEI).

En principio el IPCC no realiza prescripciones a los gobiernos sobre lo que deben hacer, aunque sí ofrece resultados que tienen que ser sólidos e importantes para la toma de decisiones. Si los resultados de los estudios científicos del grupo del IPCC son sólidos (confiables), entonces pueden ayudar a tomar decisiones bien informadas. Por ejemplo Martínez *et al* (2015:207) nos dicen:

“tener un conocimiento sólido (de la variabilidad del sistema climático y el inducido por el ser humano) es crucial para establecer las mejores estrategias de adaptación y definir las medidas de mitigación más adecuadas”.

Incluso la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio climático (CMNUCC, por sus siglas en inglés) y el Protocolo de Kioto usan los resultados del IPCC para la toma de

decisiones. Una vez más: el IPCC no propone los lineamientos que deben seguir los Gobiernos, sino que ofrece conocimiento científico sobre cómo se comporta el clima y estimaciones robustas.

Mi interpretación de los modelos contribuye, como consecuencia, a la toma de decisiones; pero una cosa será clara: hay algunas interpretaciones que no permiten inferir propuestas políticas o acciones de mitigación o adaptación frente al CC. Si una interpretación filosófica de los resultados de los modelos climáticos es deficiente, entonces no permitirá desarrollar líneas de acción. Así que una consecuencia de mi interpretación ayudará a las tomas de decisiones políticas frente al CC.

Antes de entrar en detalle sobre las implicaciones epistemológicas de los modelos climáticos, también debo aclarar algunas cosas que son relevantes; por ejemplo: qué es un *modelo*, qué entendemos por *clima*, qué es una *simulación*, etc. Esto va a ayudar a clarificar las suposiciones compartidas de cada una de las interpretaciones y en lo que difieren. En general sólo extraemos las consecuencias de los modelos y algunos problemas filosóficos que interesa al área de la filosofía de la ciencia. De modo que poco diremos acerca de la construcción de los mismos.

2.- Definiciones

La ciencia climática es una disciplina científica que hace uso de modelos y comunidades como el IPCC hacen proyecciones climáticas basadas en ellos, que estiman el incremento de la temperatura media del planeta entre 1.1 °C y 6.4 °C e incluso los 8 °C. Esa tendencia es la que se espera si las cosas siguen como hasta ahora. Pero no podemos dar una respuesta precisa porque no hay datos completos, que sirven para *parametrizar* o *validar* los modelos (Lloyd, 2009); o el

sistema posee una complejidad que involucra variables inestables como los usos del suelo, la radiación solar, la atmósfera y otras esferas. De allí que la incertidumbre es parte del quehacer científico en la modelación climática (Hillerbrand, 2010).

Por otro lado, aunque estamos seguros de que muchos de los procesos que sufre el sistema climático pueden ser descritos en términos físicos, termodinámicos y otros procesos dinámicos, no pueden ser resueltos analíticamente (Lloyd, 2010; Frigg, 2015; Hartmann 1996). Así que el uso de modelos sirve para enfrentar aquellos problemas que no se pueden resolver de otro modo, aunque eso conlleve trabajar con incertidumbre. Aun así, pensadores como Stainforth (2007) creen que podemos aprender algo del sistema climático en cada *corrida de modelo* ('*model run*'), porque expresan escenarios de '*qué pasaría si*', es decir, alguna forma de condicional; pero nosotros sostenemos que esto debe ser entendido como un contrafactual, en el campo de la posibilidad física, y no como un condicional.

Una *corrida de modelo* es la computación de la evolución de una hipótesis sobre el sistema climático (Frigg, 2015), la cual requiere condiciones iniciales y condiciones límites; por ejemplo: un escenario climático para el año 2030 y la temperatura media global, mientras las condiciones iniciales son las descripciones matemáticas del estado del sistema climático; las segundas son variables con algún valor que pueden afectar el sistema a lo largo de su evolución, como la interacción de los GEI en la atmósfera. Estos son conocidos como *forzamientos externos* o *condiciones externas*.

Si adoptamos cierta definición de modelo, entonces nos comprometemos a un tipo de conocimiento específico. Si los modelos son descripciones, entonces por cada descripción tenemos un modelo. Si son representaciones, entonces lo que descubramos del modelo lo descubrimos de su sistema objetivo. Si son representaciones parciales, entonces podemos tener razonamiento surrogativo.

Con qué finalidad construimos los modelos depende de nuestros intereses y muchas veces son filosóficos. En general lo que uno esperaría son buenas predicciones, pero ¿Cómo sabemos cuando estamos frente a una buena predicción? Esto tampoco es muy claro: si adoptamos una postura bayesiana, estamos frente a una confirmación si la probabilidad de la hipótesis más la evidencia es mayor que a la probabilidad de la hipótesis por sí sola (Fitelson, 2001). También podría decirse que estamos ante una confirmación si distintos modelos predicen un mismo resultado, pese a usar diferentes parametrizaciones, lo que llamaríamos un *modelo robusto* (Lloyd, 2009). Y entre las cosas que interesan a los científicos del clima es ofrecer modelaciones climáticas que nos den algún tipo de conclusiones sólidas o confiables.

2.1 Clima y cambio climático

La definición estándar de *clima* nos dice que éste es el *tiempo promedio* en un lapso temporal de millones de años a un mínimo de treinta (Otto, 2012). Y el *tiempo* es un estado de la atmósfera que cambia alrededor de nosotros (LeTreut, 2007), su precipitación, la temperatura o las nubes de un determinado lugar, un fenómeno caótico o estocástico.

La definición anterior es sólo una, pero Frigg (2015) distingue al menos cinco definiciones que se agrupan en dos tipos: distribución en el tiempo y distribución de conjunto, cuya distinción no es trivial e imprescindible. Entender lo que es el clima nos deja en una posición privilegiada para entender el cambio climático. Aquí las cinco definiciones del clima, que nos ayudan a identificar el cambio climático:

- 1.- Distribución finita de variables climáticas en el tiempo dados ciertos estados iniciales, las cuales surgen cuando el sistema está sujeto a condiciones externas constantes.
- 2.- Distribución finita en el tiempo de la evolución actual de las variables climáticas.
- 3.- Distribución finita en el tiempo de las variables climáticas que surgen a partir de cierto régimen de condiciones externas variables (dados los estados iniciales).

4. Distribución de posibles valores de variables climáticas a un momento dado, asumiendo que las condiciones externas fueron constantes.

5.- La distribución de posibles estados de variables climáticas a un momento dado.

Según la definición (1), cambio climático significa distintas distribuciones en dos periodos de tiempo sucesivo. Esta definición asume que las *condiciones externas* son constantes, pero no lo son, pueden fluctuar y cambiar el valor medio (Frigg, 2015). Esta definición no captura la distribución del sistema climático, porque debe tomar en cuenta que las condiciones externas pueden variar.

Según la definición (2) si tenemos un periodo de tiempo sucesivo, en el cual hay dos regímenes climáticos, como uno anterior y otro posterior a un impacto de meteorito, entonces esta definición no distingue cambio climático: el clima será sólo la distribución de las variables en dicho periodo y esto es insuficiente porque debemos incluir regímenes de condiciones externas variables.

Una condición básica de (3) es que la media de las condiciones externas sean aproximadamente constantes en diferentes sub-períodos dentro de un periodo. Eso permite que haya distintos regímenes climáticos, por ejemplo, antes y después de un golpe de un meteoro. Y de allí se sigue que cambio climático es diferentes climas para dos periodos de tiempo sucesivo. Qué lapso de tiempo vamos a tomar para afirmar que hay cambio climático puede ser una cuestión pragmática (Lorenz, 1995).

La definición (4) nos dice que el clima es la distribución de las variables climáticas cuando el conjunto de condiciones iniciales evolucionan en el modelo climático hasta un tiempo dado, bajo condiciones externas constantes. Pero otra vez nos encontramos con el mismo problema: las condiciones externas no siempre son constantes, fluctúan y eso puede llevar a diferentes distribuciones el valor medio.

La definición (5) sostiene que el clima es la distribución de variables climáticas que surgen cuando el conjunto de las condiciones iniciales evoluciona a partir del modelo climático hasta un momento dado, para el actual curso tomado por las condiciones externas. Aquí Frigg (2015) distingue dos problemas: el conocimiento del futuro climático depende de lo que sabemos de las variables, no del sistema. Lo que parece anti intuitivo, pues consideramos que el clima es algo independiente. Y segundo, se define el futuro climático, pero no el presente o el pasado, lo cual hace difícil decir que hay cambio climático.

Como podemos ver, la definición de qué es el clima y el cambio climático no es del todo claro. La elección deficiente puede llevarnos a afirmar que no hay cambio climático o a no tener claro qué tomar como referencia para afirmar dicho cambio. La definición que se adopta, en general, es la (3), así que esa es la que también adoptaré.

2.2 Representación científica, modelo y simulación

Ya he dicho que la tarea de la ciencia climática tiene dos objetivos: i) simular y comprender el equilibrio del sistema climático y ii) modelar el desarrollo climático dinámico (Otto, 2012) Para lograr el objetivo (i) debemos comprender la interacción de los elementos de dicho sistema y para lograr (ii) necesitamos conocer los fenómenos transitorios climáticos, como la contribución humana en el cambio del clima.

Los modelos nos permiten identificar variaciones en el clima que explican por qué, por ejemplo, grandes concentraciones de metano o dióxido de carbono implican que la temperatura media global aumente y rompan el balance que existe en el sistema climático y nos lleve a otro balance. Éste no tiene que ser benéfico para la vida humana. De modo que los *modelos climáticos* simulan *el sistema climático*, algunas veces con la finalidad de comprender el equilibrio de éste último y otras para hacer proyecciones a futuro.

Ya tenemos conocimiento sobre algunos procesos climáticos: se sabe que los ciclos de carbono están ligados al incremento de la temperatura desde 1895 (Edwards, 2011) a partir de datos y observaciones gracias a los modelos. La *sensibilidad climática*, es decir, el cambio de temperatura relativo a un forzamiento radiativo, como el cambio en la radiación del sistema climático, es un conocimiento independiente de la modelación; pero no así nuestro conocimiento sobre el futuro del clima y sobre el sistema climático.

Lo que queremos señalar es que no todo lo que sabemos del cambio climático es gracias a los modelos; pero eso tampoco implica que podemos prescindir de estos: no hay ciencia climática sin modelos y sin datos. Si lo que queremos entender es el sistema climático como un todo, es inútil usar sólo datos⁴, tenemos que apelar a los modelos (Frigg, 2015; Edwards, 2011)

Ahora, preguntas tales como ¿Las lluvias seguirán siendo suficientes para el riego de cultivos? ¿Habrá más tormentas tropicales? ¿El incremento del nivel del mar inutilizará algunas ciudades? Son de interés público, ya que la gente, o los gobiernos, no sólo quieren saber si algo dado sucederá, sino dónde y cuándo, porque el cambio climático puede ser visto como un problema de seguridad (CICC, 2007), es decir, atenta contra el cuidado de la integridad de las personas, bienes naturales, culturales y materiales, y para evaluar sus impactos necesitamos echar mano de modelos.

Sólo hay una cosa que se puede saber a partir de la sensibilidad climática: la temperatura aumentará. Y a través de los modelos podemos realizar predicciones de cuánto, dónde y cuándo ocurrirán ciertos eventos, pero volvemos a la pregunta inicial ¿Qué tipo de conocimiento tenemos de los modelos? ¿Cuál es el carácter epistemológico de las proyecciones? Los modelos climáticos deben ser *confiables epistemológicamente*, porque de ellos dependen la toma de decisiones. Qué tipo de confiabilidad esperamos es el problema.

⁴ No entraré en detalle sobre el uso y la forma de obtener los datos. Aquí supongo que los datos son objetivos, independientes de los intereses de quien los captura y los métodos para capturarlos son confiables, en el sentido de que son un reflejo tal cual de lo que están capturando. No obstante soy consciente de que hay una gran discusión en torno a la objetividad de los datos o hechos.

2.2.1 Representación científica

Ya dije que no hay ciencia climática sin modelos, que hay conocimiento que no depende de ellos y que para ciertas cuestiones, como el futuro del clima, tenemos que usarlos, pero ¿Cuál es su estatus ontológico y cómo aprendemos de ellos, su carácter epistémico/representacional? Son algunas de las preguntas que queremos dar cuenta en esta sección.

Primero debemos entender que hay dos cuestiones relacionadas: *la representación científica* (Frigg 2017) y *los modelos en la ciencia* (Da Costa & French 2000). Si los modelos son representaciones, entonces se enfrentan al problema de la representación científica⁵. Eso implica que tienen que hacer frente a los planteamientos de toda postura que afirma que X es una representación de Y. Si la postura estándar acepta que los modelos climáticos *son representaciones* del sistema climático, entonces tienen que hacer frente al problema de la representación.

Los planteamientos que deben tener en cuenta los que aceptan que los modelos son representaciones son: ¿Qué hace que algo sea una representación científica? ¿Cómo distinguimos representaciones científicas de las representaciones no científicas? ¿Qué estilos de representación hay y cómo los distinguimos? ¿Qué distingue a una buena representación de una mala representación o de una que no representa? ¿Qué tipo de objetos sirven como representaciones? Y ¿Cómo se relacionan las matemáticas con lo que representan? (Frigg, 2016)

Autoras como Contessa (2007) niegan que haya representaciones científicas y no científicas, más bien creen que hay *representaciones epistémicas* tales que permiten razonamientos surrogativos, entiéndase éste como descubrir algo del sistema objetivo a partir del modelo que estudia ese sistema (Swoyer, 1991). Pero se enfrentan al problema de ¿Qué constituye una representación epistémica de algo?

⁵ El problema es ¿Qué relación existe entre lo representado y el representante?

En este trabajo sólo revisaremos una de todas estas dificultades, a saber: la representación matemática. Si aceptamos que los modelos climáticos son modelos matemáticos, entonces debemos dar cuenta de qué papel juegan las matemáticas en la representación del sistema climático. Más adelante abundaremos en esta problemática y lo que se desprende de una larga tradición que está interesada en la explicación matemática (Pincock 2012, Saatsi 2010, Baker 2005, 2009)

2.2.2 Modelos científicos

Por otro lado está la pregunta sobre la ontología de los modelos (Frigg, 2017). Esta permea la discusión sobre el carácter ontológico. La ontología es relevante porque de ella depende del tipo de representación. Si un modelo es una entidad matemática, entonces ¿Cómo es que las matemáticas dan cuenta de un sistema no matemático, sino físico? Si son entidades descriptivas, ¿entonces cuáles son las características de un modelo científico?

Prima facie, podemos identificar varios modelos en ciencia. Los hay *físicos* como puentes a escala, barcos de madera, etc. *Objetos ficticios*, como el modelo del átomo de Bohr; estructuras de conjuntos teóricos y otros⁶. Y sostengo que los modelos climáticos son modelos matemáticos.

Primero hemos de identificar los modelos usados en el IPCC (2013), pues son los que tomaremos como referencia. De ellos podemos distinguir cuatro:

- 1) Modelos de circulación general Océano-Atmósfera (GCMs por sus siglas en inglés): Modelos matemáticos que describen la dinámica de los componentes físicos del sistema climático.

⁶ Estructuras de teorías de conjuntos, descripciones, ecuaciones u ontologías *gerrymandered*

- 2) Modelos de sistema tierra: Es un modelo que hace uso de códigos computacionales con la finalidad de dar solución a ecuaciones diferenciales que toman en cuenta ciclos biogeoquímicos.
- 3) Modelos de sistema tierra de complejidad intermedia: Modelos computacionales que permiten simulaciones climáticas a largo plazo.
- 4) Modelos climáticos regionales: Modelos que están limitados a un área, diseñados para representar el proceso climático, aunque a veces sin tomar en cuenta océano y hielo marino.

Debido al hecho de que los modelos que se usan en el IPCC son de carácter matemático, entonces entenderemos los modelos climáticos como *ecuaciones* o modelos matemáticos (Frigg, 2017). En general es una perspectiva que adoptan tanto la postura bayesiana, como la conservadora, la estándar y la posibilista. Aunque eso implica algunos problemas, pero no los revisaremos todos; sino sólo los siguientes:

- a) Podemos representar el mismo fenómeno con distintas ecuaciones, pero eso no implica tener distintos modelos.
- b) Los modelos tienen propiedades que no son las mismas que las que tienen las ecuaciones.
- c) Debemos dar cuenta del rol de las matemáticas en los modelos y su relación con las explicaciones científicas

De momento sabemos que todas las posturas se enfrentan a algunos problemas de la representación científica y los modelos son entendidos como ecuaciones matemáticas.

2.2.3 Simulación

Gran parte de la investigación científica no puede ser pensada sin la simulación. La investigación en el IPCC (2013) no está exenta de eso, pues se habla mucho de las simulaciones para aprender

algo del sistema climático. En general estas les sirven para identificar la media climática, el cambio climático histórico, la variabilidad en distintas escalas de tiempo y los modos regionales de variabilidad (IPCC, 2013: 743).

Voy a entender simulación como una imitación de un proceso por otro (Hartman, 1996) y suelen estar vinculados a modelos computacionales dinámicos, es decir, simulaciones computacionales que evolucionan a través del tiempo, para dar cuenta de la evolución de sistemas discretos (Frigg 2017, Hartman 1996, Humphreys 2011).

Las simulaciones pueden funcionar como una técnica, una herramienta heurística, pedagógica, para los experimentalistas o como sustituto de un experimento (Hartmann 1996). Muchas son las ventajas del uso de simulaciones en ciencia, tanto en ciencias sociales como en ciencias naturales; pero no entraremos en detalle. De momento basta decir que la simulación es la imitación de un proceso por otro, donde *proceso* puede ser entendido como un estado de cosas u objeto que cambia en el tiempo.

Hay algunos problemas con la simulación que no podemos pasar por alto, la primera es (a) ¿Por qué habremos de confiar en los resultados de una computadora? (b) ¿Cómo es que las ecuaciones de la simulación computacional representan su sistema objetivo? (c) ¿Las computadoras dan soluciones precisas para sus ecuaciones?

Las dudas son razonables, pues si la naturaleza de la simulación en el marco del IPCC es de carácter discreto, entonces los resultados podrían ser erróneos. Una ligera variación en las condiciones iniciales o en las ecuaciones dinámicas, pueden cambiar los resultados completamente. Estos problemas los veremos más adelante cuando revisemos cada una de las posturas que mencionamos. Hasta aquí lo más importante es explicar lo que en general vamos a entender por modelo, clima, simulación y representación. Así como vislumbrar algunas de las dificultades a las que nos vamos a enfrentar a lo largo de esta investigación.

3.- El carácter epistémico de los modelos climáticos

En este capítulo presentaré algunas de las posturas filosóficas y científicas sobre el carácter epistémico desde los modelos climáticos, es decir, lo que podemos saber a partir de los modelos climáticos en el marco del IPCC. Estas posturas son: la robusta, la adecuación a un propósito, bayesiana, conservadora y la posibilista. E iré presentando los problemas filosóficos que implican cada una de estas.

3.1.- Modelación Robusta

Autoras como Elisabeth Lloyd (2015, 2010) y Wendy Parker (2011), trabajan a partir de la hipótesis de que los modelos ya son una representación del sistema climático. Lloyd comparte la intuición de Giere, de que los modelos son una representación del mundo, sobre algún aspecto particular (Giere, 2010). Así que el interés de la autora se centra en saber cuándo *se valida* un modelo. La razón que tiene para centrarse en ese aspecto es la siguiente: si el modelo climático es una representación del sistema climático, entonces la validación de alguna característica del mismo confirma algo de lo que representa.

Según lo anterior, si tomamos algún *modelo de circulación general (GCM, por sus siglas en inglés)* y este nos dice algo, por ejemplo, el enfriamiento de la estratósfera, entonces se confirma el elemento del sistema real. Esta parece ser una intuición bastante sólida, porque en general no ponemos en duda sobre si los modelos son una representación de algo. Vamos a suponer por el momento que es verdad que los modelos climáticos son representaciones del sistema climático. El problema que tienen que enfrentar los de la visión robusta es ¿Cómo se valida un modelo climático?

Las autoras que defienden la modelación robusta (Lloyd, 2010; Parker, 2006; Oreskes, 1994) sostienen que la validación de los modelos es gradual y nunca completa. En simulaciones científicas el término *validación* se entiende como lo siguiente: “el proceso de determinar si el modelo elegido es una representación suficientemente buena del sistema del mundo real para el propósito de la simulación⁷” (Winsberg, 2018).

No es irrelevante saber si un modelo es validado o no. Recordemos aquel caso de una carta firmada por sesenta y seis científicos y enviada al Primer Ministro canadiense Stephen Harper, que más tarde se publicó en el *Financial Times* el 16 de abril del 2006. En ella se afirmaba que la evidencia observacional *no valida* los modelos y no había razón para confiar en estos.

La idea filosófica de lo anterior es que la validación es de dos valores: válidos, los resultados de los modelos pueden ser comparados con los datos observables o inválidos, los resultados de los modelos no pueden ser comparados. Luego si esa es nuestra definición de validación y se da el caso de que los modelos climáticos no se pueden validar así, entonces no había razón para confiar en ellos. Lo que implica no confiar en sus predicciones, en este caso por ejemplo, sobre el cambio climático.

Lo que queremos expresar con el ejemplo anterior es que no es *filosóficamente inocente* una definición como la de *validación*, porque puede llevar a la gente a creer, por ejemplo, que no hay tal cosa como cambio climático. Así que los defensores de la validación robusta sostienen que la validación es gradual (Lloyd, 2010).

La *robustez* es el cotejo de resultados arrojados por distintos modelos, que suelen ser de diferentes grupos de trabajo, pero que simulan el mismo periodo de tiempo o tienen un mismo propósito (variables climáticas, como la temperatura) (Kiehl, 2007), al final los resultados se comparan con los datos observados (Lloyd 2010). Si los resultados promedio de los modelos

⁷Process of determining whether the chosen model is a good enough representation of the real-world system for the purpose of the simulation

están de acuerdo sobre el comportamiento de una variable observada (la temperatura), entonces así es como de hecho funciona. Por otro lado, si el promedio de los resultados están en desacuerdo sobre variable observada, entonces los modelos están mal.

Una objeción podría ser que los resultados de los modelos no hace sean confiables, podría ser que los modeladores tienen convenciones y prácticas compartidas que hace que obtengan los mismos resultados (Edwards, 1999). Pero para Lloyd y Wendy basta con que los modelos sean tan heterogéneos entre sí (excepto en sus propósitos) para que el resultado sea confiable.

El análisis de Weisberg (2006) nos dice que si hay una estructura nuclear (lo que tienen en común los modelos), entonces obtendremos una propiedad robusta (como la GMST). Para estar seguros de que la propiedad es producto de la primera, los modelos deben ser tan heterogéneos como sea posible.

Según Lloyd, la propuesta de Weisberg depende de la variedad de evidencia: si la evidencia es más heterogénea entre sí y predicen lo mismo, más robusto es el resultado, *grosso modo*. Por ejemplo, la hipótesis de que las aves descienden de los dinosaurios es sostenida por evidencia fósil, embrional, análisis del ADN y demás. Pero Lloyd defiende el *modelo robusto (model robustness)* que es un conjunto de modelos M_1, \dots, M_n o como en mi ejemplo: un grupo constituido por Valverde, Quintana, Medea y Chipollini.

El modelo robusto es un conjunto de modelos M_1, \dots, M_n , el cual tiene un componente en su núcleo causal, por ejemplo, los gases de efecto invernadero. Éste nos ofrece un resultado T , que puede ser el incremento de la temperatura media global y que será la propiedad robusta. Cada uno de los integrantes del conjunto tienen parametrizaciones (valores matemáticos), valores y asunciones diferentes, lo que se conoce como *supuestos indexados (indexed assumptions)*, IA (por sus siglas en inglés).

Cada una de las IA puede ser soportada por evidencia observacional o evidencia experimental. Un ejemplo de evidencia observacional son los datos paleoclimáticos y de evidencia experimental son las proyecciones que dependen de ecuaciones termodinámicas de su núcleo causal.

La idea es que mientras más heterogéneos sean los modelos, más confiables serán. De modo que si el conjunto de modelos M_1, \dots, M_n , confluyen en un resultado T , y son tan heterogéneos como sea posible entre sí (excepto en lo que quieran modelar) estamos mejor justificados en creer que T es el caso (Weisberg 2006; Levins 1968).

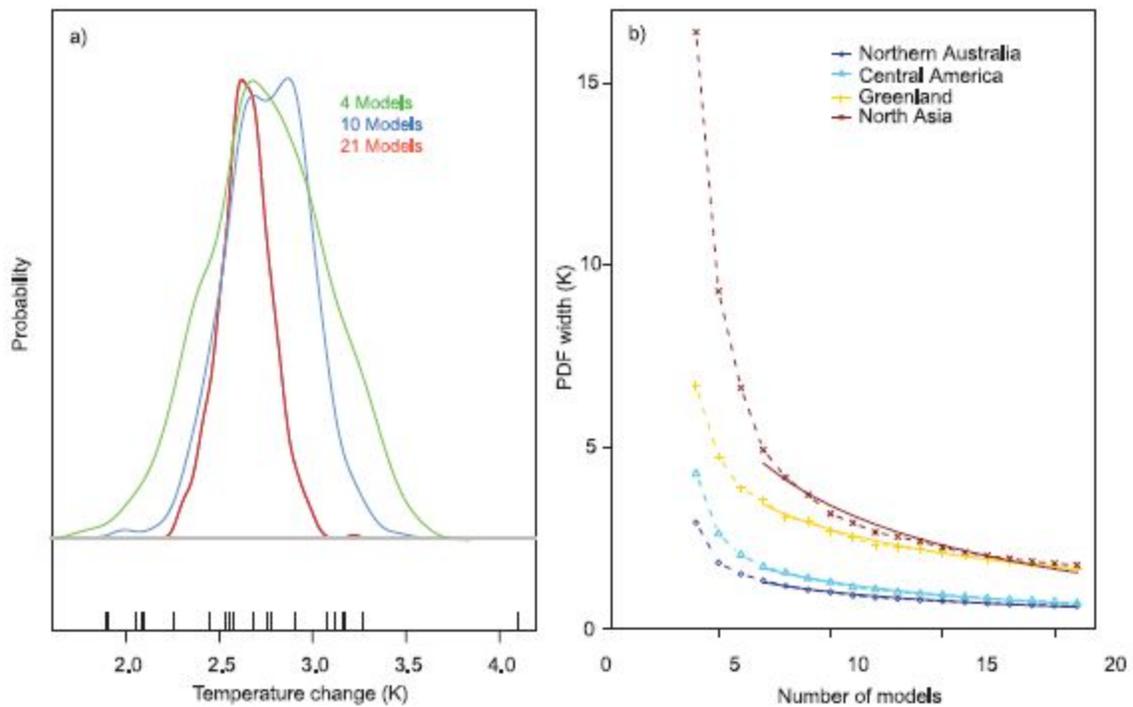


Figura 2 (Fuente: Knutti et al. 2010) ⁸

⁸ A lo largo del trabajo presentaré estos mismos resultados, de la figura 2, para mostrar cómo las distintas posturas interpretan los resultados de los modelos.

Así es como un análisis robusto exploraría los resultados de los modelos de la figura 2. El *modelo robusto* es el conjunto de modelos: el conjunto de cuatro modelos (en verde), el de diez modelos (en azul) y el de veintiún modelos (en anaranjado). Cada modelo robusto da una *propiedad robusta* T. Por ejemplo, el modelo verde nos dice que la propiedad robusta T es que el cambio de la temperatura para el año 2080-99, relativo al periodo 1980-99, oscila entre los 3.7 °C y 2°C. Para el modelo azul muestra que estará entre los 3.5 °C y 2.4 °C. Y para el modelo anaranjado estará entre los 2.4°C y 3.1°C. Asumimos que cada modelo robusto es tan heterogéneo entre sí. Si ese es el caso, entonces más confiables será. Luego, como hay más modelos en el modelo robusto anaranjado, que en el azul, entonces es más confiable creer que la temperatura para el año 2080-99, relativo al periodo 1980-99, estará entre los 2.4 °C y 3.1 °C.

Si el conjunto de modelos es responsable de la validación de un resultado robusto, entonces hay algo que comparten los modelos que garantiza su validez. Para Lloyd sólo podemos aspirar a una validación gradual y quizá haya un componente en el grupo de modelos que los acerque a un mismo resultado robusto.

Entre los componentes de los modelos están las ecuaciones Navier-Stokes (ecuaciones que describen el movimiento de un fluido, como la atmósfera terrestre o corrientes oceánicas), principios como la conservación de la energía e información observacional. Esos elementos están altamente corroborados, es decir, gobiernan parte del sistema tierra; pero hay otros componentes como las *parametrizaciones* o *tuneos* (Katzav 2014, 2012) que no necesariamente gobiernan el comportamiento del sistema tierra. Las parametrizaciones son representaciones de las que se hace uso en los modelos cuando no hay representaciones explícitas de los procesos físicos, es decir, muestran el efecto de un proceso que ocurre a escala mayor en una escala menor (Katzav, 2012).

Debemos saber qué componentes garantizan la validez de un modelo. No son las afirmaciones teóricas, altamente corroboradas, como los principios de la conservación. Si eso es así, entonces bastaría con construir modelos con principios altamente corroborados. Entonces

tendrían que ser los otros componentes, las parametrizaciones o tuneos, los que garantizan el éxito del modelo robusto (Katzav, 2014). Pero los tuneos y parametrizaciones son, en cierto sentido, falsos, donde *falso* voy a entenderlo como que no tienen referente directo en el sistema tierra.

Quizá podría objetarse: las parametrizaciones y tuneos no son falsos, sólo inexactos o subjetivos (porque son los modeladores quienes, en algunas ocasiones, completan los datos). Es el tuneo de los GCMs lo que permite simular la tendencia de la GMST, aunque sea de forma más o menos exacta, es decir, que se acerca a representar su sistema objetivo. Aunque es una postura más débil sostener que los elementos compartidos entre los modelos corroboran en cierto grado la validez de los modelos robustos. Y si lo que quieren los científicos es una modelación realista, que nos diga cómo de hecho es el sistema climático, entonces la corroboración de un modelo, en grados, no es de mucha ayuda.

Por otro lado podríamos asumir que el conocimiento teórico compartido por los modelos permite la corrección de supuestos falsos: decirnos cuáles no contribuyen al éxito del modelado. La corrección no tendría por qué comprometer el éxito de los resultados. En este sentido, los modelos no son los responsables de corregir sus asunciones falsas, sino el conocimiento teórico en el que descansan. Luego, éste último podría decirnos qué asunciones no son las responsables del éxito, pero no podría decirnos cuáles sí son responsables del éxito.

Cuando no sabemos cuáles supuestos compartidos son falsos, se vuelve una tarea mucho más complicada. No importa si sabemos cómo identificar los supuestos compartidos que contribuyen al éxito del modelado, de los que no, mientras no sepamos cuáles son los falsos que ayudan a validar el modelo robusto.

Si no sabemos dónde tenemos que mejorar las asunciones, dónde tenemos que corregirlas, cuáles de hecho son falsas y cuáles dependen de nuestro limitado conocimiento, no estaremos cerca de corroborar el éxito de la modelación robusta. Como ya dije en un principio:

el éxito del modelo robusto depende de sus supuestos compartidos, de los cuales hay altamente corroborados y los que no son altamente corroborados. A los primeros no se les puede evaluar en el modelo y de los segundos no tenemos idea muy clara de cómo corregirlos, y si lo supiéramos, necesitamos un método para encontrar todos los supuestos falsos.

La modelación robusta dice que puede darnos resultados robustos T; pero no sabemos qué elementos comparten los modelos que son los responsables de la validación de los mismos. Sabemos que no son los principios teóricos, porque entonces sería suficiente hacer modelos con esos principios; pero no es así. Y si debilitamos la postura, diciendo que las parametrizaciones son las responsables del éxito de los modelos y que no son falsas, sino inexactas, entonces ¿Cómo pretendemos que el resultado del modelo robusto sea una representación exacta del sistema climático? Si un resultado robusto nos dice que la temperatura media tiende a seis grados centígrados en los próximos cincuenta años, pero eso tiene un cierto grado de verdad o falsedad, no sabremos cómo entenderlo.

El problema del que adolece esta propuesta es ¿De dónde proviene la validez de los modelos robustos? Y si la validez de un modelo, entendido como en grados de ajuste con los datos, es gradual ¿cómo debemos entender los resultados robustos? ¿como parcialmente válidos o inválidos?

3.2 Adecuación a un propósito

Algunas de las principales defensoras de la adecuación a un propósito son Wendy Parker (2009) y Alexandrova (2010). Parker nos dice que las *instancias de ajuste*, las coincidencias entre los datos observados y los *resultados* de los modelos, confirman hipótesis sobre la adecuación de un modelo climático a un propósito, pero no el modelo climático.

La hipótesis a partir de la que trabajan estas autoras es que los modelos climáticos *son herramientas representacionales*. Esta posición abreva de una postura pragmatista y utilitarista, como la de Peirce (1973) quien afirma que una representación lo es de algo (X) por otra cosa (Y) *para* algo más (Z) (Ibarra & Mormann 2000).

Según Parker, la relación entre el modelo climático y su sistema objetivo no puede ser confirmado con verdad ni por adecuación empírica, a lo más que podemos aspirar es a saber si dicha relación sirvió para su propósito. En otras palabras, las hipótesis de los modelos climáticos no pueden aspirar a ser verdaderas o a la adecuación empírica. Incluso podríamos decir que Parker apela al razonamiento subrogativo “el modelo (...) expresará información sobre el sistema objetivo que permite a los usuarios del modelo inferir respuestas correctas a las cuestiones objetivo” (2009: 236)

Hay varias definiciones de la adecuación a un propósito y distintos resultados (Katzav 2014; Alexandrova 2010). Para demostrarlo seguiré haciendo uso de la gráfica expresada en la figura 2. Con la finalidad de demostrar que un mismo resultado de modelos, no sólo se puede interpretar de distintas formas dependiendo de la postura que se adopte, incluso dentro de una misma hay varias posibles interpretaciones.

a) Como Katzav (2014) y Alexandrova (2010) sugieren que podríamos reducir el conjunto de objetivos que pueden ser objeto de adecuación a un propósito, estudiar una cantidad climática, en un rango de tiempo, bajo determinadas condiciones; pero las cantidades climáticas están fuertemente relacionadas unas con otras. Así que estudiar una cantidad implica simular varias.

Por ejemplo, si los modelos de la figura 2 describen la cantidad climática, el cambio de temperatura global anual, para el año 2080-99 con cierta precisión, entonces cumplen su propósito. Y además cumple con las condiciones: estudiar una cantidad climática, la temperatura;

⁹ the model (...) will convey information about the target system that allows model users to infer correct answers to the target questions

en un rango de tiempo, 2080-99, bajo ciertas condiciones, relativas al periodo 1980-99. Debe quedar claro que desde esta postura sólo se valida el propósito para el que están diseñados los modelos, en este caso la predicción del cambio de la temperatura global anual y nada más.

b) Otra forma de caracterizar la postura de Parker es a partir de las siguientes dos condiciones:

- i) Determinar qué observaciones se esperan
- ii) Que lo que se observa se ajusta con lo que se espera observar

Si la hipótesis sobre la adecuación de un modelo para un propósito cumple con las condiciones (i) y (ii), entonces la hipótesis sobre la adecuación del modelo está confirmada. En otras palabras, si un modelo es adecuado para un propósito, entonces determina qué observaciones esperar y que lo que se espera observar de hecho se observa.

Para el caso de los resultados de la figura 2, hay al menos tres conjuntos de modelos que nos describen qué cambio de temperatura global anual debemos esperar para el año 2080-99 y además si la temperatura que nos dice que vamos a observar de hecho la observamos, para ese lapso de tiempo, entonces el propósito para el que están diseñados los modelos se cumplen.

No debe sorprendernos que si la temperatura media global ronda, para ese lapso de tiempo, los 3,5°C, entonces el conjunto de modelos en rojo no cumple su propósito; pero sí el conjunto de modelos en azul y verde. El que los modelos cumplan con su propósito es una postura pragmatista: sólo está interesada en que los modelos cumplan con su propósito y nada más. No con que sean representaciones isomórficas, que los modelos sean validados, que tengan poder predictivo, etc. Por ejemplo, la postura robusta esperaría que si más modelos predicen lo mismo, más confiable es su resultado; para la adecuación a un propósito eso no es lo relevante. Los modelos de la línea roja podrían fallar en su predicción y los de la línea verde acertar, pese a tener menos modelos: los últimos serían adecuados para su propósito y los primeros no.

Si queremos determinar si un modelo es adecuado para el propósito de predecir, entonces debemos establecer si las simulaciones de cantidades climáticas observadas son exactas para ese propósito. Pero hay un problema, no podemos simular una cantidad climática independiente de otras cantidades, a menos que estemos dispuestos a perder poder predictivo.

Aún más, tenemos conocimiento limitado de las cantidades climáticas. Un error para simular una cantidad observada puede reproducirse a lo largo de la simulación y comprometer la capacidad explicativa o predictiva de otra cantidad climática. Además debemos conocer muy bien la relación que existe entre las cantidades climáticas, de modo que hay que tener en consideración dos cosas: i) la relación entre cantidades climáticas y ii) conocer con exactitud varias cantidades. Eso hace aún más difícil de llevar a cabo la postura de la adecuación a un propósito.

c) Otra forma de caracterizar esta postura es de la siguiente forma: la evaluación a un propósito debe ajustar las cantidades climáticas simuladas de los modelos con la finalidad de corregir sus asunciones y resultados. Esto implica conocer cómo se relacionan cantidades climáticas observadas con las que no han sido observadas, por ejemplo, el estado de las cantidades climáticas en un futuro con las del presente.

Si analizamos los resultados de la figura 2 desde esta definición, entonces nos dice lo siguiente. Cada conjunto de modelos puede tener cierta aproximación al mundo real, con un margen de error. Si tenemos más modelos, como en el caso de la línea roja, esto se debe a que las proyecciones de unos modelos corrigen las asunciones de otros y nos dan resultados más homogéneos. En principio, esos ajustes entre los modelos deberían mostrarnos cómo se relacionan las cantidades climáticas observadas con las no observadas. Por ejemplo: mostrar cómo se relaciona el cambio de la temperatura anual del año 2080-99 relativo al periodo 1980-99.

Deberíamos confiar en los resultados de los modelos, según esta postura, porque nuestra confianza descansa en que hay evidencia empírica que apoya nuestro conocimiento de las dependencias de las cantidades climáticas. Pero no todos los GCMs están de acuerdo en sus resultados sobre la relación de las dependencias (Swansonm, Sugihara, & Tsonis, 2009), pues no sabemos cuál es la evidencia a favor de algunas dependencias de las cantidades climáticas.

Quizá no importa qué tan precisos son los modelos para simular las relaciones o dependencias de las cantidades climáticas; sino basta con que estos estén de acuerdo sobre un mismo resultado y difieran en sus asunciones, es decir, sólo necesitamos apelar a distintos modelos. Si un modelo no predice lo que otros modelos sí, entonces puede ser corregido a la luz de estos resultados. Y eso podría permitir corregir las limitaciones de los modelos.

El problema es que si los modelos tienen errores compartidos, entonces no podemos explorar sus limitaciones. Decir que para ello tenemos que apelar a más modelos pide la cuestión. Asumir que no tienen errores implica que pueden predecir con exactitud, por ejemplo, la GMST; pero de hecho no la pueden producir con exactitud, entonces tienen errores.

Podríamos decir que no se puede confirmar su una hipótesis sí puede ser refutada o indeterminada por el conocimiento de las limitaciones de los modelos. Por ejemplo, sabemos que los GCMs no pueden predecir con precisión la GSMT. Pero si lo que nos interesa es sacar conclusiones sobre el sistema climático, entonces no nos ayuda mucho conocer las limitaciones de los modelos. Si la adecuación a un propósito sólo nos da información sobre cómo corregir nuestros modelos, entonces sólo ofrece una forma de mejorar los modelos, no para generar políticas.

Lo que nos interesa es poder formular políticas confiables a partir del conocimiento que tenemos de los modelos climáticos. Esta postura no nos ayuda mucho, porque aspira a mostrar limitaciones de los modelos y la forma de corregirlos; pero no nos dice nada sobre el sistema

climático, que es lo que en este trabajo nos interesa. Así que no nos ayudaría mucho apelar a esta postura si queremos saber algo del sistema o incluso tomar decisiones.

3.3- Conservadora

En la actualidad hay varios *modelos computacionales* construidos con la finalidad de *detectar y atribuir el cambio climático*. Entre ellos se encuentran los *modelos de circulación general de océanos y atmósfera (GCMs)*, cuya función es comprender la dinámica de los componentes físicos del sistema climático y ofrecer proyecciones apoyados en forzamientos de GEI y aerosoles. Los *modelos del sistema tierra*, que ayudan a entender ciclos biogeoquímicos implicados en el ciclo de carbono, el ciclo del ozono, entre otros; *modelos del sistema tierra de complejidad intermedia o modelos climáticos regionales (IPCC, 2013)*, son algunos de los modelos más usados por el IPCC.

El IPCC considera indispensables estos modelos, en el sentido de que sin ellos sería imposible determinar las relaciones causales que existen entre los elementos del sistema climático. La razón es que el éxito en la modelación climática nos dice cómo de hecho es el sistema climático (Katzav, 2014), posición que adoptan el IPCC (2007, 2013), porque nos ayudan a detectar si hay tal cambio y su atribución (Katzav & Parker, 2015).

Ahora bien, la interpretación conservadora nos dice que los resultados de los modelos de la figura 2 son una representación de lo que sucede, o sucederá, en el sistema climático si las cosas se mantienen como hasta ahora. Por ejemplo, si los resultados de los modelos nos dicen que el cambio de la temperatura global para el lapso de tiempo del año 2080-99 será entre 2.5°C y 3.5°C, pero relativos al periodo de 1980-99, entonces será el caso que la temperatura global para el lapso de tiempo del año 2080-99 rondará entre 2.5°C y 3.5°C. En otras palabras: si se mantiene la tendencia en la liberación de GEI, entonces podemos esperar que un escenario climático se dé. Por supuesto, los resultados de todos esos modelos son comparados

constantemente en lo que se conoce como el *Coupled Model Intercomparison Projects (CMIP3 2007 y CMIP 5 2011)* (IPCC, 2013).

La postura, aunque parezca posibilista, es más bien una estructura condicional o determinista. Deben cumplirse las condiciones del antecedente, en este caso que las tendencias de los GEI sean las mismas, relativas a la década de 1980-99, para que se cumplan las proyecciones de los modelos. De modo que si se cumplen las condiciones determinantes, entonces podemos esperar que las proyecciones ocurran. Si las condiciones del antecedente (determinantes) no se cumplen, aún así podría ocurrir el consecuente, por ejemplo, que la proyección del aumento de la temperatura para el año 2080-99, rondará los 2.5°C y 3.5°C. No obstante, no parece claro entonces cómo un modelo tiene poder predictivo, si no hay vínculo entre lo que dice que sucederá y lo que de hecho sucede. Esto sólo lo remarco porque hacer ver con claridad que la propuesta conservadora no tiene una estructura posibilista, sino determinista; pero parece posibilista por su carácter condicional.

Ahora aquí algunos de los problemas relativos a esta postura:

- 1.- El problema de la validación de los modelos
- 2.- El problema de la representación matemática

De todos estos problemas queremos concluir que la visión conservadora no puede garantizar conocimiento sobre el futuro del clima; pero sí tiene sentido decir que nos da conocimiento modal de lo que es físicamente posible. Si lo anterior es verdadero, entonces al menos en el marco del IPCC el conocimiento que nos dan los modelos va encaminado al conocimiento modal y no al representacional.

Problema no. 1

Los modeladores tienen como objetivo generar proyecciones confiables sobre el futuro climático, a veces con la finalidad de generar políticas y tomar decisiones para la vida diaria. Si un modelo puede predecir el clima pasado y presente, entonces puede predecir el futuro. Pero del hecho de que un modelo pueda retrodecir los datos paleoclimáticos no parece implicar que pueda darnos conocimiento con certeza lo que sucederá en el futuro.

Sabemos que los datos que se recaban para los modelos no siempre son exactos, algunos contienen errores, por lo general, son incompletos o incluso están tuneados. Por ejemplo, no podemos saber la temperatura del mundo en cada punto y tampoco contamos con los datos del pasado, anteriores al año 1800. Como ya mencionamos, los datos dependen de los modelos y los modelos de los datos (Edwards, 2011; Frigg, 2015) ¿Pero en qué sentido dependen los unos de los otros?

Los modelos son interpretados a la luz de los datos, cuando se valida un modelo, se espera que éste *se ajuste o prediga* los datos observados: los datos son filtrados a través de los modelos. Muchas veces la construcción de estos pasa por algo conocido como *tuneo*, es decir, se hace uso de los datos para construir el modelo, pero también para validarlos. A esto es lo que se conoce como *carga teórica* (Edwards 1999; Norton y Suppe 2001; Frigg 2015).

El planteamiento es, ¿los mismos datos pueden ser usados para validar como para construir un modelo? Para algunas autoras (Steele y Werndl, 2013) es legítimo el uso del *doblo conteo*: usar los datos para validar como para calibrar o tunear un modelo; pero para otras personas (Frigg, 2015) no es el caso.

Consideremos lo que nos dice Frigg: proyecciones climáticas para escenarios con altos forzamientos no ha sido experimentados, salvo los escenarios para forzamientos bajos. No parece claro que situaciones de éxito para forzamientos bajos sea una buena razón para los de alto. Si los modelos son parametrizados con datos empíricos actuales y pasados, ¿cómo esperamos que sean una guía confiable para aquellas situaciones para las que no han sido el caso? Un modelo

calibrado para un mundo con manglares u océanos árticos cubiertos de hielo podría no guardar la misma relación en uno donde hay más o menos manglares o los océanos árticos están completamente derretidos.

¿Pero qué pasa con los modelos que contemplan el incremento de la temperatura media del planeta? (Oreskes, 2007) Creemos que esos modelos son confiables. Por ejemplo, el IPCC (Summary for policymakers 2013), nos dice que las simulaciones de los modelos climáticos muestran una tendencia en la temperatura media global y que además están de acuerdo con lo que se ha observado; pero sus resultados dependen más de nuestro conocimiento de la dinámica física de los GEI y no de la confianza directa de los resultados de los modelos mismos. Como mencionamos con anterioridad, hay cosas que sabemos bien y que no depende del conocimiento obtenido por los modelos (Edwards, 2011), y ésta parece ser una de esas situaciones que sabemos con independencia de los modelos.

También está en juego el poder predictivo de los modelos climáticos (Frigg, 2014) por lo que se conoce como el problema del *error del modelo estructural (EME)*. Este nos dice que si la dinámica de un modelo difiere de la dinámica del sistema objetivo, entonces tienen un EME. Luego, si un modelo tiene un EME, entonces la capacidad para generar predicciones probabilísticas relevantes para la toma de decisiones está en duda.

Como vimos con anterioridad, sabemos que un ligero cambio en los parámetros o estados iniciales de un modelo dinámico, como lo son los modelos climáticos, pueden llegar a ofrecernos resultados completamente diferentes, así sus estados iniciales estén tan cerca como sea posible de las condiciones reales. Esto es lo que se conoce como el *efecto mariposa* o dependencia sensible de las condiciones iniciales (DSCI). Pero se cree que con futuras correcciones, por ejemplo, tener los estados iniciales correctos, podríamos dar solución al problema DSCI, aunque permanecerá el problema EME.

Algunas de las formas para hacer frente a los problemas de la DCSI y EME apelan a la distribución probabilística. Sin entrar en detalle de las ecuaciones, podemos decir que si no podemos determinar con certeza un estado posible del sistema, dadas las condiciones iniciales, al menos podemos determinar el rango probabilístico donde se puede encontrar un estado cualquiera en un momento dado. Por ejemplo, determinar la probabilidad de que el planeta aumente su temperatura en 8 °C para el año 2100, es decir, un estado posible del sistema, dadas nuestras condiciones actuales, para un tiempo x . Pero esta solución entra en el siguiente capítulo: la postura bayesiana o probabilística.

Hasta aquí podemos decir que es difícil saber si los datos actuales, con los que se parametrizan los modelos, sirven para determinar el futuro del clima (Frigg, 2015) y si las predicciones de los modelos son confiables, debido a la existencia de problemas como el DCSI y EME (Frigg, 2014). Además de si es legítimo el uso de los mismos datos para construir un modelo, como para validarlo. Porque una cosa podría ser que el modelo pueda *replicar* datos pasados y otra muy distinta es que pueda *predecir* estados futuros. Frisch (2015) y Werndl y Steele (2013) han hecho una buena defensa del doble conteo, que apela al bayesianismo, así que lo revisaremos en el capítulo siguiente. Pero de momento podemos decir que no bastaría con que un modelo retrodiga muy bien el pasado climático o el presente, pues no garantiza que el futuro será como dice que es.

Problema 2.

Se ha puesto muy poca atención a algo que se asume como hipótesis de trabajo: los modelos climáticos son representaciones del sistema climático (Frigg, 2017; Frigg, 2016). El problema es ¿Cómo es que los modelos representan los sistemas que tienen como objetivo? El planteamiento es relevante porque, si esperamos que nuestros modelos climáticos nos digan algo del sistema climático, entonces debemos saber en virtud de qué nos dicen algo del sistema. No

basta decir que los modelos son representaciones de algún tipo, sino que necesitamos razones a favor.

La creencia es que los modelos son una imagen tipo espejo de lo que representan y esto es lo que se conoce como *la posición realista* (Frigg, 2016) ¿Todos los modelos tienen que ser realistas? No, no es necesario que lo sean. Esto nos deja espacio a que haya representaciones no realistas, que aquí llamaremos *no actuales*. Lo que nos permitirá, más adelante, hablar de representaciones de posibilidades físicas no actuales, que es lo que aquí defendemos.

El *problema de la representación científica* es un conjunto de planteamientos que están interrelacionados, como lo mencionamos al principio. Así que sólo nos centraremos en el que nos preocupa ¿Cómo es que el aparato matemático usado en los modelos representa el mundo físico? (Pincock, 2012)

Primero, podemos afirmar que *modelos climáticos* son un tipo de *modelos híbridos* (Katzav, 2014: 9) Y éstos últimos son modelos matemáticos que tienen principios teóricos bien corroborados. Ya sea ecuaciones de mecánica newtoniana o termodinámicas. Si los modelos climáticos son modelos híbridos, entonces son modelos matemáticos (Katzav, 2012). Sobre eso podríamos estar de acuerdo; pero hay problemas sobre el rol que desempeñan las matemáticas en los modelos. Por un lado si asumimos que los modelos son representaciones, entonces el papel que juegan las matemáticas en los modelos es representacional. Por otro, si decimos que podemos obtener conocimiento de los modelos, entonces las matemáticas sirven para dar explicaciones. ¿Las matemáticas sirven para representar o para explicar?

Estamos frente a unos de los problemas contemporáneos en los que se discute el papel que desempeñan las matemáticas en la ciencia (Pincock 2012, Saatsi 2010). Si la implicación no se ve muy clara, de por qué debemos estar interesados en el papel que juegan las matemáticas en la modelación climática, entonces debemos considerar lo siguiente.

¿Cómo se relacionan las matemáticas con lo que representan? Si aceptamos que los modelos son representaciones y además éstas representaciones son matemáticas, entonces debemos saber cómo se relaciona lo representado con lo que representa: cómo se relacionan las matemáticas con sus sistema objetivo. Pero asumir que el papel que desempeñan las matemáticas es *representacional* zanja la cuestión de si su papel es explicativo (Baker 2005, 2009; Lyon y Colyvan 2008), representativo (Pincock 2012, Saatsi 2010) o unificador (Morrison, 2007), lo que se conoce como *definir la cuestión*.

Por mor del argumento, podemos asumir que las matemáticas nos dan conocimiento del mundo, aunque de ello no se sigue que éstas desempeñen un papel explicativo (Saatsi, 2011); por ejemplo, hay quien cree (Contessa 2007; Swoyer 1991) que la única diferencia entre los modelos científicos, de los que no lo son, es *el razonamiento subrogativo*: el conocimiento que podemos tener de su sistema objetivo a partir de ellos y no tiene que implicar matemáticas. El IPCC asume que los modelos climáticos nos permiten entender el cambio climático y las proyecciones del futuro del clima¹⁰, ¿pero entendemos el sistema climático porque los modelos lo explican o lo representan?

Consideremos lo siguiente. Los modelos GCM echan mano de ecuaciones Navier-Stokes. En general, estas sirven para describir movimientos de fluidos newtonianos, lo que permite a los modelos simular la dinámica atmosférica y oceánica. Dichos GCM también implican algunas otras cosas como las parametrizaciones como transferencias radioactivas, precipitaciones, etc. Un esquema de transferencia radiactiva permite simular el rol que desempeñan los GEI y el efecto de las partículas de aerosol. ¿Los GCM explican o describen la dinámica de los GEI en el sistema climático?

Si sostenemos que los GCM explican la dinámica de los GEI en el sistema climático, entonces el problema al que nos enfrentamos es ¿cómo es que las matemáticas pueden jugar un rol explicativo? (Batterman, 2008). Algunos autores (Baker 2009, Pincock 2011) afirman que

¹⁰ http://www.ipcc-data.org/sim/gcm_monthly/AR5/index.html

hay entidades matemáticas que juegan un rol explicativo. La razón por la que se centran en esas entidades puede deberse al debate de la indispensabilidad de las matemáticas en ciencias naturales: las entidades matemáticas son explicativamente indispensables. Por otro lado también encontramos a defensores de lo que se conoce como explicaciones de mapeo (*mapping accounts*), pero de esos hablaremos más adelante.

El argumento de la indispensabilidad nos dice lo siguiente:

- 1) Deberíamos racionalmente creer en la existencia de cualquier entidad la cual juegue un rol explicativo indispensable en nuestras mejores teorías científicas
- 2) Los objetos matemáticos juegan un rol explicativo indispensable en la ciencia.
- 3) Por lo tanto, deberíamos racionalmente creer en la existencia de objetos matemáticos¹¹ (Saatsi, 2010)

Para sostener lo anterior, varios autores (Baker 2009, Lyon y Colyvan 2008, Batterman 2008) han argumentado que las matemáticas juegan un rol explicativo de la naturaleza, ofreciendo algunos ejemplos, como el porqué las abejas dividen el panal en hexágonos, apelando a la prueba de Hales (1999). O por qué el ciclo de vida de la cigarra de Norteamérica es de 13 o 17 años de vida, en vez de cualquier otro periodo.

Ha habido muchos detractores del argumento de la indispensabilidad, en sus diferentes formulaciones, entre ellos Saatsi (2007, 2011) quien afirma que el poder explicativo de las matemáticas descansa en su capacidad de representar su sistema objetivo. Leng (2005, 2010) cree que hay explicaciones matemáticas, pero el hecho de que las haya, no nos compromete con la existencia de tales entidades, es decir, no tenemos que comprometernos con la verdad de las proposiciones que sostienen una explicación. Esta es una forma de caracterizar el realismo en las

¹¹ Esta es sólo una forma de presentar el argumento de la indispensabilidad, para ver más formulaciones puede confrontarse el trabajo de Colyvan (2001). Por brevedad aquí sólo presentamos una formulación.

matemáticas vía la verdad, y no la existencia (Colyvan, 2001)¹². Bangu (2008) argumenta que si para la formulación del problema el lenguaje matemático es esencial, entonces corre el peligro de pedir la cuestión.

El problema de la explicación matemática y el rol que juega en las explicaciones científicas no es del todo claro. Es una dificultad a la que tienen que hacer frente los filósofos de las matemáticas, pero también los filósofos de la ciencia; porque si las explicaciones científicas echan mano de las matemáticas, entonces debemos saber qué rol juegan. Dada la dificultad de esta cuestión, nos decantamos a abordar el problema desde la perspectiva de la *representación matemática*, que, por cierto, es una propuesta alternativa al papel de las matemáticas en la ciencia. Además, el IPCC sostiene que los modelos son representaciones del sistema climático, entonces tenemos que hacer frente a la postura de las matemáticas como representación, desde la tradición de la filosofía de las matemáticas¹³.

Si los CGM son representaciones de la dinámica de los GEI en el sistema climático, entonces ¿Cómo es que las matemáticas representan el sistema físico? Para pensadores como Pincock (2011a) y Saatsi (2010), las estructuras matemáticas capturan correctamente la estructura física. En principio porque, según Pincock, el sistema físico es matemático; es decir: la estructura relacional formal del sistema físico tiene la misma configuración que los sistemas relacionales formales matemáticos. Para otros pensadores (Bueno y Colyvan, 2011) dado que las matemáticas son una fuente de estructuras, algunas pueden capturar la configuración del sistema físico.

Para avanzar podemos aceptar que los actuales modelos climáticos no capturan con precisión el sistema climático, debido a los fallos que existen en su construcción, falta de datos, parametrizaciones, etc. Y también porque la estructura matemática es una idealización del

¹² Hay varias formas de caracterizar el realismo y anti realismo en matemáticas: vía la existencia de las entidades, vía la verdad, o por medio de la distinción semántica y metafísica. Para abundar más en el tema pueden confrontar Colyvan (2001)

¹³ La representación de las matemáticas pueden entenderse como descripciones, de modo que se enfrentarían a los mismos problemas. Para una discusión más detallada Frigg (2017)

sistema climático. Para organizar los modelos, de los más adecuados a los menos adecuados, aunque sepamos que son falsos, deben cumplir al menos dos condiciones:

- i) Que haya un isomorfismo entre la situación física y el modelo (Van Fraassen, 1980)
- ii) Que hay una transformación matemática aceptable de la ecuación del modelo de comparación. (Pincock, 2007)

Lo que se sostiene es que mientras más cerca esté la ecuación del modelo de comparación, entonces más representativo será y, por lo tanto, mejor. Pero no hay manera de distinguir qué idealización matemática representa mejor su sistema objetivo.

Para enfrentarnos al problema anterior Bueno y Colyvan (2011) proponen que el papel principal de las matemáticas en las ciencias naturales es inferencial. Para ello se integran características del sistema objetivo en una estructura matemática, y de la estructura matemática podemos extraer conclusiones acerca del sistema objetivo¹⁴. Pero dado que las conclusiones que podemos extraer de los modelos climáticos son parciales, no precisas, lo que estos autores podrían afirmar es que las representaciones son parciales.

Ahora es cuestión de saber si las representaciones parciales juegan un papel explicativo. Si tenemos una representación parcial (Pincock 2012, Bueno y Colyvan 2011), entonces puede arrojar luz sobre algunos aspectos de su sistema que tiene por objetivo. Eso es muy similar a la propuesta de Parker (2009), aunque aquí no es muy claro qué elementos del modelo están dando la representaciones parciales. Se podría afirmar que el objetivo de las representaciones parciales es que pueden ser eliminadas de tal modo que permita un completo isomorfismo entre el modelo y el sistema objetivo. Aunque este último paso no es completamente respaldado por Pincock, Bueno y Colyvan (Batterman, 2008), pero sería una forma de defender las representaciones parciales y su rol en la representación matemática de un sistema físico.

¹⁴ En realidad el proceso es más elaborado, pero con la finalidad de hacerlo más breve, lo presentamos así.

Hasta aquí lo que se ha dicho es lo siguiente: los modelos climáticos no capturan con precisión su sistema objetivo. Si tenemos una representación completa, entonces el representante captura con precisión lo representado. Dado que esto último no es el caso en los modelos climáticos, entonces no tenemos una representación completa. Si no hay representación completa, entonces puede ser una representación parcial. Pero la duda es ¿Cuál es el papel explicativo que juega una representación parcial? Mejorar el modelo con la finalidad de obtener una representación exacta. Pero tendríamos un método para mejorar los modelos, pero no nos diría nada sobre su sistema objetivo y mucho menos arroja luz sobre el carácter epistemológico de los modelos climáticos.

Hay que añadir que aún no queda muy claro cuándo tenemos una representación completa. En aspectos relevantes, una representación isomórfica en cierto sentido es completa, porque es la representación exacta de algo; por otro lado una representación sería completa si es más precisa predictivamente (Sober, 1999). Por supuesto, puede confundirse la representación verdadera con la que es más precisa predictivamente, ¿entonces estamos buscando representaciones isomórficas o las mejores? La primera nos compromete con el realismo y la segunda con el instrumentalismo.

Lo anterior no es trivial, porque Pincock sostiene que debe haber una relación isomórfica entre el sistema físico y el modelo que está en juego. Y además que estamos frente a una transformación matemática aceptable si es consistente con los términos científicos y es exacta (Pincock, 2007).

Si una representación es isomórfica, entonces es la más exacta predictivamente. Pero en general sólo estamos en posición de saber cuándo un modelo es más exacto predictivamente, lo que no nos diría nada acerca de su relación isomórfica, de hecho el modelo podría seguir siendo parcial o falso. Lo que se traduce en que las ecuaciones matemáticas no tendrían un papel representacional isomórfico y no estaríamos en posición de saber cómo de hecho es el sistema climático, lo que pretende el IPCC.

¿Entonces cómo ayudan las matemáticas para tener una representación exacta del sistema, si sólo estamos en posición de saber si tal o cual modelo es mejor que otro? ¿Qué nos está diciendo exactamente el modelo del sistema climático? Son algunas de las preguntas que aún quedan en el aire y deben ser respondidas.

3.4.- Bayesiana

Una de las razones por la que modelamos el sistema climático tiene que ver con nuestros intereses sociales: tener predicciones sobre el futuro climático. Como ya lo hemos mencionado, la modelación climática tiene que asumir que hay incertidumbre (Otto, 2012; Hargreaves & Annan 2014) Podría ser estructural: nuestros mejores métodos están sesgados y no permiten realizar proyecciones confiables o el sistema climático es ontológicamente estocástico o no lineal, también puede ser ambos. Cualquiera que sea la respuesta, es un hecho que nos enfrentamos a incertidumbre, así que no podemos tener proyecciones climáticas certeras; pero quizá sí podríamos asignar probabilidades de ocurrencia a escenarios climáticos (Otto, 2012).

Ha habido algunos desarrollos probabilísticos en modelos climáticos, Rougier (2007), Knutti, et. al.(2010), Giorgi & Mearns (2002, 2003), Tebaldi et al. (2004, 2005), Greene et al. (2006), Furrer et al. (2007b), Tebaldi & Knutti (2007), Smith et al. (2009), Tebaldi & Sanso (2009). Los resultados de los modelos, si se presta a tratamiento probabilístico, se está más interesado en afirmar que el correcto tratamiento de la probabilidad de los modelos climáticos es subjetiva. En otras palabras: la probabilidad es una medición de grados de creencia, subjetiva; no es una propiedad del mundo, probabilidad objetiva y tampoco es una propiedad de un experimento.

Hay situaciones en las que la probabilidad juega un papel importante y este tiene que ver con la corrección de modelos. Por ejemplo, los proyectos de intercomparación de modelos como

lo es el *Couple Model Intercomparison Project (CMIP)* es uno de los principales proyectos de los que se vale el IPCC para garantizar la confiabilidad de los modelos y las proyecciones que estos hacen. La afirmación de estos proyectos es que los modelos, considerados independientes, son menos ciertos que si son comparados con otros modelos.

Esta es la forma en la que una propuesta bayesiana interpreta los resultados de los modelos climáticos, presentados en la Figura 2. La gráfica (a) nos muestra la *función de densidad de probabilidad (PDF, por sus siglas en inglés)* para el cambio de temperatura global anual, del periodo que va del año 2080-99, relativo al periodo de 1980-99, usando métodos bayesianos (Furrer et al. 2007). Esta densidad describe una probabilidad relativa de una variable que tomará cierto valor. El argumento es el siguiente: cada modelo se aproxima al mundo real con algún margen de error aleatorio; luego, si cada modelo tiene cierto error aleatorio y con ellos medimos cierta cantidad climática, entonces múltiples mediciones mejorarán la adecuación de la medición promedio. Lo que se nos está diciendo es que mientras más modelos usemos, menor será la incertidumbre respecto a una variable climática.

Como podemos observar en (a) la densidad para cuatro modelos es mayor que para veintiún modelos. La idea es que si agregamos más modelos, la densidad se estrecha y el valor relativo, en este caso de la temperatura, que tomará la variable también lo hará. Dicho en otras palabras: la incertidumbre del valor que tomará la temperatura en un determinado momento se reduce.

Es importante remarcar lo siguiente: cuando hacemos esta clase de ensambles usando la probabilidad ¿Reducimos la incertidumbre de los modelos o la incertidumbre del sistema modelado? (Otto, 2012) Algunas autoras como Tebaldi nos dicen que al usar un marco bayesiano:

“(estiman) las distribuciones posteriores de las señales del cambio climático en términos de tendencias o diferencias entre períodos actuales o futuros y caracterizamos

completamente la naturaleza incierta de un conjunto de otros parámetros, términos de correlación y precisiones de modelo específicas”¹⁵ (2009:1)

En otras palabras, un marco bayesiano contribuye a la reducción de incertidumbre del sistema climático y de los modelos. Otros autores como Hashmi, et al. (2013) creen que las estrategias probabilísticas permite la cuantificación de incertidumbre en las proyecciones, entre otras cosas. Hasta aquí podemos identificar al menos dos problemas que deben hacer frente las posturas bayesianas:

- 1.- ¿Cómo se cuantifica la incertidumbre o cómo reducimos las incertidumbre?
- 2.- ¿Los modelos bayesianos representan el sistema climático? ¿En qué sentido?

Estas cuestiones están interrelacionadas, así que las abordaremos conjuntamente; pero las iremos presentando de forma separada, aunque señalaremos cuando estemos vinculando una o más preguntas.

Cuestión 1

Por un lado, cuando decimos que tenemos un método para cuantificar la incertidumbre queremos decir que hay un conjunto de reglas que nos permite asignar un número de probabilidad a la ocurrencia dada de un evento incierto; pero si abundamos más, podemos preguntar ¿Qué es la incertidumbre? No se sabe con precisión, es un problema filosófico que aún está en discusión (Frigg, R., Thomson, E., & Werndl, C. , 2015). No obstante, si queremos avanzar la idea de que la probabilidad reduce la incertidumbre de un evento, entonces debemos saber qué es incertidumbre, para poder reducirla a probabilidad.

¹⁵ “Posterior distributions of the climate change signals in terms of trends or differences between future and current periods, and we fully characterize the uncertain nature of a suite of other parameters, like biases, correlation terms and model-specific precisions”

Hay algunos autores como Biddle & Wingsberg (2010) y Chatfield (2006) que caracterizan distintos tipos de incertidumbre: *estructural*, en la que ésta es una propiedad de nuestros sistemas de medición; *parametral*: los parámetros no se ajustan o no representan con suficiente exactitud su sistema objetivo; *de datos*: no tenemos todos los datos disponibles para asignar con precisión un valor dado o incluso *incertidumbre definicional* (Mari and Giordani 2013): en el que depende de qué entendemos por incertidumbre.

Contar con una idea sobre la incertidumbre nos puede proporcionar las herramientas para distinguirla de otros conceptos similares como: ambigüedad, imprecisión, intratabilidad, indeterminación y riesgo (Smith y Stern, 2011; Spiegelhalter y Riesch, 2011; Wilby y Dessai, 2010; Petersen, 2012; Lahsen, 2005; Sturgeon , 2008). Regresemos a la Figura 2. ¿Qué definición de incertidumbre tienen en mente los modeladores? Si es incertidumbre estructural, entonces buscan reducir la incertidumbre de los modelos climáticos: mejorarlos para que no tengan errores. Aunque no parece que los modeladores tengan eso en mente cuando presentan resultados como en la Figura 2.

Tal vez sea reducir la incertidumbre de estados futuros, dada una variable climática (en este caso el calor oceánico); pero una vez más, ¿qué clase de incertidumbre? Sostengo que el tipo de incertidumbre que quieren reducir son las posibilidades de un estado de una variable climática en un tiempo futuro dado. Lo que los resultados, entonces, quieren hacer es reducir la cantidad de posibilidades físicas que pueden ocurrir. ¿Pero es suficiente con ofrecer un análisis bayesiano? Sostengo que no es suficiente: si lo que queremos hacer con un análisis probabilístico es dar cuenta de una modalidad física (los estados posibles de un sistema físico no lineal), entonces necesitamos una interpretación modal de la probabilidad (Rolleri, 2002).

Sostengo que la interpretación de la probabilidad como modalidad nos permite entender lo que los resultados de los modelos nos dicen y es lo que presentaré en el siguiente capítulo. Las posibilidades físicas son accesibles a través de un marco probabilístico modal y ese es el tipo de incertidumbre al que se enfrentan los modeladores, al menos en este aspecto.

No debemos olvidar algo muy importante: hay distintas interpretaciones de la probabilidad (Hájek, 20102). Sería interesante ver con detalle lo que cada una podría aportar, pues si los modelos climáticos son probabilísticos, entonces ¿qué tipo de probabilidad está en juego? No sería lo mismo proponer una interpretación frecuentista, lógica, propensista o modal y mucho menos el tipo de relación que tienen con el mundo: subjetiva, experimental u objetiva. Pero sería demasiado abundar en cada una de las interpretaciones, así que por cuestiones prácticas sólo adoptamos la propuesta modal de Roller (2002) y otros (Bigelow *et al.*, 1993; Mellor 2000, Eagle 2011, Schaffer 2007). Pero antes de terminar, veamos otro problema: la relación de la probabilidad con el mundo.

Cuestión 2.

Si la probabilidad es la asignación de un número a la ocurrencia dada de un evento, ¿entonces eso quiere decir que tenemos matemáticas representando el sistema climático? Si la respuesta es afirmativa, entonces se enfrenta exactamente al mismo problema que al que se enfrenta la visión conservadora, de lo cual ya hablamos anteriormente. Pero consideremos el siguiente ejemplo: “¿Cuál es la probabilidad de que una duplicación del CO₂ atmosférico de niveles pre industriales aumentará la temperatura media global al menos 2 °C?”¹⁶ (Rougier, 2007). Según Rougier, esta pregunta es genuina porque cualquier tomador de decisiones podría hacerla a un científico climático. Y distingue al menos dos aspectos en ella:

- a) Puede preguntar por la probabilidad de que un suceso dado ocurra, o
- b) Preguntar por el comportamiento del clima.

Mientras en (a) se cuestiona por algún número de probabilidad dado y el método para obtener ese número, (b) pregunta sobre la relación entre ese número probabilístico y el sistema climático. Ahora, asumamos que nos dicen que la probabilidad es del 50%, de que el CO₂ atmosférico

¹⁶ What is the probability that a doubling of atmospheric CO₂ from pre-industrial levels will raise the global mean temperature by at least 2 °C?

aumentará la temperatura media global en 2 C° . En ese caso, el aspecto (a) está cubierto por el número de probabilidad y el método que nos ofrece. De hecho, nos podrían dar los métodos a partir del cual tenemos los resultados. Consideremos la siguiente gráfica:

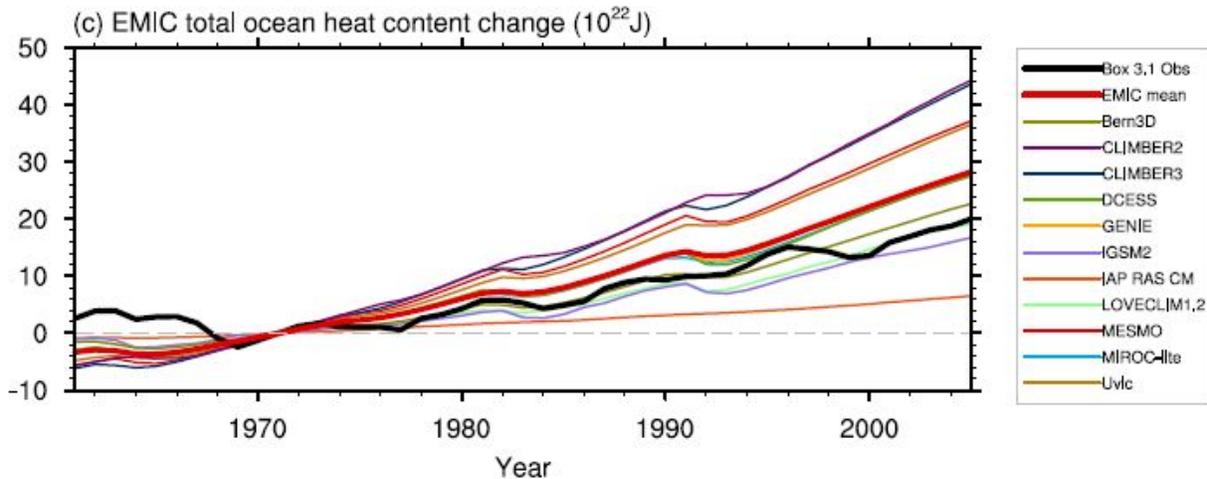


Figura. 3 (IPCC, 2013: 782)

La gráfica anterior presenta series de tiempo de anomalías de contenido de calor oceánico global simuladas y observadas, en el que hay distintas proyecciones de *Earth System Models of Intermediate Complexity* (EMICs) Y distintas entidades desarrollan EMICs, como el *Danish Center for Earth System Science* (DCESS) o el MIT (IGSM2). Cada una tiene métodos para realizar sus proyecciones y nos pueden describir tales métodos, así como la forma en que obtenemos el número. Así que podemos afirmar que (a) puede ser respondida satisfactoriamente.

Ahora bien, la respuesta a la pregunta del tomador de decisiones podría ser que la probabilidad de que un suceso dado ocurra es del 50%. ¿Pero eso qué nos quiere decir? Podríamos repetir lo mismo: que la ocurrencia de un evento tiene un 50% de probabilidad; pero eso es una petición de principio. Si decimos que la probabilidad de que un suceso ocurra es que hay una probabilidad, sea alta o baja, de que algo ocurrirá, entonces pedimos la cuestión.

Si queremos saber qué nos dice esa probabilidad, pero no queremos apelar a la probabilidad para responder, entonces eso nos puede llevar a dos problemas, a saber:

- i)Cuál es la interpretación de la probabilidad que está en juego.
- ii) Cómo se relaciona la probabilidad con su sistema objetivo.

Como podemos ver (ii) es sólo una reiteración de (b); pero lo que no era obvio es que estuviera conectado con la interpretación de probabilidad y con (a). Y, como mencionamos con anterioridad, que la cuestión (2) está relacionada con la cuestión (1). Veamos con claridad las conexiones y los problemas implicados.

Tenemos métodos probabilísticos en la modelación climática, pero muchos de ellos están interesados en aumentar la probabilidad de las hipótesis dada la evidencia. Por ejemplo, Fitelson (2001) nos ofrece un método para obtener un grado de confirmación como el siguiente:

$$(R) \quad c(H,E | K) \begin{cases} >0 & \text{if } \Pr(H | E\&K) > \Pr(H | K), \\ <0 & \text{if } \Pr(H | E\&K) < \Pr(H | K), \\ =0 & \text{if } \Pr(H | E\&K) = \Pr(H | K) \end{cases}$$

Donde H es una hipótesis, E es la evidencia, K es el conocimiento previo y c es el grado de confirmación, dado un método de medición adecuado. ¿Cómo se instancia en la metodología climática? H es un escenario futuro de emisiones, K es todo nuestro conocimiento del clima (datos paleoclimáticos, principios físicos, por ejemplo), E la evidencia disponible y c la obtenemos a través de múltiples estimados del futuro climático: corridas de modelos, como en la figura 2 (Abramowitz & Bishop, 2015). Dicho esto, si $C(H/E\&K)>0$, entonces la evidencia confirma la hipótesis.

Según lo anterior, tenemos un método para saber cuándo algo es evidencia a favor de otra cosa. ¿Pero qué tan confiable es el método? Como ya hemos visto, los modelos comparten al menos ciertos aspectos: datos, parámetros o conocimiento general a partir del cual son construidos. Podrían estar sesgados de modo que los resultados también lo estén; pero vamos a

conceder que no lo están y que cada modelo y corrida de modelo es totalmente independiente y si es así y además confirman una hipótesis, entonces la confirmación es genuina.

Pero, ¿qué pasa cuando tenemos un resultado? Imaginemos que tenemos evidencia a favor y el grado de confirmación C es igual al 50% de la ocurrencia de un evento. Ya sabríamos que se confirma una hipótesis, ¿pero qué nos dice de la ocurrencia de un escenario futuro? Aún nada. Todavía necesitamos la interpretación de la probabilidad, que tendría que entenderse como un ‘análisis de los conceptos de probabilidad’ (Hájek, 2012). Que nos permita vincular el número probabilístico con el mundo. Aquí ya está mencionado (i) y (ii): necesitamos una interpretación de probabilidad (i), para saber cómo se relaciona con el mundo (ii). Pues aunque tengamos los métodos (cuestión 1), falta saber qué nos dice el número que obtenemos de ese método.

Saber que la evidencia disponible E aumenta la probabilidad de la ocurrencia de un escenario futuro H , no nos dice nada acerca de qué quiere decir que aumente la probabilidad de que un escenario ocurra. Un tomador de decisiones podría preguntar ¿Qué quiere decir que la probabilidad de que una duplicación del CO_2 atmosférico de niveles pre industriales aumentará la temperatura media global al menos 2 C° es del 50%? Por un lado podríamos decir que: la evidencia nos dice que esa es la probabilidad, o que los modelos están de acuerdo en que eso ocurrirá con ese grado de probabilidad, o que es muy probable que ocurra. Eso ya sin entrar en cuestiones relacionadas a ¿Cuántos modelos o corridas de modelos son suficientes para decir que el resultado es confiable? ¿Cómo sabemos que los datos no están sesgados? Etc.

Nosotros creemos que esta es la forma adecuada para hacer frente a lo que nos dicen los resultados de los modelos climáticos; pero aún falta por clarificar la relación entre el número probabilístico y el mundo, pero no podríamos abordar un tema con gran tradición filosófica: la relación entre las matemáticas y el mundo. Es un tema que hemos estado dejando de lado, pero el cual es la piedra angular sobre la que trabajan todas estas propuestas. Hasta que no quede bien clarificada esa relación, los modelos climáticos sean probabilísticos y matemáticos, necesitarán de esa clarificación.

5.- Posibilidad física

Creemos (Rolleri, 2002; Katzav, 2014; Bressan, 1980) que el uso de nociones modales (como el de mundos posibles) nos permite dar una comprensión más profunda de las fundaciones de las ciencias naturales. En este caso particular, creemos que el uso de la terminología de posibilidades para entender lo que nos dicen los resultados de los modelos climáticos es una herramienta útil, sobre todo para la toma de decisiones basadas en incertidumbre.

Ahora, lo que aquí defendemos es que los resultados de los modelos climáticos nos dan conocimiento de posibilidades físicas. Para sostener lo anterior, tenemos que clarificar lo siguiente:

- i) ¿Qué entendemos por posibilidad física?
- ii) ¿Qué ventajas adquirimos al adoptar esta propuesta?

Para lograr mi objetivo, lo primero que haré será presentar un marco interpretativo de las posibilidades físicas, ofreciendo razones a favor. Como sabemos, las interpretaciones de las posibilidades es un área basta, así que adoptaremos una propuesta que se adecúe mejor a mis propósitos. Una vez hecho esto, enfrentaré la pregunta de ¿Qué ventajas tiene la propuesta posibilista frente a las otras? Y sostendremos que i) Captura **situaciones relevantes** de las otras propuestas, ii) evita ciertos problemas que tienen las otras propuestas y iii) su implementación tiene implicaciones políticas.

Si logro responder esos dos planteamientos, entonces ofrezco una interpretación novedosa de lo que nos dicen los resultados de los modelos climáticos. Y no sólo eso, sino que dispondremos de buenas razones para confiar en los resultados de los modelos para tomar decisiones.

Posibilidades físicas

En **principio** podemos identificar al menos dos nociones de posibilidades físicas (Bressan, 1980):

- a) Límite de ciertas posibilidades para afirmaciones físicas
- b) Compatibilidad con las leyes físicas en un sentido apropiado.

La definición (a) es circular: queremos saber qué es una posibilidad física, pero lo definimos como un límite de posibilidades de afirmaciones físicas; es decir: definimos posibilidad física como algo que es posible físicamente. La definición que se adopta es (b), que alguna afirmación sobre un fenómeno físico no contradiga las leyes de nuestras mejores teorías científicas. Lo que es un buen inicio; pero no es suficiente. De modo que queremos echar mano de una definición más precisa como la que nos ofrece Rolleri (2002).

Antes de dar la definición de Rolleri (2002), lo que él propone es que debemos partir de una ‘ontología’ adecuada. ¿Qué queremos decir con eso? Que aquello a lo que le queremos atribuir sea susceptible de un análisis de posibilidad y no arroje resultados triviales. Por definición negativa no aplica a situaciones deterministas; por ejemplo donde sólo hay dos posibilidades: que ocurra el evento esperado o que no ocurra.

Un análisis posibilista se le puede realizar a aquellas cosas en las que no hay un único resultado. Ian Hacking (1965), por ejemplo, propone que puede ser aplicado a un *dispositivo azaroso*, como aparatos (simulaciones dinámicas) o parcelas del mundo, a las que se les puede realizar varios ensayos y en el que cada uno arroja diferentes resultados. Luego, tenemos que las simulaciones de los modelos climáticos arrojan distintos resultados en cada corrida. Luego se da el caso de que nuestras proyecciones climáticas son un dispositivo azaroso. Si eso es verdad, entonces el análisis de posibilidades físicas para los modelos climáticos es ontológicamente adecuado.

Si el que un dispositivo sea azaroso depende del marco teórico desde el que se trabaja, entonces algo es azaroso desde un marco T, por lo que los resultados que puede adoptar un evento deben ser descritos por T. Así que la primera condición de nuestra definición es que:

i) Los valores de los estados iniciales deben poder ser *descritos* por el marco T. En este sentido, los modelos deben ser capaces de describir estados iniciales apelando a sus principios teóricos bien fundamentados o a sus asunciones, o al menos ser consistentes con sus principios teóricos; pero debemos añadir que

ii) los estados finales de un sistema, después de su evolución, deben ser *prescritos* por T.

Así que algo es *un suceso físicamente posible* si su estado inicial y su evolución puede ser descrito por T. La condición (i) excluye posibilidades que estén fuera del espacio de posibilidades. Si una posibilidad no es consistente con todos los parámetros de T, entonces no es una posibilidad seria o que debamos tener en cuenta. No estamos restringiendo que los parámetros o leyes de T deben ser conocidos, pueden ser suposiciones, o que verdaderas, pueden ser falsas; pero sí es requisito que los resultados de los modelos sean consistentes con sus asunciones. La condición (ii) sólo exige que, con todos los elementos de T, podamos mostrar inferencias que nos señale cómo llegamos a una posibilidad física. Si hay saltos inferenciales, de cualquier tipo, entonces f^t , no es describable por T.

De lo anterior tenemos que las posibilidades físicas dependen de un marco T, en este caso de un modelo M y además M debe prescribir la evolución de su sistema y describir su estado inicial. Si lo hace, entonces tenemos descripciones posibles del sistema físico.

La propuesta posibilista interpretaría los resultados de la figura 2 de la siguiente manera. Primero tenemos que los resultados de los modelos climáticos dependen de M. En este caso los resultados en verde pertenecen a los cuatro modelos usados en ella, así como las proyecciones en azul y en anaranjado son proyecciones de otros. Segundo, cada conjunto de modelos, o modelo,

describe la evolución del cambio de la temperatura para el año 2080-99, tomando como el estado inicial la cantidad de gases liberados para la década de 1980-99 y posteriormente describe su evolución. En ese caso tendría que haber un conjunto de operaciones no lineales para establecerlo. Por mor del argumento, asumimos que ese es el caso.

Por último, los resultados oscilan entre los 2°C y 3.5°C. Lo que quiere decir es que: existe al menos un mundo físicamente posible en el que podemos estar y es el de 2°C y otro mundo posible en el que podemos estar que es el de 3.5°C. Como aquí opto por una descripción probabilista de las posibilidades¹⁷, entonces es útil señalar que los mundos físicamente posibles más cercanos son los descritos por los modelos de la línea roja.

Podría ocurrir que otro mundo posible se actualice y que tal vez no esté dentro de lo descrito por los modelos de las proyecciones en rojo; pero ese no es un problema. Sólo estamos comprometidos a decir que es el mundo físicamente posible más cercano, pero no el único accesible desde nuestro mundo actual. Podría darse un mundo que esté descrito por las proyecciones de la línea azul o verde.

¿Pero cuál es la ontología de las situaciones físicamente posibles? Es decir, ¿a qué refieren, si es que refieren, las situaciones físicamente posibles? La pregunta es relevante, porque si tenemos que hacer frente al desafío de la referencia, como gran parte de las propuestas anteriores, debemos tener una respuesta. Si lo hacemos, entonces será una ventaja que tiene interpretación de los modelos climáticos frente a otras interpretaciones.

Ni Rolleri, Katzav o Betz hacen frente al problema ontológico y quizá no lo ven como una dificultad, porque no consideran relevante la relación entre modelos y su sistema objetivo; aún más cuando es en términos de mundos posibles. En principio ellos definen lo que es una situación físicamente posible; pero no así su estatus ontológico y su relación con el mundo. Para abordar el problema voy a afirmar que las posibilidades físicas son mundos físicamente posibles

¹⁷ Más adelante hablo de ello, pero para brevedad, lo presento de una vez aquí.

ontológicamente abstractos (Menzel, 2017). Así que un modelo T arroja $R^1 \dots R^n$ resultados de mundos físicamente posibles abstractos $W^1 \dots W^n$; y asumo que si p es físicamente posible abstracto, entonces p es verdad en W en un tiempo t . Aunque a mi me interesa saber qué mundos posibles son los más cercanos al nuestro, porque de ello depende las decisiones que queramos adoptar.

Lo que quiero decir con mundos físicamente posibles abstractos es un estado de cosas de cómo el mundo *podría* ser. Eso se logra ampliando o agregando detalles a algún estado del mundo (Menzel, 2017). El *estado de cosas* es una categoría ontológicamente primitiva para los abstraccionistas y no está definida en términos de mundos posibles; pero de ellas podemos decir que son actuales o que no lo son. Y no debe confundirse actual con *existe* y lo no actual con *no existe*. El que algo no sea actual no implica que no puede existir.

Nuestro mundo difiere de otros mundos porque es actual y la *actualidad* es una propiedad que distingue al estado de cosas que se ha dado de las que no; pero para los abstraccionistas esta es tal que si para cualquier cosa que puede existir, entonces existe en el mundo actual. Eso no quiere decir que las cosas no pudieron suceder de otro modo a como de hecho sucedieron, por ejemplo, que el premio Nobel de la paz no se le hubiera dado al IPCC y a Al Gore, aunque se les haya otorgado.

Así resumo mi postura: una *posibilidad física* es el resultado de un marco M que cumple con la condición (i) de describir un estado físico de un sistema y (ii) prescribir la evolución del mismo, que describe o refiere un mundo posible abstracto. Donde el estado posible abstracto es no actual; pero que puede existir.

Filósofos de la ciencia como Betz (2015) plantea serias dudas sobre la propuesta posibilista y aunque ofrece un tratamiento, distinto al mío, son dudas que debemos abordar aquí, porque son dificultades serias a mi propuesta. Según este autor, un problema relevante es:

- a) Si los modelos climáticos implican parámetros falsos, entonces no tenemos criterio para distinguir entre situaciones físicamente serias de las no serias. Será lo que llamaremos el *problema de la demarcación*.

El problema está filosóficamente motivado, porque si los parámetros y los inputs de nuestros modelos climáticos pueden ser falsos (Stainforth et. al. 2007), entonces pueden dar situaciones físicamente posibles falsas (Flato et. al. 2013). Si ese es el caso, no hay modo de distinguir situaciones posibles ciertas de las falsas. Betz ofrece un criterio de demarcación:

“Posibilidad seria: Una proposición P es seriamente posible si y sólo si es consistente con el cuerpo entero de conocimiento previo K¹⁸” (Betz, 2015: 195)

En principio una *posibilidad seria o un mundo creíble perfecto* es un buen criterio de demarcación: sólo tomaremos en cuenta posibilidades que no contradigan lo que ya sabemos. Pero los modelos a veces arrojan resultados inconsistentes con nuestro cuerpo entero de conocimiento (Hargreaves & Annan, 2014). Así que el autor opta por proponer lo que él llama: *mundo creíble imperfecto*.

El mundo creíble imperfecto comparte todo con el mundo creíble perfecto, excepto en que acepta suposiciones falsas y no es isomórfico con su sistema objetivo: “C implica idealizaciones y asunciones contra fácticas, es decir, C es -estrictamente hablando- inconsistente con lo que conocemos”¹⁹ (Betz, 2015: 198) . Vamos a asumir que los modelos capturan mundos creíbles imperfectos. Pero no sabemos cómo elegir entre mundos creíbles imperfectos. Esto no lo deja muy claro el autor. Aún más, Betz no cree que los modelos nos den pronósticos probabilísticos (Betz, 2015: 210).

¹⁸ **Serious possibility:** A statement P is seriously possible if and only if P is consistent with the entire body of background knowledge K.

¹⁹ C involves idealisations and contrary-to-fact assumptions , i.e., C is—strictly speaking—inconsistent with what we know

Argumento que los modelos sí pueden dar resultados probabilísticos y aún más, que la probabilidad puede establecer grados de cercanía de mundos físicamente posibles. Al igual que Rolleri (2002), Bigelow, *et al* (1993) Mellor (2000) e Eagle (2011), comparto la idea de que la probabilidad es posibilidad graduada, en este caso el de la posibilidad física y ya hemos dicho qué entendemos por posibilidad física. En lo que ahora estoy interesado es cómo elegir una posibilidad física, respecto a otra. Y argumento que si las posibilidades físicas son relativas a un marco M, como podría ser un marco probabilista²⁰, entonces disponemos de herramientas para valorar situaciones físicamente posibles y tomar decisiones respecto a esos resultados, dado que estamos en el marco del IPCC.

Dicho lo anterior, enunciados con la forma de ‘la probabilidad de un suceso *P*’ podemos entenderlo como ‘el grado de posibilidad de un suceso es *P*’. Por ejemplo: ‘el grado de probabilidad de la extinción de especies, en una parcela de la Tierra, es del 15-37%’ (Thomas, et. al. 2004), lo podemos entender como ‘el grado de posibilidad de que el suceso de extinción de especies, en una parcela de la Tierra, es del 15-37%’. Si eso es el caso, entonces tenemos grados de posibilidades. ¿Qué significa eso? Que hay situaciones físicamente posibles más cercanas a nuestro mundo actual.

Ahora lo importante es ¿Cómo interpretamos la probabilidad en un marco posibilista? Primero no debemos perder el objetivo de vista: estamos usando un marco de interpretación M, en este caso el probabilístico, para obtener resultados de mundos físicamente posibles abstractos. Si tenemos éxito, entonces hay al menos una forma de graduar la posibilidad física. Si ese es el caso, entonces disponemos de una herramienta que nos permite establecer la relación de mundos físicamente posibles cercanos.

Lo primero que necesitamos es una interpretación de la posibilidad en términos probabilísticos, para ello vamos a hacer uso del *basic chance principle* en la formulación de Bigelow *et al.* (1993):

²⁰ Podría ser cualquier otro marco de interpretación; pero la ventaja de la probabilidad es que puede cuantificar y, de ese modo, establecer una relación de orden entre mundos físicamente posibles.

“Asumamos que $x > 0$ y que $Ch_{tw}(A) = x$. Entonces A es verdadera en al menos uno de aquellos mundos w' en el que w coincide a un tiempo t para el cual $Ch_t(A)=x$ ”²¹
(Bigelow *et al.* 1993: 459)

En otras palabras: si la probabilidad de a es distinta de 0, entonces hay un mundo físicamente posible w^1 , en un tiempo dado t , en el que a es el caso, y el cual comparte una relación probabilística con w ²².

Un ejemplo: en el cuarto reporte de evaluación de IPCC (Solomon *et al.* 2007) se nos dice que la probabilidad de la sensibilidad climática, la respuesta de la temperatura con forzantes radiativos, de que ronde los $2-4.5^\circ\text{C} > \% 66$ y que ronde los $1.5^\circ\text{C} < \%10$. Y con todo lo que hemos dicho, podemos sacar las siguientes conclusiones: que hay por lo menos dos mundos físicamente posibles abstractos en los que podemos estar, un mundo en el que la sensibilidad climática ronde los $2-4.5^\circ\text{C}$ y otro donde ronde los 1.5°C . Los resultados son producto de modelos que describen situaciones iniciales y prescriben su evolución. Y no importa si las asunciones que hacen son falsas o subjetivas, como lo señala Anna & Hargreaves (2011).

Si el modelo cumple con las condiciones que establecimos, entonces el que tenga asunciones falsas, ideales, imprecisas o falten datos es irrelevante. Volviendo al ejemplo anterior, si sabemos que hay un mundo físicamente posible con la probabilidad de ocurrencia del $\%66$ y otro del $\%10$, entonces el mundo más cercano es el de $\%66$. No estoy diciendo que debemos escoger el mundo físicamente posible más cercano, eso es una cuestión normativa; pero sí es una herramienta para decidir una cuestión normativa.

Si nosotros queremos estar en un mundo físicamente posible, con la sensibilidad climática que ronde menos de los 1.5°C , entonces nuestros modelos tendrían que ser

²¹ Suppose $x > 0$ and $Ch_{tw}(A) = x$. Then A is true in at least one of those worlds w' that matches w up to time t and for which $Ch_t(A)=x$

²² Yo no sostengo que si la probabilidad = 0 entonces algo es imposible y que la probabilidad = 1 implica que algo es necesario. Autores como Mellor (2010) sí.

parametrizados de tal forma que arroje situaciones posibles que nos acerquen más, dado nuestro actual estado de cosas, al mundo posible físico que deseamos y a partir de allí tomar sus respectivas decisiones; es decir: tomar decisiones a partir de las asunciones de los modelos que nos llevar al mundo físico posible deseado. Aunque algo parece ser el caso: el AEC nos acerca más a un mundo posible en el que la sensibilidad climática ronda los 2-4° C.

Como podemos ver, los resultados de los modelos climáticos en términos de posibilidades y probabilidades puede ser una buena herramienta para la toma de decisiones, sobre todo porque podemos establecer una relación de orden entre distintos mundos posibles. En ese sentido, la probabilidad no está jugando un papel verificacional, sino de grados de posibilidad. Así que ahora es el que momento abordar la segunda cuestión (b) dicha con anterioridad.

¿Qué ventajas tiene esta interpretación de los resultados de los modelos, en el marco del IPCC, respecto a las otras?

1.- Carácter no representacional: si los modelos no son representaciones de nuestro sistema actual climático, entonces no tienen el problema de cómo se relaciona lo representado y lo que representa. Estamos de acuerdo que los modelos sólo describen situaciones físicamente posibles, aunque puedan ser imperfectas (Betz, 2015); pero no representan, en sentido estricto, los mundos físicamente posibles. Por supuesto, tenemos en cuenta que el problema de la representación científica no puede ser limitada a *un* problema, sino a un conjunto de planteamientos (Frigg, 2016).

En el problema 2, del capítulo 3.3, de esta tesis, dijimos que hay representaciones realistas; pero no todas tienen que ser así. Eso abre el camino para las representaciones no realistas, como lo que propone Thomson-Jones (2010): una descripción implica una representación, similares a las ficciones literarias. Ahora, si es así, entonces tendríamos el ¿Qué tipo de objetos describen? La respuesta es que representan mundos físicos no actuales, similares

a las ficciones literarias, pero las posibilidades físicas son más restrictivas, de modo que no parece que podamos extraer posibilidades físicas como las descritas en *El señor de los anillos*, pero sí como las de *Guerra y Paz*. No obstante hay autores como Levy (2012) y Toon (2012) que creen que los modelos dan descripciones imaginarias de las cosas reales.

La razón por la que no adoptamos la propuesta de Levy, Toon y Thomson-Jones es que no discrimina posibilidades físicas de otras, como posibilidades metafísicas (Chalmers, 2002); por ejemplo: naves viajando más rápido que la velocidad de la luz es metafísicamente posible, pero no físicamente posible. Si los modelos representan mundos físicos posibles, entonces no hay problema, porque no se enfrentan a si su referente existe o no. Recordemos que no es lo mismo actual a existe y no actual a no existe. Un modelo podría no ser actual y existir. Así podríamos evitar el problema de la representación.

2.- La relación de las matemáticas: este era un planteamiento particular sobre cómo se relacionan las matemáticas con el mundo. Aquí las matemáticas funcionan como graduación de cercanía de mundos posibles y como descripción de estos. Una vez más, si una descripción matemática implica una representación, no es problema. Sería un problema si cada representación fuera un mundo concreto, como sí lo cree Lewis (1986). Por ejemplo, Lewis afirma que nada de lo que ocurra en un mundo tiene alguna implicación causal en otro; pero si es así, ¿entonces cómo podemos aconsejar tomar ciertas acciones en nuestro mundo actual para llegar a otro mundo posible deseado? No nos sería de mucha ayuda, pues lo que hagamos en nuestro mundo no tendrá implicaciones en otro mundo posible a donde queramos llegar.

3.- Asunciones falsas: es un problema trabajar con asunciones falsas, si lo que se desea es una representación isomórfica, sobre todo porque no hay referentes (o no se sabe si los hay) en nuestro sistema actual de nuestros parámetros falsos. Una dificultad para los análisis robustos o incluso para la interpretación probabilista como verificación; pero no para este análisis. En la interpretación posibilista lo importante es la coherencia y no necesariamente la verdad. Podemos

tener coherencia, sin preocuparnos por la verdad. En ese sentido lo que decimos es: podemos extraer situaciones físicamente posibles sin que ello implique que son verdaderas, en el sentido de que tengan referente en la realidad.

4.- La verificación de los modelos: esta propuesta no se enfrenta al problema de la verificación. En general la motivación de la verificación es que si se comprueba algo del modelo o el modelo dice algo respecto a otra cosa, y está validado, entonces se comprueba algo del mundo. Dicho en otras palabras: lo que se comprueba del modelo se comprueba en su sistema objetivo. Lo más cercano a la verificación en esta propuesta es si un modelo describe una situación posible y luego el estado de cosas descrito llegar a ser actual, entonces el modelo es verificado. Aunque más bien lo que sería verificado sería la posibilidad física, no el modelo; pero eso sería forzar demasiado la maquinaria, en realidad no estamos motivados a hacer verdad las afirmaciones de los modelos, sino a hacer actual algún mundo posible descrito por el modelo. Eso no verifica al modelo y tampoco su posibilidad, únicamente hace que el estado de cosas se dé.

Implicaciones políticas de la propuesta posibilista

Como lo mencioné en la introducción, a partir de mi propuesta se puede concluir al menos dos cosas políticamente relevantes, para las discusiones en torno al Cambio Climático (CC). Ante todo porque la propuesta posibilista puede interpretar el carácter epistemológico de los modelos climáticos, como posibilidades físicas, y graduarlas.

1. No hay desastres naturales, sino malas políticas de planeación (territorial) o exclusión (género, raza, socio económico, etc.)²³
2. Podemos promover políticas de mitigación de CC más restrictivas

²³ Hay otros autores como Smith (2006) que niegan la existencia de desastres naturales, pero la afirmación fuerte de que no hay desastres naturales es más difícil que negar que algunos desastres naturales que son malas políticas, u otras cosas. Yo voy a argumentar la segunda.

Empezaré por defender (1). Entiendo por desastre natural lo siguiente: “las consecuencias de eventos provocados por peligros naturales que superan la capacidad de respuesta local y que afectan seriamente el desarrollo social y económico de una región”²⁴ (Brookings-Bern Project on Internal Displacement 2008). En otras palabras: si estamos frente a un desastre natural, entonces (x) es un evento natural que tiene consecuencias en una región poblada por seres humanos y (z) supera la capacidad de respuesta local.

En principio parece plausible (x): hay eventos naturales que tienen consecuencias en regiones pobladas por seres humanos: ciclones, terremotos, erupciones volcánicas y demás. Y también parece razonable sostener (z): hay regiones que no tienen capacidad para hacer frente a los peligros naturales, recordemos el terremoto en Haití en el 2010 o el huracán Katrina en Nueva Orleans (Elliott y País 2006).

Mostraré la debilidad de la segunda premisa (z), sostendré que algunos eventos naturales no tienen por qué superar la capacidad de respuesta local, eso debilitará la afirmación de que hay desastres naturales: más bien algunos no serán desastres naturales, sino malas políticas de planeación.²⁵ Aunque es una premisa difícil de negar, porque hay evidencia sobre eventos naturales que de hecho superan la capacidad de respuesta de una región habitada por humanos, puedo debilitarla: demostrar que en algunos casos podemos evitar que los eventos naturales superen la capacidad de respuesta local, teniendo buenas políticas de planeación.

Mi argumento general es:

- a) Si adoptamos una interpretación posibilista, entonces podremos adoptar políticas de planeación.

²⁴ The consequences of events triggered by natural hazards that overwhelm local response capacity and seriously affect the social and economic development of a region

²⁵ Mostrar la debilidad de (x) implica negar que hay eventos naturales o hechos. Autores como Latour & Steve Woolgar (1979), Goodman (1978); Putnam (1990) o Rorty (1981) lo han hecho; pero seguir esa línea de razonamiento se aleja de mi propuesta y si yo quiero demostrar algo desde mi propuesta, negar (z) es más prometedor que negar (x). Lo hago por razones prácticas.

- b) Si tenemos políticas de planeación, entonces algunos desastres naturales se pueden evitar.
- c) Por lo tanto, si adoptamos una interpretación posibilista, entonces algunos desastres naturales se pueden evitar.

Para llegar a mi conclusión señalada anteriormente, primero voy a dar una interpretación posibilista a la evidencia de la que disponemos. Luego mostraré que hay un vínculo con adoptar políticas de planeación y por qué eso implica evitar algunos desastres naturales (en especial haré referencias a México). De modo que si demuestro lo último, entonces mostraré la debilidad de (z).

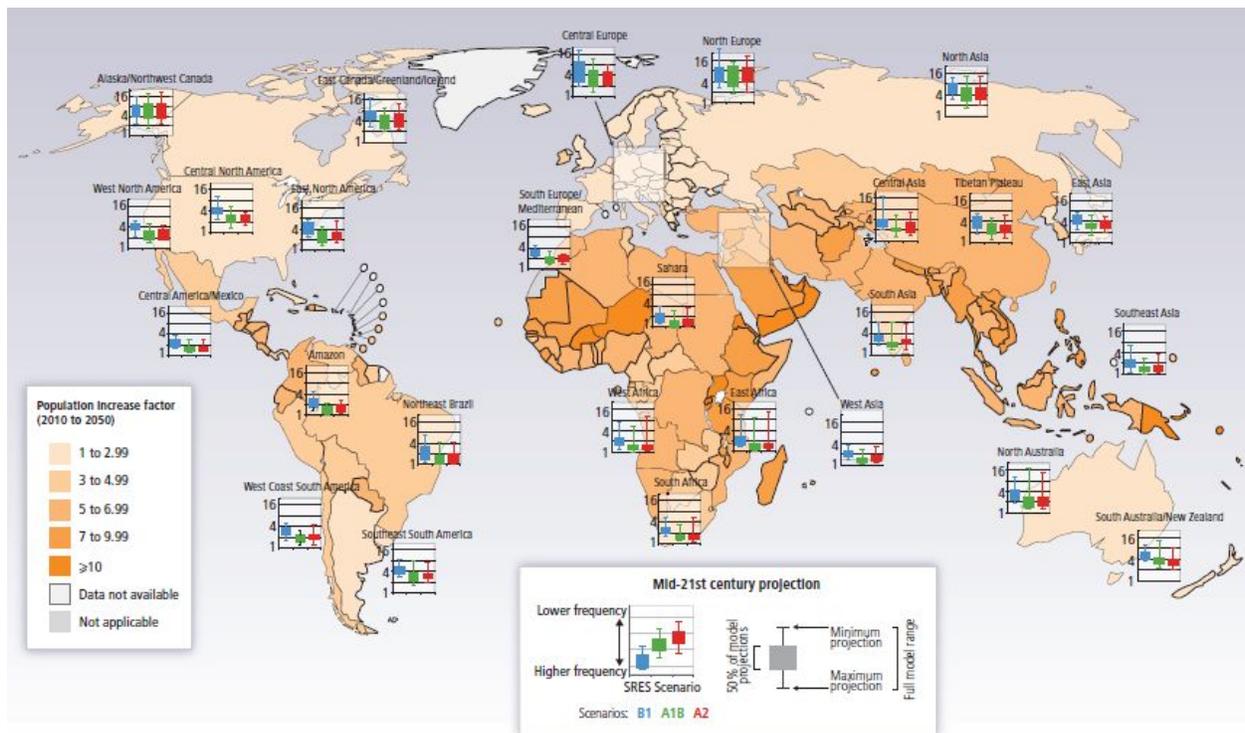


Figura 4 (Smith *et al*, 2014: 719)

Aquí hay una gráfica que presenta proyecciones de tres diferentes escenarios de emisiones del Reporte Especial del IPCC, basados en doce modelos climáticos globales, y expresa

temperaturas extremas y el incremento poblacional, en zonas urbanas, las más vulnerables. Las zonas coloreadas muestran el incremento poblacional esperado y las gráficas de barras expresan las temperaturas máximas esperadas para la mitad del siglo XXI, cuando en realidad se esperaban cada veinte años en el siglo XX, así como dónde se encuentran el 50% de las proyecciones. Los número a un lado de las gráficas de barras indican que mientras las proyecciones están en un número menor (oscila entre 1-16), mayor será la frecuencia de algún evento.

Para la ciudad de México hay tres escenarios (o marcos de posibilidades) B1, A1B y A2. Las proyecciones A1B y A2 están de acuerdo en casi el 50% de sus proyecciones de que el número de frecuencia será menor a 1, es decir, se espera que los eventos de temperaturas extremas sean muy frecuentes, el escenario B1 lo proyecta en 2.

Ahora lo que tenemos es que: hay tres marcos de posibilidades físicas. No sabemos con exactitud dónde se actualizará México para la mitad del siglo XXI, puede actualizarse en un rango de 4 o en .5²⁶; pero nuestra propuesta nos dice que: el mundo más cercano, dado el actual estado de cosas, es 2, al menos desde dos marcos posibilistas. Los eventos de temperatura extrema para una población mayor de 60 años, que oscilará entre los 3 y 5 millones, es muy cercana a nuestro estado actual de cosas.

No necesitamos saber con exactitud qué ocurrirá, sino lo que puede ocurrir. Si sabemos a qué mundo posible México está más cercano, anterior descrito, entonces podemos optar por (a) evitar que ese mundo se actualice o (b) debemos estar preparados cuando se actualice. De momento me interesa sostener (b): tenemos las herramientas filosóficas/científicas para prever ese cambio.

²⁶ Recordemos que esos números indican que mientras más bajo el número más frecuente y si más alto, menos frecuente.

Si demuestro que algunos eventos naturales pueden superar la capacidad de respuesta de una ciudad (o una región habitada por humanos) por malas políticas de planeación, entre otras cosas, entonces debilito la afirmación de que hay desastres naturales, porque serían malas políticas y no simples eventos naturales que superan la capacidad de respuesta local.

e) Si eventos de calor extremo en México llegasen a ocurrir, y a superar la capacidad de respuesta local, como lo sugieren las proyecciones (en la figura 4), entonces se debería a que no pudimos promover políticas tomando en cuenta las proyecciones posibilistas, que son una herramienta para hacer frente a eventos naturales de carácter no determinista.

Pero sostengo que sí tenemos las proyecciones de que esos mundos físicamente posibles son cercanos a nuestro mundo actual (ahí está la evidencia), por lo que

f) podemos promover políticas tomando en cuenta proyecciones posibilistas, para evitar que eventos naturales, como calores extremos que causen daños a poblaciones humanas mayores a 60 años en zonas urbanas²⁷.

De (f) se sigue que:

g) No es el caso que eventos de calor extremo en México llegarán a ocurrir o no es el caso que eventos de calor extremo en México puedan superar la capacidad de respuesta local.

Pero eventos de calor extremo llegarán a ocurrir en México (las proyecciones de la figura 4), entonces sólo estoy negando que

h) No es el caso que eventos de calor extremo en México puedan superar la capacidad de respuesta local

²⁷ Al resto de población también la afectará, pero en la gráfica que presenté, el estimado es para mayores de 60 años.

Por lo tanto, la ocurrencia de algunos desastres naturales se debe a que no tenemos políticas de planeación, motivo por el que llegan a superar la capacidad de respuesta local.

Ahora puedo concluir (z): algunos eventos naturales no tienen por qué superar la capacidad de respuesta local, si desarrollamos las políticas adecuadas. De allí se sigue que algunos no son desastres naturales, sino malas políticas de planeación. Por el momento sólo sostendré que hay algunos eventos relacionados al CC (como temperaturas extremas) que pueden preverse y no tendrían por qué ser desastres naturales, sino un resultados de malas políticas²⁸, si las temperaturas extremas llegasen a ocurrir en las ciudades y tener implicaciones en la salud de los habitantes mayores a 60 años.

Ahora voy a defender (2) y utilizaré la línea de razonamiento abierta en (a). Voy a sostener que podemos adoptar políticas más restrictivas, donde restrictivas se entienden como la limitación de acciones de actores que contribuyen al CC²⁹. La línea de razonamiento abierta en (a) nos dice: si sabemos a qué mundo posible México está más cercano, entonces podemos evitar que ese mundo se actualice usando políticas más restrictivas. Primero quiero presentar que de hecho hay al menos un mundo posible cercano al que México puede actualizarse. Consideremos la siguiente gráfica:

²⁸ No todo se reduce a malas políticas de ordenamiento, sino a políticas de exclusión que hace a algunos sectores de la población humana, e incluso no humana, más vulnerables.

²⁹ De ello no se sigue que debamos, hay otras consideraciones que se tienen que tomar en cuenta; por ejemplo: si un determinado país de hecho puede reducir sus emisiones.

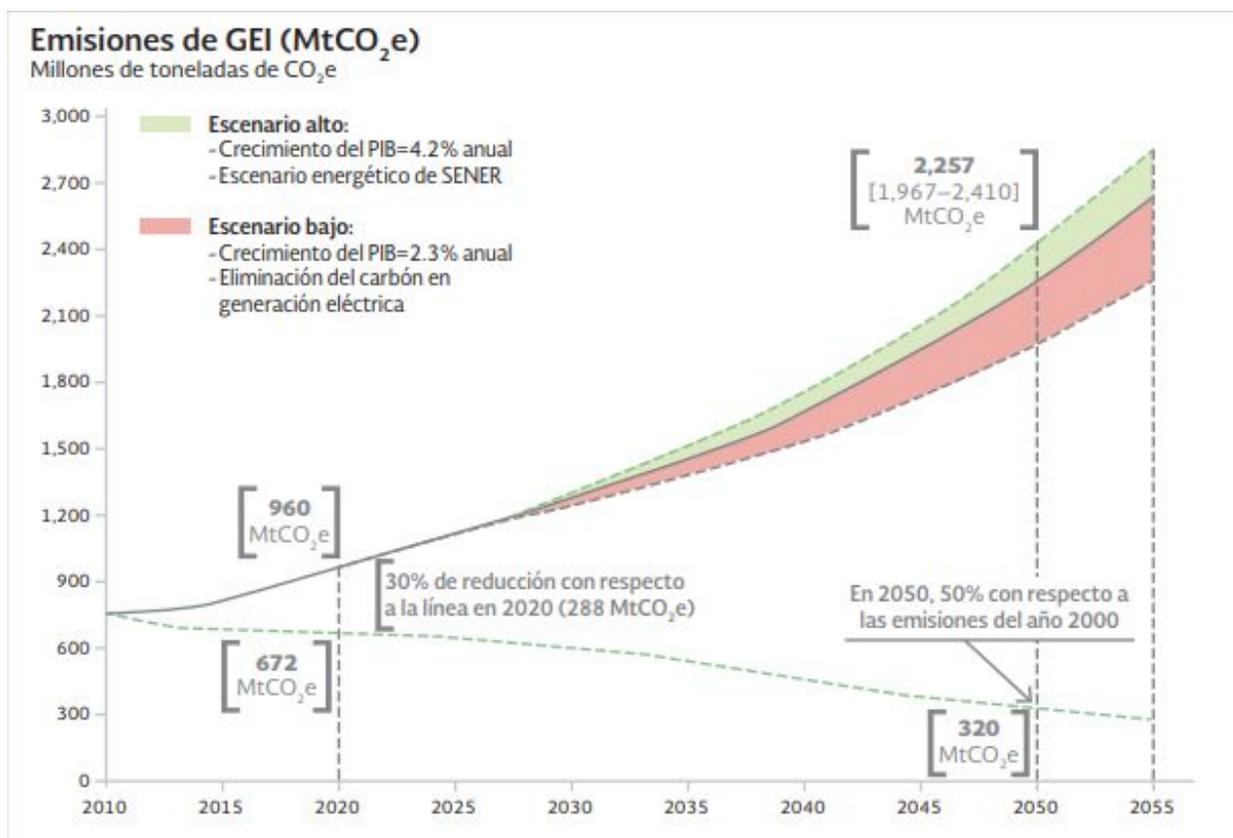


Figura 5 (ENCC, 2013: 81)

Aquí se expresan al menos dos mundos físicamente posibles: un mundo posible con un crecimiento alto del 4.2% para el Producto Interno Bruto (PIB) y un mundo con el 2.3% de PIB. Lo relevante de esta gráfica es mostrar que México puede estar en al menos un mundo físicamente posible y si lo sabemos, podemos hacer que se actualice a uno de esos mundos. Pero voy a argumentar que si queremos que cierto mundo se actualice, entonces tenemos que apelar a políticas más restrictivas.

Como lo expresa la gráfica en la figura 5, si aprobamos políticas más restrictivas, que eliminen el carbón en la generación eléctrica, aunque a México le cueste un crecimiento del 2% respecto al mundo en el que no lo elimina, prevenimos la liberación de varias toneladas de CO₂e.

También existe la posibilidad de limitar la liberación de carbono de otros sectores, que también emiten gases de efecto invernadero y forzantes climáticos:

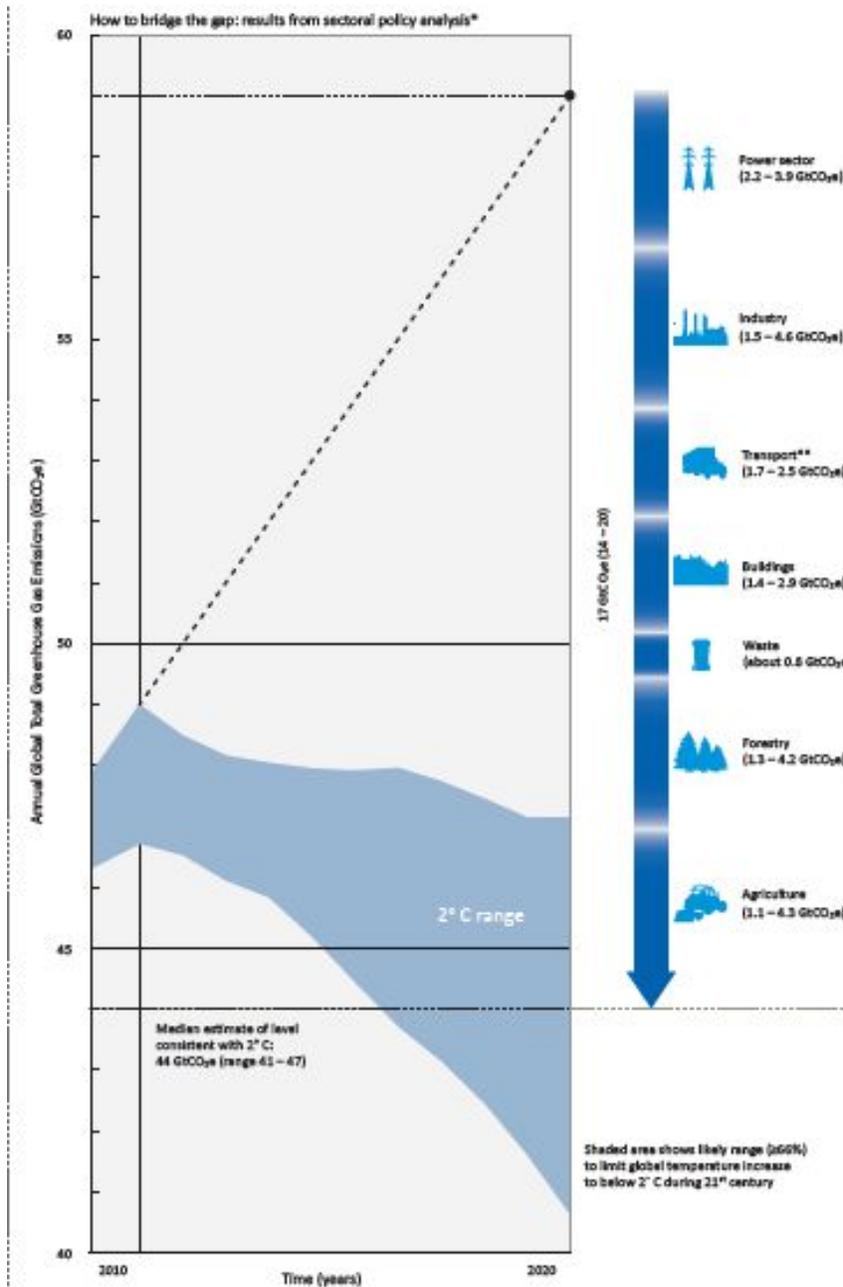


Figura 6 UNEP (2013)

Según esta gráfica, el sector energía contribuye con 2.2-3.9 Gigatoneladas de Dióxido de Carbono Equivalente (GtCO₂e), el sector industria con 1.5-4.6 GtCO₂e y Transporte con 1.5-2.5

GtCO₂e, y así sucesivamente. Si podemos aplicar políticas más restrictivas al sector energía, también a los otros sectores, con la finalidad de mitigar el CC. Eso actualizará mundos posibles en los que podemos permanecer por debajo de los 2°C, aunque con costes económicos que podrían ser muy grandes.

Si queremos mantenernos por debajo de los 2°C a nivel global, tenemos que reducir la siguiente cantidad de CO₂e: 12GtCO₂e , 11 GtCO₂e, 10GtCO₂e u 8 GtCO₂e. Siguiendo los estudios del UNEP, debimos haber alcanzado un pico para el 2011, para mantenernos entre las 40 y 47 GtCO₂e en el 2020 (UNEP, 2013).

Ahora, si en verdad debimos haber alcanzado el pico de emisiones en el año 2011, entonces cualquier acción de mitigación que adoptemos no contribuye a mitigar el CC. Pero mi propuesta presenta que de hecho hay acciones, políticas más restrictivas (Fig. 6), que nos colocan en mundos posibles que contribuyen al CC: como la eliminación del carbón en la industria energética. De aquí podemos concluir que podemos plantear políticas más restrictivas desde mi propuesta y como corolario que el futuro de nuestro mundo aún está en nuestra manos. Y el mundo que queramos actualizar depende de qué tanto estemos dispuestos a sacrificar (por ejemplo, el crecimiento económico), porque, como se puede ver, mi propuesta muestra que no estamos en una situación determinista, sino posibilista.

Aunque esas son algunas ventajas de mi propuesta, soy consciente de algunos problemas que implican y que son de gran tradición filosófica, que son los siguientes.

1.- El problema de elección de marcos: si las posibilidades físicas dependen del marco de interpretación, entonces puede haber resultados físicamente posibles dispares. Al intentar superar el problema de la elección entre mundos posibles, se trasladó a la elección de marco de posibilidades. Lo cual es un verdadero problema pues ¿Cómo elegimos entre distintos marcos de

interpretación? Tendríamos que ofrecer un método para elegir entre marcos de posibilidades. Aunque eso parece contradecir la propuesta, a saber, que hay marcos de posibilidades privilegiados y que debemos encontrar el adecuado. Imaginemos que se da la siguiente situación: un marco M' da como resultado una situación físicamente posible p , y un M'' da como resultado *no p*.

Aún más, imaginemos que cada modelo es producto de un grupo de trabajo que modela una variable climática, como la temperatura, la pregunta es ¿Qué situación físicamente posible es la más cercana? ¿Qué modelo nos está dando una situación físicamente posible más adecuada? ¿Escogeremos p o *no p* para tomar una decisión? En realidad no tengo una respuesta, asumo que los resultados de los modelos no darán situaciones contradictorias y, en caso de que las den, puedan ser debido a confusiones como la que ocurrió con la interpretación de unos datos por un grupo de investigadores en la Universidad de Alabama en Huntsville (Edwards, 2010). Según la interpretación de una de sus mediciones la tropósfera media se enfriaba; contrario a lo que decían otros modelos: se calentaba. Por supuesto, más tarde se corrigieron errores y se dieron cuenta que estaban interpretando mal los datos.

Filosóficamente es un problema, tendría que resolverse; prácticamente asumimos que si más modelos nos dan mundos físicamente posibles muy cercanos y similares, entonces confiaremos en los modelos. Pero eso no quiere decir que hemos resuelto el problema que tendremos que dejarlo sin contestar. Y, por supuesto, aún queda otro problema para la interpretación de la probabilidad como grado de posibilidad, a saber:

2.- El problema de futuros indeterminados: este es un planteamiento que se puede rastrear hasta Hume (1888). Y que puede ser puesto de la siguiente manera: cómo sostener que casos de los que tenemos experiencia se parecen a aquellos de los que no tenemos experiencia. En este caso particular es: tenemos situaciones físicamente posibles que tienen cierta probabilidad de ocurrir, actualmente; pero si ocurren, entonces son de otra forma a las que de hecho son. Por ejemplo: quizá la probabilidad de que la sensibilidad climática se mantenga en 0.1°C es de

%.001; pero si ocurriera, la probabilidad de que fuera %.001 no sería %.001. Lo que nos tendría que comprometer a futuros no indeterminados, por ejemplo, que las cosas y, sobre todo, la probabilidad, seguirá siendo la misma en nuestro mundo actual como en los mundos no actuales.

Eso es un problema que supera demasiado las intenciones del trabajo, sobre todo porque descansa en la fundamentación de los razonamientos inductivos, como lo podría ser la probabilidad. Tendríamos que dar argumentos de por qué las probabilidades de nuestro mundo actual se parecerán a las probabilidades de los mundos posibles no actuales. Sería, en cierto sentido, justificar el principio de la inducción: dar un argumento de por qué situaciones de las que tenemos experiencia se parecen a las que no tenemos experiencia, *grosso modo*. Como ya dijimos, estos son problemas filosóficos de gran tradición y no me veo en la posibilidad de siquiera intentar dar una respuesta. Aunque en realidad no es un planteamiento que atraviese únicamente a mi propuesta, sino a casi cualquier tipo de razonamiento científico (Vickers, 2016).

Hasta aquí algunos de los problemas que puedo vislumbrar *prima facie* a mi propuesta. No obstante, tiene muchas más ventajas de las otras interpretaciones de los resultados de los modelos, al menos en el marco del IPCC. ¿Eso quiere decir que los modelos sólo nos dan cuenta de posibilidades físicas? No. En realidad sostengo que esta es al menos otra interpretación de los modelos. No dudo de que nos puedan dar conocimiento sobre otros aspectos del mundo; pero si podemos ampliar la comprensión de sus capacidades, entonces dispondremos de mejores elementos para tomar decisiones informadas.

4.- Conclusiones

A lo largo del trabajo he respondido a la pregunta de ¿Cuál es el carácter epistemológico de los modelos climáticos? Es decir, ¿qué nos dicen los resultados de los modelos climáticos, en el marco del IPCC? Mi argumentación ha sido que los modelos dan como resultados situaciones

físicamente posibles. Donde físicamente posible lo hemos entendido como situaciones descritas y prescritas por un modelo, de mundos no actuales a los cuales podríamos llegar, o actualizarlos.

Para llegar a mi objetivo demostré que otras interpretaciones tenían serios problemas, que son los siguientes:

1.- Los análisis robustos asumen que los modelos son representaciones isomórficas. Luego si varios modelos predicen lo mismo de su sistema objetivo, entonces aquello que predicen ocurre en el sistema objetivo. El problema era ¿Qué valida un modelo robusto? Creíamos que de sus asunciones falsas, pero ¿Por qué y cómo saber qué suposiciones falsas son las responsables de su validación? Y, sobre todo, ¿cómo representan su sistema objetivo?

2.- Adecuación a un propósito: sostiene que los modelos no nos dicen nada de su sistema objetivo, sino que sirven para validar o justificar hipótesis. Después de un análisis, de distintas interpretaciones, los modelos servían para corregir otros modelos. E independiente del problema de circularidad, no es una propuesta que ayude a los tomadores de decisiones.

3.- Análisis bayesianos: en esta interpretación de la probabilidad la idea es que si el grado de probabilidad de $K > 0$, donde K es una hipótesis, entonces hay evidencia a favor de la ocurrencia de K . El problema es la interpretación probabilística, ¿Qué nos quiere decir que algo tiene un porcentaje de ocurrencia? ¿Y cómo se relaciona con el mundo? Esta interpretación es incompleta, aunque no del todo falsa, pues sostengo que nos ayuda para establecer grados de posibilidad.

4.- Conservadora: la propuesta conservadora sostiene que lo que se descubre del modelo, se descubre de su sistema objetivo. El problema que enfrenta esta propuesta es ¿Cómo se relacionan las matemáticas con su sistema objetivo? Sobre todo porque los modelos son modelos matemáticos. Y, en general, ¿cómo es que los modelos representan? Esas son sus principales dificultades.

Por último, presenté mi propuesta, la propuesta posibilista que adopta ciertas posturas, a saber: un análisis probabilístico, para graduar las posibilidades físicas y propuesta en términos de mundos físicamente posibles abstractos (contraria a la propuesta concretista) de carácter no actualista, es decir, que sólo un estado de cosas es actual y el resto no lo es. No nos preocupamos mucho sobre si las posibilidades físicas representaban un mundo físico imperfecto o perfecto, porque me interesa saber qué mundos son más cercanos para tomar decisiones.

Respecto a esto último, di un ejemplo de una situación de la probabilidad de ocurrencia de dos posibilidades. Lo que se traduce como dos mundos físicamente posibles cercanos a nuestro mundo actual y, como vimos, había un mundo muy cercano a nuestro actual estado de cosas. Lo que sugerí es que los modelos se pueden parametrizar con otras condiciones, otro estado de cosas, que nos acerque a donde queremos llegar. Tal que si actualizamos ese estado de cosas, nos acercará a otro mundo posible. En este sentido, la cercanía de los mundos depende del arreglo del estado de cosas de nuestro mundo actual, no son inamovibles. Como lo dije con anterioridad: esta es una herramienta que ayuda a los tomadores de decisiones. Con ella sabremos qué hacer si queremos llegar a tal cosa; pero nos dice qué debemos hacer, si hemos de cambiar nuestro actual estado de producción, limitar nuestro consumo de alimentos, etc. Pero sí nos dice que si hiciéramos tal cosa, estaríamos en posibilidad de llegar a un mundo no actual *x*.

Quiero añadir que mi trabajo no sólo es filosóficamente interesante (porque resuelve problemas filosóficos), sino que también puede servir de herramienta tanto a tomadores de decisiones, como a áreas tan aparentemente lejanas como ética ambiental. Si un ético ambientalista lee mi tesis, entonces contará con las herramientas para analizar si sus propuestas son viables. Voy a dar un ejemplo: la ecología profunda (*deep ecology*) sugiere que todo ser vivo tiene el mismo estatus moral (son igualmente valiosos) y debemos luchar por conservar el mayor número de especies (Næss, 1973). De acuerdo, si el objetivo es preservar el mayor número de

especies, dadas las actuales condiciones, entonces mi propuesta puede ayudar a contribuir en el análisis de mundos físicamente posibles en el que el mayor número de especies sea el caso.

Una propuesta como la ecología profunda puede tomar prestada la herramienta para analizar qué mundos física posibles hay, a qué medidas recurrir para mitigar GEI (u otros factores que contribuyan al CC) y qué situaciones físicamente posibles se puede. En ese sentido, las propuestas ético ambientalistas que no sólo tendrían contenido propiamente moral (como preservar entidades con un valor moral); sino que tendrían herramientas filosóficas y científicas para que dichas propuestas puedan ser llevadas a cabo.

Mi propuesta podría servir a casi cualquier propuesta ético ambientalista, como el ecofeminismo, ecología social o incluso a éticas tradicionales consecuencialistas, como el utilitarismo, las deontológicas, etc. Porque mi análisis puede ayudar a examinar si hay al menos un mundo físicamente posible en el que puedan llevarse a cabo, incluso sin atentar contra los principios por lo que pugnan; por ejemplo: revisar si una propuesta utilitarista puede llevarse a cabo sin comprometer el bienestar de una cantidad mayor de personas, o animales sintientes.

Si adoptamos una interpretación como esta, de qué nos dicen los modelos climáticos, tendremos una forma más para tomar decisiones que tengan implicaciones en el futuro de nuestro planeta y de todos los seres sintientes y no sintientes en él.

Bibliografía.

Abramowitz, G., & Bishop, C. H. (2015). Climate model dependence and the ensemble dependence transformation of CMIP projections. *Journal of Climate*, 28(6), 2332-2348.

Brookings-Bern Project on Internal Displacement (2008) HUMAN RIGHTS AND NATURAL DISASTERS. Operational Guidelines and Field Manual on Human Rights Protection in Situations of Natural Disaster. Washington, DC. www.brookings.edu/idp

Alexandrova, A.(2010). “Adequacy-for-purpose:The best deal a model can get”. *The Modern Schoolman*, LXXXVI, 295–300.

Baker, A. (2009). “Mathematical Explanation in Science”, *British Journal for the Philosophy of Science*, 60, pp. 611-33

----- (2005). “Are there genuine mathematical explanations of physical phenomena?” *Mind*, 114(454), 223-238.

Bangu, S. I., 2008, “Inference to the Best Explanation and Mathematical Realism”, *Synthese*, 160: 13–20.

Barberousse, A., & Ludwig, P. (2009). “Models as fictions” En Mario Suárez (ed.): *Fictions in science, Philosophical Essays on Modelling and Idealization*, London: Routledge, pp. 248-258

Batterman, R. W. (2008). On the explanatory role of mathematics in empirical science. *The British Journal for the Philosophy of Science*, 61(1), 1-25.

Betz, G. (2015). Are climate models credible worlds? Prospects and limitations of possibilistic climate prediction. *European Journal for Philosophy of Science*, 5(2), 191-215.

----- (2010). What's the worst case? The methodology of possibilistic prediction. *Analyse & Kritik*, 87–106

Biddle , J., & Winsberg, E. (2010). Value judgements and the estimation of uncertainty in climate modeling . na.

Bigelow, J., J. Collins and R. Pargetter, (1993), ‘The Big Bad Bug: What are the Humean's Chances?’, *British Journal for the Philosophy of Science*, 44: 443–62.

Bressan, A. (1980). On physical possibility. *Italian studies in the philosophy of science*, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, 197, 210.

Bueno, O., & Colyvan, M. (2011). “An inferential conception of the application of mathematics.” *Noûs*, 45(2), 345-374.

Butler, J. R. A., Bohensky, E. L., Suadnya, W., Yanuartati, Y., Handayani, T., Habibi, P., ... & Park, S. E. (2016). Scenario planning to leap-frog the sustainable development goals: an adaptation pathways approach. *Climate Risk Management*, 12, 83-99.

Chatfield, C. (2006). Model uncertainty. *Encyclopedia of Environmetrics*.

CICC (2007). Estrategia Nacional de Cambio Climático, Comisión intersecretarial de Cambio Climático, SEMARNAT, México, 2007.

Colyvan, M. (2001). *The Indispensability of Mathematics*, Oxford: Oxford University Press.

Contessa, G. (2007). “Scientific representation, interpretation, and surrogate reasoning.” *Philosophy of Science*, 74(1), 48-68.

Da Costa, N., & French, S. (2000). Models, theories, and structures: Thirty years on. *Philosophy of Science*, 67, S116-S127.

Chalmers, D. (2002). Does conceivability entail possibility?. *Conceivability and possibility*, 145-200.

Eagle, A. (2011) 'Deterministic Chance', *Noûs*, 45: 269–99

Edwards, P. N. (2011). History of climate modeling. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2(1), 128-139.

----- (2010). *A vast machine: Computer models, climate data, and the politics of global warming*. Mit Press.

----- (1999). Global climate science, uncertainty and politics: Data-laden models, model-filtered data. *Science as Culture*, 8(4), 437-472.

Elliott, J. R., & Pais, J. (2006). Race, class, and Hurricane Katrina: Social differences in human responses to disaster. *Social Science Research*, 35(2), 295-321.

ENCC (2013) Estrategia Nacional de Cambio Climático. Visión 10-20-40. Gobierno de la República. México.

http://www.semarnat.gob.mx/archivosanteriores/informacionambiental/Documents/06_otras/ENCC.pdf

Gendler, T. S., & Hawthorne, J. (Eds.). (2002). *Conceivability and possibility*. Clarendon Press.

Giere, R. N. (2010). An agent-based conception of models and scientific representation. *Synthese*, 172(2), 269-281.

Goodman, N. (1978) *Ways of Worldmaking*. Indianapolis: Hackett Publishing Co.

Fitelson, B. (2001). A Bayesian account of independent evidence with applications. *Philosophy of Science*, 68(S3), S123-S140.

Flato, G., Marotzke, J., Abiodun, B., Braconnot, P., Chou, S.C., Collins, W., Cox, P., et al. (2013). "Evaluation of climate models". In T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, & P.M. Midgley (Eds.), *The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change* (pp. 741–866). Cambridge: Cambridge University Press.

Flynn, M., Ford, J. D., Pearce, T., Harper, S. L., & IHACC Research Team. (2018). Participatory scenario planning and climate change impacts, adaptation and vulnerability research in the Arctic. *Environmental Science & Policy*, 79, 45-53.

Frigg, R. and Hartmann, S. (2017), "Models in Science", The Stanford Encyclopedia of Philosophy, Edward N. Zalta (ed.), forthcoming URL = <https://plato.stanford.edu/archives/spr2017/entries/models-science/>.

Frigg, R. and Nguyen, James, (2016) "Scientific Representation", The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Winter 2016 Edition), Edward N. Zalta (ed.), URL = <https://plato.stanford.edu/archives/win2016/entries/scientific-representation/>.

Frigg, R., Thompson, E., & Werndl, C. (2015). Philosophy of climate science part II: modelling climate change. *Philosophy Compass*, 10 (12), 965-977.

Frigg, R., Bradley, S., Du, H., & Smith, L. A. (2014). Laplace's demon and the adventures of his apprentices. *Philosophy of Science*, 81(1), 31-59.

----- (2006). Scientific representation and the semantic view of theories. *Theoria. Revista de Teoría, Historia y Fundamentos de la Ciencia*, 21(1), 49-65. Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea

Frisch, M. (2015). Predictivism and old evidence: a critical look at climate model tuning. *European Journal for Philosophy of Science*, 5(2), 171-190.

Furrer, R., R. Knutti, S. R. Sain, D. W. Nychka, and G. A. Meehl, (2007a) Spatial patterns of probabilistic temperature change projections from a multivariate Bayesian analysis. *Geophys. Res. Lett.*, 34, L06711, doi:10.1029/2006GL027754.

-----, S. R. Sain, D. Nychka, and G. A. Meehl, (2007b) Multivariate Bayesian analysis of atmosphere–ocean general circulation models. *Environ. Ecol. Stat.*, 14, 249–266.

Giorgi, F., & Mearns, L. O. (2002). Calculation of average, uncertainty range, and reliability of regional climate changes from AOGCM simulations via the “reliability ensemble averaging”(REA) method. *Journal of Climate*, 15(10), 1141-1158.

-----, (2003), *Probability of regional climate change based on the reliability ensemble averaging (REA) method*. *Geophys. Res. Lett.*, 30, 1629, doi:10.1029/2003GL017130.

Greene, A. M., L. Goddard, and U. Lall, (2006), *Probabilistic multimodel regional temperature change projections*. *J. Climate*, 19, 4326–4346.

Hacking, I. (1965) *The Logic of Statistical Inference*, Cambridge University Press, Cambridge.

Hales, T. C. (1999). “The Honeycomb Conjecture”. *Discrete and Computational Geometry* 25: 1-22

Hájek, A. (2012)"Interpretations of Probability", The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Winter 2012 Edition), Edward N. Zalta (ed.), URL = [<https://plato.stanford.edu/archives/win2012/entries/probability-interpret/>](https://plato.stanford.edu/archives/win2012/entries/probability-interpret/).

Hargreaves, J. C., & Annan, J. D. (2014). Can we trust climate models?. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 5(4), 435-440.

Hartmann, S. (1996). "The world as a process", *Modelling and simulation in the social sciences from the philosophy of science point of view* (pp. 77-100). Springer Netherlands.

Hashmi, M. Z., Shamseldin, A. Y., & Melville, B. W. (2013). Statistically downscaled probabilistic multi-model ensemble projections of precipitation change in a watershed. *Hydrological Processes*, 27(7), 1021-1032.

Hesse, M. B. (1965). Models and analogies in science.

Hillerbrand, R. (2010). On non-propositional aspects in modelling complex systems. *Analyse & Kritik*, 32(1), 107-120.

Houghton, J. T., Ding, Y., Griggs, D. J., Noguer, M., Van der Linden, P. J., Dai, X., . Johnson, C. A. (2001). *Climate change 2001: The scientific basis*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Hume, David, (1888,) *Hume's Treatise of Human Nature*, edited by L. A. Selby Bigge, Oxford, Clarendon Press. Originally published 1739–40.

Humphreys , S. (Ed.). (2010). *Human rights and climate change*. Cambridge University Press.

Humphreys, P. (2011). Computational science and its effects. In *Science in the Context of Application* (pp. 131-142). Springer Netherlands.

Ibarra, A., & Mormann, T. (2000). “Una teoría combinatoria de las representaciones científicas”. *Crítica: Revista Hispanoamericana de Filosofía*, 3-46.

IPCC (2013). Evaluation of Climate Models. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. *Climate Change 2013*, 5, 741-866. En Flato, G., Marotzke, J., Abiodun, B., Braconnot, P., Chou, S. C., Collins, W. J., ... & Forest, C.

-----*Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability* (Vol. 1). C. B. Field, & V. R. Barros (Eds.). Cambridge and New York: Cambridge University Press.

-----Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY*.

Katzav, J. (2014). “The epistemology of climate models and some of its implications for climate science and the philosophy of science”. *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 46, 228-238.

------(2013) “Severe testing of climate change hypotheses” *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 44(4), pp. 433-441.

------(2012). “Hybrid models, climate models, and inference to the best explanation.” *The British Journal for the Philosophy of Science*, 64(1), 107-129.

Katzav, J., & Parker, W. S. (2015). The future of climate modeling. *Climatic Change*, 132(4), 475-487.

Kiehl, J. (2007). “Twentieth Century Climate Model Response and Climate Sensitivity.” *Geophysical Research Letters* 34:L22710.

Knuuttila, T. (2011) “Modelling and representing: An artefactual approach to model-based representation” en *Studies in History and Philosophy of Science*, 42, pp. 262–271

Lahsen, M. (2005) ‘Seductive Simulations? Uncertainty Distribution Around Climate Models.’ *Social Studies of Science* 35.6 : 895–922

Latour & Steve Woolgar (1979). *Laboratory Life: The Social Construction of Scientific Facts*. Beverly Hills, Calif.: Sage Publications.

Lauta, K. C. (2016). Human rights and natural disasters. In *Research Handbook on Disasters and International Law* (pp. 91-110). Edward Elgar Publishing, Incorporated.

Leng, M. (2005). “Mathematical Explanation”, in C. Cellucci and D. Gillies, eds., *Mathematical Reasoning and Heuristics*, London: King's College Publications, 167–189.

-----, (2010). *Mathematics and Reality*, Oxford: Oxford University Press.

LeTreut, H., R. Somerville, U. Cubasch, Y. Ding, C. Mauritzen, A. Mokssit, T. Peterson, and M. Prather (2007). Historical overview of climate change. In S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor, and H. L. Miller (Eds.), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press

Levins, R. (1968). *Evolution in changing environments: some theoretical explorations* (No. 2). Princeton University Press.

Levy, A. (2012) “Models, Fictions, and Realism: Two Packages”, *Philosophy of Science*, 79(5): 738–48. doi:10.1086/667992

Lewis, D. (1986). *On The Plurality of Worlds*, Oxford: Blackwell.

Lloyd, E. A. (2015). Model robustness as a confirmatory virtue: The case of climate science. *Studies in History and Philosophy of Science Part A*, 49, 58-68.

-----, E. A. (Ed.). (2010). Confirmation and robustness of climate models. *Philosophy of Science*, 77(5), 971-984.

----- (2009) Varieties of Support and Confirmation of Climate Models. In *Aristotelian Society Supplementary Volume* (Vol. 83, No. 1, pp. 213-232). The Oxford University Press.

Lorenz, E. (1995) ‘Climate is what you expect.’ Prepared for publication by NCAR. Unpublished, 1–33.

Lyon, A. and Colyvan, M. (2008). “The Explanatory Power of Phase Spaces”, *Philosophia Mathematica*, 16, pp. 227-43.

Mari, L. and A. Giordani, (2013) “Modeling measurement: error and uncertainty,’, in *Error and Uncertainty in Scientific Practice*, M. Boumans, G. Hon, and A. Petersen (eds.), Ch. 4.

Martínez, B., Quintana, I., Cabos, W., Lizárraga, C. (2015) “*Modelos climáticos y su evaluación*” *Grupo I. Bases científicas. Modelos y modelación. México, Universidad Nacional Autónoma de México-Programa de Investigación en Cambio Climático. Pp. 204-217.*

Mellor, D. H. (2000). Possibility, chance and necessity. *Australasian journal of philosophy*, 78(1), 16-27.

Menzel, Christopher, "Possible Worlds", The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Winter 2017 Edition), Edward N. Zalta (ed.), URL = <<https://plato.stanford.edu/archives/win2017/entries/possible-worlds/>>.

Moreno Sánchez, Ana R., Calderon, M. Riojas, H., Henández, M. Ramsey (2015). “*Salud humana*” *Reporte mexicano de cambio climático. Grupo II Impactos, vulnerabilidad y adaptación, México, Universidad Nacional Autónoma de México-Programa de Investigación en Cambio Climático*, 165-182.

Morgan, Mary (1999), “Learning from Models”, in Morgan and Morrison 1999, 347–88.

Morrison, (2008) “Models as Representational Structures”, *Nancy Cartwright’s Philosophy of Science*, Stephan Hartmann, Carl Hoefer, and Luc Bovens (eds.), New York: Routledge, 67–90.

----- (2007). *Unifying scientific theories: Physical concepts and mathematical structures*. Cambridge University Press.

Næss, A., 1973. “The Shallow and the Deep, Long-Range Ecology Movement”, *Inquiry*, 16, reprinted in Sessions 1995, pp. 151–5.

Norton, S., & Suppe, F. (2001). Why atmospheric modeling is good science. *Changing the atmosphere: Expert knowledge and environmental governance*, 67-105.

Núñez, X. C. (2015). *México ante la urgencia climática: ciencia, política y sociedad*. Universidad Nacional Autónoma de México.

Oreskes, N. (2007). The scientific consensus on climate change: how do we know we're not wrong?. *Climate change: What it means for us, our children, and our grandchildren*, 65-99.

Oreskes, N., Shrader-Frechette, K., & Belitz, K. (1994). Verification, validation, and confirmation of numerical models in the earth sciences. *Science*, 263(5147), 641-646.

Otto, F. E. L. (2012). *Modelling the earth's climate-an epistemic perspective*(Doctoral dissertation, Freie Universität Berlin).

Parker, W.S.(2011). When climate models agree: the significance of robust model predictions. *Philosophy of Science*, 78(4), 579–600.

----- (2009). “Confirmation and Adequacy-for-Purpose in Climate Modeling.” *Aristotelian Society*, 83 (Suppl.): 233–49.

Peirce, C.S., (1973), *Lectures on pragmatism*, Hamburgo, Felix Meiner.

Petersen , A.C. (2012) *Simulating Nature: A Philosophical Study of Computer-Simulation Uncertainties and Their Role in Climate Science and Policy Advice* . Boca Raton, Florida: CRC Press,.

Pincock, C. (2012) *Mathematics and Scientific Representation*, Oxford: Oxford University Press.

----- (2007). Mathematical idealization. *Philosophy of Science*, 74: 957-967, 2007.

Putnam, H. (1990) *Realism with a Human Face*. Cambridge, Mass.: Harvard University Press.

Rolleri, J. L. (2002). La probabilidad como grado de posibilidad (Probability as Degree of Possibility). *Crítica: Revista Hispanoamericana de Filosofía*, 3-26.

Rorty, R. (1981) *Philosophy and the Mirror of Nature*. Princeton: Princeton University Press.

Rougier, J. (2007). Probabilistic inference for future climate using an ensemble of climate model evaluations. *Climatic Change*, 81(3), 247-264.

Saatsi, J. (2010). The enhanced indispensability argument: Representational versus explanatory role of mathematics in science. *The British Journal for the Philosophy of Science*, 62(1), 143-154.

Schaffer, J. (2007), ‘Deterministic Chance?’ *British Journal for the Philosophy of Science*, 58: 113–40

Smith, L. A. and N. Stern. (2011) ‘Uncertainty in Science and Its Role in Climate Policy.’ *Phil. Trans. R. Soc. A* 369: 4818–4841.

Sobert, E. (1999) “Instrumentalism revisited”, *Crítica*, Vol. XXXI, No.91, México: UNAM, abril de 1999

Solomon, S. (Ed.). (2007). *Climate change 2007-the physical science basis: Working group I contribution to the fourth assessment report of the IPCC* (Vol. 4). Cambridge University Press.

Spiegelhalter, D. J. and H. Riesch. (2011) ‘Don’t Know, can’t Know: Embracing Deeper Uncertainties When Analysing Risks.’ *Phil. Trans. R. Soc. A* 369: 4730–4750.

Stainforth, D. A., M. R. Allen, E. R. Tredger, and L. A. Smith (2007). Confidence, uncertainty and decision-support relevance in climate predictions. *Philosophical transactions of the Royal Society A* 365, 2145–2161.

Steele, K. and C. Werndl (2013). ‘Climate Models, Confirmation and Calibration.’ *The British Journal for the Philosophy of Science* 64: 609–635.

Sturgeon , S. ‘Reason and the Grain of Belief.’ *Noûs* 42 (2008): 139–165

Suppes, P. (2002). *Representation and invariance of scientific structures*. Stanford: CSLI publications.

Swanson, K. L., Sugihara, G., & Tsonis, A. A. (2009). Long-term natural variability and 20th century climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(38), 16120-16123.

Swoyer, C. (1991), “Structural Representation and Surrogate Reasoning”, *Synthese* 87: 449–508.

Tebaldi, C., y R. Knutti, (2007), The use of the multi-model ensemble in probabilistic climate projections. *Philos. Trans. Roy. Soc.*, 365A, 2053–2075.

-----and B. Sansó , (2009), Joint projections of temperature and precipitation change from multiple climate models: A hierarchical Bayesian approach. *J. Roy. Stat. Soc.*, 172A, 83–106

-----,L. O. Mearns, D. Nychka, and R. L. Smith, (2004) Regional probabilities of precipitation change: A Bayesian analysis of multimodel simulations. *Geophys. Res. Lett.*, 31, L24213, doi:10.1029/2004 GL021276.

-----, R.W. Smith, D. Nychka, and L. O. Mearns, (2005), Quantifying uncertainty in projections of regional climate change: A Bayesian approach to the analysis of multimodel ensembles. *J. Climate*, 18, 1524–1540.

Thomas, C. D., Cameron, A., Green, R. E., Bakkenes, M., Beaumont, L. J., Collingham, Y. C., ... & Hughes, L. (2004). Extinction risk from climate change. *Nature*, 427(6970), 145-148.

Thomson-Jones, Martin (2010), "Missing Systems and Face Value Practice", *Synthese*, 172: 283–99. doi:10.1007/s11229-009-9507

Tomaszewski, B., Schwartz, D., Szarzynski, J., (2016) Crisis Response Serious Spatial Thinking Games: Spatial Think Aloud Study Results. In: *Geospatial Data & Geographical Information Science*

Toon, A. (2012) "Models as Make-Believe". *Imagination, Fiction and Scientific Representation*, Basingstoke: Palgrave Macmillan

Van Fraassen, B. C. (1980). *The scientific image*. Oxford University Press.

Walker, W. E., Harremoës, P., Rotmans, J., van der Sluijs, J. P., van Asselt, M. B., Janssen, P., & Kreyer von Krauss, M. P. (2003). Defining uncertainty: a conceptual basis for uncertainty management in model-based decision support. *Integrated assessment*, 4(1), 5-17.

Weisberg , M. (2006). Robustness analysis. *Philosophy of Science*, 73(5), 730-742.

Wesche, S. D., & Armitage, D. R. (2014). Using qualitative scenarios to understand regional environmental change in the Canadian North. *Regional Environmental Change*, 14(3), 1095-1108.

Wilby , R. L. and S. Dessai. (2010) 'Robust adaptation to climate change.' *Weather* 65.7: 180–185

Winsberg, E., (2018) "Computer Simulations in Science", The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Summer 2018 Edition), Edward N. Zalta (ed.), forthcoming URL = <<https://plato.stanford.edu/archives/sum2018/entries/simulations-science/>>.