

# Impactos del cambio climático y metodología de evaluación

Máster en CG

<http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/ipcc-technical-guidelines-1994n.pdf>

# Evaluación de los impactos del cambio climático y de la adaptación a él

Siguiendo la Guía Técnica del IPCC  
Carter, Parry, Harasawa y Nishioka, 1994

# Siete pasos para evaluar los impactos del cambio climático y la adaptación a él.

- Definición del problema
- Selección del método
- Test del método
- Selección de escenarios
- Evaluación de impactos
- Evaluación de ajustes autónomos
- Evaluación de estrategias de adaptación

# Paso 1: Definición del problema

Incluye identificar los objetivos de la evaluación, la unidad de exposición, la escala espacial y temporal del estudio, los datos necesarios y todo el contexto general del trabajo.

## Paso 2: Selección del método

Se pueden adoptar un buen número de métodos analíticos, que van desde estudios descriptivos cualitativos, pasando por evaluaciones de diagnóstico y semicuantitativas, hasta llegar a análisis cuantitativos y de pronóstico. Cualquier evaluación de impacto puede contener elementos de uno o más de esos tipos. Se pueden identificar cuatro métodos generales: experimentación, proyección de impactos, estudio empírico de análogos e informes de expertos.

## Paso 3: Test del método

Tras la selección de los métodos de evaluación es importante que sean probados en relación con las principales tareas de evaluación. Hay tres tipos de actividades que pueden ser útiles: estudios de viabilidad, adquisición de datos y prueba del modelo.

## Paso 4: Selección de escenarios

Los impactos se estiman como diferencia entre dos estados: condiciones ambientales y socioeconómicas que se espera que existan en el periodo de análisis en ausencia de cambio climático y aquellas que se espera que existan con cambio climático. Cada uno de esos estados se describe por medio de un escenario, que puede ser definido como una ‘descripción coherente, internamente consistente y plausible de un estado futuro posible del mundo’.

## Paso 5: Evaluación de impactos

Los impactos se estiman como las diferencias a lo largo del periodo de estudio entre las condiciones ambientales y socioeconómicas proyectadas que existirían sin cambio climático y aquellas que se proyecten con cambio climático.

## Pasos 6 y 7: Evaluación de ajustes autónomos y de estrategias de adaptación

Los experimentos sobre impactos se realizan normalmente para evaluar los efectos del cambio climático sobre una unidad de exposición en ausencia de ninguna respuesta que pudiera modificar esos efectos. Se pueden dar ajustes ‘autónomos’, como consecuencia de acciones de mitigación o de respuestas a los efectos del cambio climático.

# Paso 1: Definición del problema

Incluye identificar los objetivos de la evaluación, la unidad de exposición, la escala espacial y temporal del estudio, los datos necesarios y todo el contexto general del trabajo.

# 1. Definición del problema

- **Objetivos de la evaluación (1)**

- Generales

- Necesidad de conocer los efectos físicos, biológicos, económicos, etc. del clima
- Ayuda para evaluar sensibilidades, vulnerabilidades o umbrales asociados a posibles escenarios de cambio climático
- Identificación y/o evaluación de posibles opciones de adaptación o explotación del cambio climático
- Ayuda a la evaluación de costes de los impactos para comparar con los asociados a medidas de adaptación o mitigación
- Ayuda a establecer medidas de sensibilización pública y decisiones políticas
- ⋮

# 1. Definición del problema

- **Objetivos de la evaluación (y 2)**

- Específicos

Su establecimiento condiciona la investigación a llevar a cabo. Por ejemplo, una evaluación de los impactos hidrológicos futuros del cambio climático en un embalse tendría necesidades bastante diferentes de datos y experiencia si el objetivo fuera estimar la capacidad para generar energía eléctrica que si fuera predecir cambios en la renta agrícola como consecuencia de cambios en la disponibilidad de agua para el riego.

# 1. Definición del problema

- **Unidad de exposición**

Es la actividad, grupo, región o recurso expuesto a variaciones significativas del clima

Es muy probable que determine, en gran medida, el tipo de investigadores que deben realizar la investigación, los métodos que se deben emplear y los datos necesarios. Los estudios se pueden referir a un único sector de actividad (agricultura, bosques, producción de energía o recursos hídricos), a varios sectores en paralelo pero separadamente o interactivamente. También puede haber unidades de exposición no sectoriales (un ecosistema, una división geográfica tal como una isla o un grupo social específico).

# 1. Definición del problema

- Área de estudio (1)

Su selección puede estar condicionada por los objetivos del estudio y por las ligaduras que imponga la disponibilidad de datos. Serían opciones:

- > Unidades administrativas (p.e. ciudad, región, país, ...), para las que se dispondría de la mayor parte de los datos económicos y sociales y a cuyo nivel se toman la mayor parte de decisiones políticas.
- > Unidades geográficas (p.e. río, cordillera, isla, ...), unidades de integración útiles para considerar impactos multisectoriales del CC.
- > Zonas ecológicas (p.e. bosque, humedal, estepa, ...), seleccionadas a menudo para tratar problemas de conservación o evaluación de recursos.
- > ...

# 1. Definición del problema

- Área de estudio (y 2)

- > ...

- > Zonas climáticas (p.e. desierto, zona de monzones o lluvias tropicales, ...), seleccionadas a veces a causa de sus rasgos singulares y actividades asociadas con el régimen climático.

- > Regiones sensibles (p.e. zonas costeras, nichos ecológicos, ...), donde los cambios de clima es probable que se noten primero y con sus mayores efectos.

- > Unidades representativas, posiblemente seleccionada con alguno de los criterios anteriores, que pueda tener algún interés especial, p.e. que permita generalizar los resultados.

# 1. Definición del problema

- Marco temporal

Su selección está también condicionado por los objetivos de la evaluación. Por ejemplo, puede ser de 5-10 para impactos industriales, de unos 100 años para el crecimiento de bosques o incluso de 1000 años para los residuos radioactivos.

Hay que tener en cuenta que la fiabilidad de las estimas del futuro disminuye muy rápidamente. Muchas de las proyecciones del clima hacia el futuro están realizadas con MCG, que están sometidos a incertidumbres. Asimismo, en el caso de proyecciones de población, de desarrollo económico o de cambios tecnológicos es difícil estimar más allá de 15-20 años.

# 1. Definición del problema

- Datos necesarios

La disponibilidad de datos es una limitación en muchos estudios de impacto y de adaptación. A veces la obtención de nuevos datos es un objetivo, pero otras veces se usan bases de datos existentes (fuente de errores en algunos estudios). Algunas características a tener en cuenta son:

- > Tipo de datos requeridos
- > Resolución y cobertura espacial y temporal
- > Fuentes y formato de los datos
- > Cantidad y calidad de los datos
- > Disponibilidad, coste y tiempos de entrega
- > Licencias y restricción de derechos sobre la distribución de datos.

# 1. Definición del problema

- Contexto general del trabajo

Pese a que los objetivos de la investigación pueden ser muy concretos es importante situar en contexto el estudio, con respecto a:

- > Estudios similares o en paralelo, realizados o en fase de ejecución
- > Sistemas político, económico o social de la región de estudio
- > Otros cambios sociales, económicos o ambientales ocurridos en la zona
- > Asuntos de escala, indicando la influencia de información a escalas superiores
- > Efectos diversos de cambios en otros sectores, mercados o poblaciones
- > Contexto legal del estudio.

## Paso 2: Selección del método

Se pueden adoptar un buen número de métodos analíticos, que van desde estudios descriptivos cualitativos, pasando por evaluaciones de diagnóstico y semicuantitativas, hasta llegar a análisis cuantitativos y de pronóstico. Cualquier evaluación de impacto puede contener elementos de uno o más de esos tipos. Se pueden identificar cuatro métodos generales: experimentación, proyección de impactos, estudio empírico de análogos e informes de expertos.

## 2. Selección del método

- Experimentación

En Física, la experimentación directa permite, en la mayoría de los casos, probar hipótesis o evaluar las causas o los efectos de ciertos procesos. Aquí, sin embargo, la experimentación directa tiene aplicaciones muy limitadas. Claramente no es posible simular físicamente sistemas de gran escala, como el climático. Sólo es posible en ciertas condiciones, por la escala del impacto o de la unidad de exposición, y con ambientes controlables. Por ejemplo, experimentos sobre crecimiento de plantas con atmósferas enriquecidas en ciertos gases.

## 2. Selección del método

- **Proyecciones del impacto**

Uno de los principales objetivos en evaluación de los impactos del clima, sobre todo en aspectos del cambio climático futuro, es la predicción de impactos futuros. Para proyectar los impactos hacia el futuro se usan diferentes modelos matemáticos que permiten la extrapolación. No se deben confundir con los modelos climáticos, son modelos de impacto. Los efectos directos del clima se acostumbran a evaluar con modelos biofísicos, mientras que los efectos indirectos o secundarios se evalúan con modelos más complejos.

## - Modelos biofísicos

Se emplean para evaluar las interacciones físicas entre el clima y la unidad de exposición. Se han usado para el sector agrícola, para recursos hídricos y para ecosistemas, pero se pueden extender a otros sectores. Hay dos tipos principales:

- **Modelos empírico-estadísticos**, basados en relaciones estadísticas entre el clima y la unidad de exposición (modelos uni o multivariantes). Por ejemplo, predicción de cosechas en función de la temperatura, lluvia, fecha de siembra y aplicación de fertilizantes. Usan en clima presente, luego hay que suponer que las relaciones se mantendrán en clima futuro.
- **Modelos basados en procesos**. Hacen uso de leyes físicas y teorías establecidas para procesos que pueden ser aplicados universalmente a sistemas similares en circunstancias diferentes. Por ejemplo, hay modelos bien establecidos de fotosíntesis aplicables a diferentes plantas y ambientes.

## - Modelos económicos (i)

Se pueden emplear modelos económicos de muy diferentes tipos para evaluar el efectos del CC sobre las economías locales y regionales. Para simplificar la clasificación es útil tomar en cuenta las aproximaciones usadas para elaborarlos y las escalas de actividad económica

- **Modelos de programación.** Poseen una función objetivo y ligaduras. La función objetivo representa el comportamiento del productor (p. e. maximizar los beneficios o minimizar los costes). Hay modelos de programación lineal, cuadrática o no lineal. Se calibran para un año dado por medio de un conjunto de datos.
- **Modelos econométricos.** Poseen funciones de producción y/o demanda que usan como variables independientes precios y un conjunto de variables técnicas, y normalmente el tiempo (para cambios estacionarios). Recientemente se han incluido ‘reglas de decisión’ y la ‘dinámica’ (modelos adaptativos).

## - Modelos económicos (ii)

- **Modelos 'input-output' (IO).** Desarrollados para estudiar la interdependencia entre actividades de producción. Los outputs de algunas actividades son inputs para otras. Las relaciones se supone normalmente que son constantes, lo cual es una debilidad de estos modelos. Recientemente se han desarrollado modelos que incluyen aspectos dinámicos (p. e. la relación entre precio y demanda puede hacer cambiar la relación entre actividades).
- **Modelos a nivel de empresa.** A menudo son modelos de programación, raramente econométricos. Por ejemplo, para simular el proceso de decisión en una granja, entre métodos de producción, financiación, maquinaria, construcciones, etc., para maximizar los beneficios. A veces deben estar acoplados a modelos biofísicos (si se requieren productividades).

## - Modelos económicos (y iii)

- **Modelos a nivel de sector.** Comprenden un sector completo o industria. Normalmente son modelos de programación o econométricos, aunque pueden ser también IO. Para su aplicación a estudios de CC deben incluir la posibilidad de cambios de precios y de demandas. A veces se considera una empresa como representativa del sector completo, con lo que son entonces similares a los anteriores.
- **Modelos macroeconómicos.** Permiten acoplar los cambios en un sector a los cambios en la economía completa, para todas las actividades en una cierta zona geográfica. Estos modelos son capaces de determinar los precios, en un mercado en equilibrio para todas las actividades económicas de la región.

Los modelos económicos son la única herramienta fiable para la estima de variables socioeconómicas relacionadas con el CC, aunque hay que ser cuidadoso al interpretar los resultados (algunos no incluyen como inputs variables que están afectadas por el CC).

## - Modelos integrados de sistemas

Los modelos integrados representan un intento de combinar los modelos anteriores en un único modelo de sistema limitado regionalmente o sectorialmente. Dos integraciones posibles:

- **Aproximación conjunta coste-beneficio**, trata de estimar el coste probable y los beneficios del CC para evaluar las diferentes opciones políticas de mitigación o adaptación
- **Aproximación regionalizada basada en procesos**, trata de modelizar toda la secuencia de procesos de causa y efecto del CC, desde el aumento de concentración de GEI hasta los impactos regionales del CC. Normalmente se usan modelos matemáticos basados en procesos y tecnología SIG.

Los dos tipos tienen orígenes diferentes, pero se están haciendo esfuerzos para converger a un método común interdisciplinario.

## 2. Selección del método

- Estudios empíricos de análogos

Las observaciones de interacción entre clima y sociedad en una región puede ser de gran valor para anticipar los impactos futuros. Se trata de transferir la información desde un lugar o época diferente a un área de interés que se considera análoga. Hay cuatro tipos diferentes de analogías, que se describen a continuación. Los análogos pueden ser también usados como escenarios climáticos.

## - Analogías de eventos históricos

Se emplea información del pasado como análogo de posibles condiciones futuras. Los datos pueden estar relacionados con situaciones climáticas anómalas en el pasado (sequías, olas de calor) o con los propios impactos (erosión severa del suelo por viento). La evaluación sigue un método ‘longitudinal’, ya que los indicadores se comparan antes, durante y después del evento. El éxito del método depende de la habilidad del analista para separar explicaciones climáticas de no climáticas.

## - Analogías de tendencias históricas

Hay diferentes ejemplos de tendencias históricas que posiblemente no están relacionadas con los GEI pero que permiten establecer una analogía del CC inducido por los GEI. El aumento a largo plazo de la temperatura debido a la urbanización constituye un análogo posible para el calentamiento. Otro ejemplo es la subsidencia del suelo en el pasado, cuyos impactos se pueden usar como análogo del futuro aumento del nivel del mar como consecuencia del calentamiento global.

## - Analogías regionales de clima presente

Se refieren a regiones que tienen en nuestros días un clima similar a la de estudio y también se cree que lo sean los impactos del clima sobre la sociedad. Han de tener similares también otras variables ambientales (suelos y topografía, p.e.), el nivel de desarrollo y sus sistemas económicos. Si esto es así, se pueden realizar evaluaciones por el método del caso de control: si en el área objetivo se produce una situación de tiempo anormal sin cambiar las otras condiciones, se puede comparar con un área de control.

## - Analogías regionales de clima futuro

El principio es el mismo que el anterior, con la diferencia de que deben identificarse regiones que tengan un clima presente que sea similar al que se proyecta en la región de estudio para el futuro. Hay algunas particularidades que se deben tener en cuenta, como son la adaptación del sistema o población al cambio, la similitud de otros aspectos (longitud del día, topografía, etc.). Una forma de corregir estos efectos puede ser considerando las diferencias con la altitud en la misma región.

## 2. Selección del método

- Informes de expertos

Para obtener una evaluación rápida del estado del conocimiento relativo a los efectos del clima sobre una unidad de exposición se puede pedir la opinión a expertos en el tema. Es un método ampliamente usado, por ejemplo, por departamentos gubernamentales para la toma de posición sobre problemas que requieren repuesta política. También es útil cuando no hay tiempo de elaborar estudios en profundidad. A veces se puede obtener información cuantitativa requiriendo a varios expertos que contesten preguntas, indicando la probabilidad de que se produzca el evento en cuestión. Puede haber problemas con el diseño y distribución del cuestionario.

## Paso 3: Test del método

Tras la selección de los métodos de evaluación es importante que sean probados en relación con las principales tareas de evaluación. Hay tres tipos de actividades que pueden ser útiles: estudios de viabilidad, adquisición de datos y prueba del modelo.

## 3. Test del método

- Estudios de viabilidad (1)

Una forma de probar los métodos es realizar un estudio de viabilidad o piloto. Se realiza sobre una parte de la región de estudio o sector a evaluar. Estos casos de estudio pueden dar información sobre los modelos a usar, la adquisición de datos e, incluso, sobre la colaboración entre los científicos. Son de gran importancia, sobre todo, cuando se trata de desarrollar un gran proyecto multidisciplinar y multisectorial.

Con el fin de asegurar el perfecto funcionamiento de la evaluación se debe plantear parte o la totalidad de los siguientes enfoques:

## 3. Test del método

- Estudios de viabilidad (y 2)
  - Evaluación de la información disponible
  - Matriz de análisis cualitativo de vulnerabilidad
  - Escenarios preliminares
  - Zonificación geográfica
  - Estudios de 'microcosmos'
  - Superficies de respuesta
  - Estudios de análogos

## 3. Test del método

- **Adquisición y compilación de datos**

Los datos son necesarios para describir la extensión temporal y espacial del CC y sus impactos y para desarrollar, probar y calibrar los modelos predictivos. La recolección de datos se puede realizar a partir de información ya existente proveniente de una o varias fuentes, o ad hoc para el estudio. Se pueden señalar:

- **Compilación empírica de evidencias**
- **Estudios objetivos**
- **Medidas experimentales**
- **Observación sistemática**

## 3. Test del método

- Prueba del modelo

La prueba de los modelos predictivos es posiblemente la parte más crítica de los estudios de impacto. La mayor parte de los estudios están basados casi exclusivamente en el uso de modelos para estimar los impactos futuros. Por lo tanto es crucial para la credibilidad de la investigación que se pruebe rigurosamente el comportamiento de los modelos. Son recomendables dos procedimientos principales:

- **Validación**, comparando las predicciones de los modelos con observaciones reales
- **Análisis de sensibilidad**, estudiando los efectos de modificar la estructura, valores de parámetros o de las variables de entrada.

## Paso 4: Selección de escenarios

Los impactos se estiman como diferencia entre dos estados: condiciones ambientales y socioeconómicas que se espera que existan en el periodo de análisis en ausencia de cambio climático y aquellas que se espera que existan con cambio climático. Cada uno de esos estados se describe por medio de un escenario, que puede ser definido como una ‘descripción coherente, internamente consistente y plausible de un estado futuro posible del mundo’.

## 4. Selección de escenarios

- Establecimiento de la situación actual

Con vistas a proporcionar puntos de referencia para la situación a día de hoy, con la cual comparar situaciones futuras, hay tres tipos de condiciones de referencia que es necesario especificar: la climatológica, la ambiental y la socioeconómica.

## - Referencia climatológica

Normalmente se selecciona de acuerdo con los siguientes criterios:

- › Representatividad del clima medio actual o reciente en la región de estudio
- › Duración suficiente para incluir un rango de variaciones climáticas con un número significativo de anomalías climáticas
- › Periodo adecuado para que todas las variables climáticas sean abundantes, estén adecuadamente distribuidas y listas para ser disponibles
- › Datos de suficiente calidad para ser usados en la evaluación de impactos.

Se recomienda adoptar, cuando sea posible, el periodo climatológico normal de la OMM (1961-1990).

## - Referencia ambiental

La referencia ambiental debe especificar el estado actual de otros factores ambientales no climáticos que afectan a la unidad de exposición. Se puede citar como ejemplo, el pH del suelo, la extensión y localización de los humedales, la concentración media de ozono y los extremos en condiciones actuales, etc.

## - Referencia socioeconómica

Esta referencia debe especificar el estado actual de todos los factores no ambientales que afectan a la unidad de exposición. Los factores pueden ser geográficos (uso de la tierra, comunicaciones), tecnológicos (control de la contaminación, modos de cultivo, regulación hídrica), de gestión (rotación de cultivos, uso de fertilizantes), legales (cuotas de uso del agua, estándares sobre calidad del aire), económicos (precios, costes laborales), sociales (población, régimen alimenticio), etc. Estos factores es posible que cambien en el futuro, por lo que es muy importante incluir cuantos más factores mejor en la referencia.

## 4. Selección de escenarios

- Marco temporal de las proyecciones

El horizonte temporal a lo largo del cual se deben realizar las estimas constituye un punto crítico en todos los estudios de impacto. Hay tres elementos que influyen en el horizonte temporal: los límites de previsibilidad, la compatibilidad de las proyecciones y el carácter continuo o no de la evaluación.

## - Límites de previsibilidad

El horizonte temporal elegido depende de los objetivos de la evaluación, pero hay límites obvios a la habilidad de proyección hacia el futuro. Las proyecciones climáticas imponen un límite a los estudios de impactos climáticos. Las estimas con MCG raramente se extienden más allá de 100 años, debido a las incertidumbres inherentes a simulaciones tan largas y a los recursos computacionales. Esto impone un horizonte hacia el 2100. Por otra parte, en muchas evaluaciones de carácter económico no se puede ir más allá de unos pocos años.

## - Compatibilidad de las proyecciones

Es importante asegurar que las proyecciones climáticas, medioambientales y socioeconómicas hacia el futuro sean mutuamente consistentes tanto espacial como temporalmente.

Es importante tener presente

- **La relación entre incremento de GEI y CC.** Hay un retraso de varias décadas en la respuesta del sistema climático a un aumento de la concentración de GEI.

- **La relación entre  $2xCO_2$  y una atmósfera equivalente  $2xCO_2$ .** Esta última se da antes que la primera porque gases tales como  $CH_4$ ,  $N_2O$  y  $O_3$  troposférico también contribuyen al forzamiento radiativo.

## - ¿Evaluación en puntos discretos o continua?

Se debe hacer una distinción entre considerar impactos en instantes de tiempo futuro discretos y examinar impactos continuos o dependientes del tiempo. Los primeros son característicos de muchas evaluaciones de impacto climático basadas en atmósfera equivalente a doblar la concentración de CO<sub>2</sub>. En contraposición, los escenarios climáticos transitorios permiten tener en cuenta fenómenos dependientes del tiempo y mecanismos dinámicos de realimentación así como considerar ajustes socioeconómicos. Sin embargo se acostumbra en este caso a seleccionar instantes de tiempo concretos a lo largo del periodo de proyección.

## 4. Selección de escenarios

- Proyección de tendencias ambientales en ausencia de CC

El desarrollo de una referencia que describa las condiciones sin CC es crucial, ya que en relación a ella se miden todos los impactos proyectados. Es muy probable que ocurran cambios en factores ambientales en ausencia de CC que sean de importancia para la unidad de exposición. Por ejemplo, cambios de uso de la tierra, en el nivel freático, en la calidad de aire, agua y suelo, etc. Muchos factores están relacionados con tendencias en los factores socioeconómicos por lo que las proyecciones deben ser consistentes con dichas tendencias.

## 4. Selección de escenarios

- Proyección de tendencias socioeconómicas en ausencia de CC

El CC global ocurriría en periodos de tiempo relativamente grandes en términos socioeconómicos. A lo largo de ese periodo está claro que la economía y la sociedad cambiarán, incluso en ausencia de CC. Existen proyecciones oficiales para algunos de esos cambios y se den tener en cuenta con fines de planificación. Sus horizontes temporales varían desde varios años (crecimiento económico, desempleo) hasta siglos o más (población), pasando por décadas (urbanización, producción agrícola, desarrollo industrial).

## 4. Selección de escenarios

- Proyección de clima futuro

Es evidente que para evaluar el impacto del CC se debe tener información cuantitativa del clima en el futuro. Todavía no existe ningún método que proporcione predicciones de confianza del clima futuro, por lo que es costumbre especificar un conjunto de posibles climas futuros. Se denominan 'escenarios climáticos'. Se seleccionan para proporcionar datos climáticos que sean compatibles espacialmente, mutuamente consistentes, libremente disponibles o de fácil distribución y adecuados como entrada en los modelos de impactos. Hay tres tipos básicos de escenarios de clima futuro.

## - Escenarios sintéticos

Un método simple de especificar un clima futuro es a partir de la referencia climática admitiendo variaciones, en el fondo, arbitrarias. Por ejemplo cambios en la temperatura media de  $\pm 1, 2, 3, \dots$  °C y/o en la precipitación anual de  $\pm 5, 10, 15 \dots$  % en relación con la referencia. Después se puede obtener información de

- **Umbral o discontinuidades** que podrían ocurrir a partir de los modelos (p.e. el calentamiento puede favorecer el crecimiento de las plantas pero temperaturas muy altas causan stress)

- **Cambio de clima tolerable**, que un sistema modelado puede soportar (a veces llamado '*carga crítica*'), lo que es políticamente muy útil.

Estos escenarios pueden no ser físicamente plausibles o internamente consistentes.

## - Escenarios análogos

Se construyen identificando regímenes climáticos registrados que puedan servir como análogos para el clima futuro en una región dada. Pueden obtenerse tanto del pasado (análogos temporales) como de otra región en el clima presente (análogos espaciales).

Los análogos temporales son de dos tipos: basados en observaciones instrumentales (normalmente en los últimos 100 años) y aquellos basados en datos 'proxi' (indicadores paleoclimáticos fósiles, anillos de los árboles, etc.).

Los análogos espaciales son bastantes restrictivos, pues puede haber otras variables que no concuerden con las de la unidad de exposición.

## - Escenarios obtenidos a partir de modelos de circulación general (i)

Los modelos numéricos 3D del sistema climático global son la única herramienta creíble disponible en la actualidad para simular los procesos físicos que determinan el clima mundial y, en consecuencia, proporcionar ('anidando' modelos regionales) estimas del CC a escala regional, como se requieren para análisis de impactos. Existen, sin embargo, incertidumbres como consecuencia de ciertas debilidades de los MCG

- Incorrecta representación de los **procesos en nubes**
- Pobre **resolución espacial**
- **Topografía** demasiado suavizada, perdiéndose los rasgos locales
- Representaciones simplificadas de las **interacciones tierra-atmósfera y atmósfera-océano**.

## - Escenarios obtenidos a partir de modelos de circulación general (ii)

Con MCG se han llevado a cabo dos tipos de experimentos para estimar el clima futuro: respuesta de equilibrio y dependiente del tiempo (forzamiento transitorio). La mayoría de experimentos realizados han tratado de evaluar la respuesta de equilibrio del clima a un incremento brusco (normalmente 2x) de la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera. Los MCG se han intercomparado por medio del llamado parámetro de sensibilidad, definido como el cambio en la temperatura media global del aire en superficie al alcanzarse el equilibrio tras forzar el modelo con 2x CO<sub>2</sub>. Los valores obtenidos están en el rango 1.5-4.5 °C.

## - Escenarios obtenidos a partir de modelos de circulación general (iii)

Los experimentos con forzamiento transitorio son más realistas que las anteriores y ofrecen varias ventajas:

- Se puede especificar más correctamente los cambios en GEI en la atmósfera
- La representación del océano es más realista
- Se puede obtener información sobre el ritmo al cual se produce el CC

En la actualidad se están obteniendo escenarios regionales por medio de modelos regionales de clima ‘anidados’ en los MCG realizando experimentos de forzamiento dependiente del tiempo.

Los últimos experimentos incluyen el papel atenuador del calentamiento que producen los aerosoles.

## - Escenarios obtenidos a partir de modelos de circulación general (y iv)

Para construir escenarios se puede disponer normalmente de la siguiente información deducida con MCG:

- Resultados de la ‘simulación de control’, que supone concentraciones de GEI fijas, y un experimento que supone concentraciones futuras. En el caso de respuesta de equilibrio, el resultado de ejecutar el modelo hasta las condiciones de equilibrio tras, p.e., forzar con  $2xCO_2$ . En experimentos dependientes del tiempo, se dan condiciones para cada año, por ejemplo, de 2000 a 2100.
- Valores de las variables climáticas en puntos de malla del modelo en superficie.
- En concreto, temperatura, precipitación, nubosidad y otras variables necesarias para estudios de impactos.
- Datos normalmente promediados mensualmente, pero se puede disponer de datos los diarios de los que se obtienen de algunos modelos.

## 4. Selección de escenarios

- Proyección de tendencias ambientales con CC

Como las tendencias en ausencia de CC ya han sido consideradas, ahora lo deben ser las que son consecuencia del CC. Las más corrientes son la elevación del nivel del mar y la concentración de GEI; en realidad están bajo investigación, pero de los informes del IPCC se puede obtener información sobre ellas para poder elaborar escenarios. Para el nivel del mar se deben, además de efectos globales, considerar los locales. En los GEI se debe ser coherente con los utilizados para los modelos climáticos.

Otros factores (como caudal de ríos, escorrentías o erosión) requieren estudios propios, aunque pueden ser tratados como ajustes autónomos.

## 4. Selección de escenarios

- Proyección de tendencias socioeconómicas con CC

Los cambios en las condiciones ambientales atribuibles al CC se usan para proyectar los cambios en las condiciones socioeconómicas debidas al CC. Todos los otros cambios ya ha sido considerados En algunos casos (efecto del CC sobre la población, p.e.) no se conoce la influencia del CC, luego se consideran sólo no efectos en ausencia de CC.

También se puede considerar el efecto que las políticas de mitigación del CC pueden tener en el estado futuro de la economía y la sociedad. Por ejemplo, el aumento de los precios de la energía puede alterar la actividad económica, modificando los impactos.

## Paso 5: Evaluación de impactos

Los impactos se estiman como las diferencias a lo largo del periodo de estudio entre las condiciones ambientales y socioeconómicas proyectadas que existirían sin cambio climático y aquellas que se proyecten con cambio climático.

## 5. Evaluación de impactos

- **Descripción cualitativa**

Es el método común de presentar evaluaciones que no están basadas en valoraciones cuantitativas. El éxito depende claramente del analista, sobre todo en lo que respecta a las proyecciones hacia el futuro. Es el método habitual cuando se realiza una evaluación por expertos. En este caso puede resultar útil elaborar la matriz de análisis de impactos cruzados y, a partir de ella, clasificar en diferentes categorías las variables del problema.

## 5. Evaluación de impactos

- **Indicadores de cambio**

Resulta útil focalizar todo trabajo de evaluación en regiones, organismos o actividades intrínsecamente sensibles al clima. De esta forma se puede obtener información sobre los efectos debidos al CC. Por ejemplo, el CC podría alterar la altitud a la que se dan ciertas enfermedades propagadas por vectores limitados por la temperatura. Lugares como Kenia, Costa Rica o Argentina podrían ser adecuados para seguir la evolución de los vectores y de la población en riesgo. Similarmente se puede considerar el comportamiento de plantas (desaparición de la floración, p.e.) y la evolución de las zonas costeras.

## 5. Evaluación de impactos

- **Cumplimiento de estándares**

Algunos impactos se pueden caracterizar por el cumplimiento o no de ciertos estándares impuestos legalmente. De esta manera los estándares se constituyen en una referencia u objetivo para medir los impactos del CC. Por ejemplo, el efecto del CC sobre la calidad del agua se podría estimar en referencia a los estándares de calidad del agua en uso.

## 5. Evaluación de impactos

- Coste y beneficios

Posiblemente el resultados más valioso de una evaluación sea la estima cuantitativa de costes y beneficios. Mediante este tipo de análisis económico se puede decidir la asignación de recursos. Por ejemplo, en una estrategia de adaptación se puede contestar a la pregunta ¿Los beneficios de un nivel de adaptación (coste de los daños evitados) superan a los costes de su puesta en marcha? Esta técnica económica resuelve el problema expresando que el resultado óptimo se da cuando se igualan los costes marginales con los beneficios marginales.

## 5. Evaluación de impactos

- **Análisis geográfico**

Los impactos del CC varían espacialmente y la distribución espacial de dicha variación es motivo de preocupación para los políticos, tanto a escala regional, como nacional o internacional ya que las diferencias pueden tener implicaciones tanto políticas como de planificación. Una forma cómoda de presentar la distribución espacial de los impactos es por medio de sistemas de información geográfica (SIG). Además la información puede ser fácilmente almacenada, mezclada o analizada con este tipo de sistemas.

## 5. Evaluación de impactos

- Enfrentarse a la incertidumbre

Las incertidumbres están presentes en todos los niveles de las evaluaciones de los impactos del clima, incluyendo las proyecciones futuras de las emisiones de GEI, sus concentraciones en la atmósfera, los cambios de clima, las condiciones socioeconómicas futuras y los impactos potenciales del CC. Hay dos procedimientos para tratar con las incertidumbres ...

## - Análisis de incertidumbres

Se trata de un conjunto de técnicas para estar a la expectativa de los impactos de eventos futuros inciertos. Se consideran dos tipos de fuentes de incertidumbre: ‘errores’ e ‘incógnitas’.

Los errores tienen diferentes orígenes, como errores de medida, pocos datos, parametrizaciones o hipótesis inadecuadas. Las incógnitas incluyen p.e., escenarios alternativos o variables explicativas importantes. Se establecen límites de confianza (percentiles del 5 o 95%, p.e.) y se usan métodos de Monte Carlo para estudiar la propagación de incertidumbres.

## - Análisis de riesgos

El riesgo se define como el producto de la probabilidad de un evento por su efecto sobre la unidad de exposición. Se cree que los impactos más importantes del CC serán consecuencia del cambio de la frecuencia de eventos extremos o anómalos, por lo que constituyen éstos un foco importante de interés.

Otra forma del análisis de riesgos, el análisis de decisión, se usa para evaluar las estrategias de respuesta al CC. Se pueden asignar probabilidades a diferentes escenarios climáticos e identificar las estrategias de respuestas que más aliviarían los impactos potenciales al mínimo coste.

Para el caso de fenómenos raros y extremos hay métodos especiales (partición multiobjetivo del riesgo) combinando riesgo e incertidumbre de eventos individuales y árboles de decisión.

## Pasos 6 y 7: Evaluación de ajustes autónomos y de estrategias de adaptación

Los experimentos sobre impactos se realizan normalmente para evaluar los efectos del cambio climático sobre una unidad de exposición en ausencia de ninguna respuesta que pudiera modificar esos efectos. Se pueden dar ajustes ‘autónomos’, como consecuencia de acciones de mitigación o de respuestas a los efectos del cambio climático.

## 6 y 7. Evaluación de ajustes autónomos y de estrategias de adaptación

- **Mitigación y adaptación**

Mitigación, o limitación, se refiere a acciones que influyen en las causas del CC, previniendo o retardando el incremento de GEI, limitando las emisiones actuales y futuras desde las fuentes de GEI o aumentando el potencial de los sumideros.

Adaptación se refiere a las respuestas a los efectos tanto adversos como positivos al CC. Incluye cualquier ajuste, ya sea pasivo, reactivo o proactivo que pueda responder a las consecuencias actuales o previstas asociadas con el CC. Implícitamente se admite que el CC ocurrirá y que se deberán tomar medidas políticas.

## 6 y 7. Evaluación de ajustes autónomos y de estrategias de adaptación

### •Evaluación de ajustes autónomos

La mayor parte de los sistemas ecológicos, económicos o sociales experimentarán algún ajuste natural o espontáneo ante un clima cambiante. Estos ajuste ‘autónomos’ es probable que ocurran en respuesta tanto a cambios graduales en el clima medio como a otros más drásticos, como los asociados a un cambio en los patrones de circulación atmosférica dominantes. Lo que es más incierto es saber las formas que adoptarán dichos cambios y el coste implicado. Es evidente que para llevar a cabo una evaluación de impactos correcta es necesario conocer estos ajustes autónomos. Atendiendo a su grado de espontaneidad se pueden considerar tres grupos:

## - Ajustes implícitos

Son reacciones inconscientes o automáticas (también llamadas fisiológicas) de una unidad de exposición a una perturbación climática. Algunos de estos ajustes son claros (en sequía las plantas automáticamente reducen la pérdida de agua por transpiración cerrando los estomas) pero otros no (p.e. adaptación de los árboles a condiciones lentamente cambiantes). Mientras los modelos pueden tener en cuenta los primeros, los segundos requerirían experimentación directa, como por ejemplo, transplantando árboles a zonas climáticas diferentes y estudiando el proceso de aclimatación.

## - Ajustes rutinarios

Se refieren a respuestas conscientes y día a día a las variaciones del clima. Por ejemplo, al cambiar el clima, la estación de desarrollo para los cultivos también cambiaría; la cosecha podría mejorarse cambiando la fecha de siembra. Algunos modelos de simulación de cultivos fijan la fechas de siembra climáticamente (p.e. al iniciarse la estación de lluvias o desaparecer la cubierta nivosa), de modo que el modelo fija automáticamente una fecha que el agricultor determinaría instintivamente o rutinariamente.

## - Ajustes tácticos

Los ajustes tácticos implican un nivel de respuesta superior a los dos anteriores. Tales ajustes serían necesarios tras una secuencia de eventos climáticos anómalos, lo que indicarían un ‘deslizamiento’ del clima. Por ejemplo, una sucesión de años con precipitación por debajo de la media en una región semiárida podría inducir a los agricultores al cultivo de especies resistentes a la sequía, como sorgo o algodón, en lugar de otras más sensibles a la sequía, como el maíz. Los ajustes de este tipo requieren un cambio de comportamiento, pero se dan internamente, dentro del sistema. Sin embargo, si pensamos en un tipo de ajuste más intervencionista puede ser difícil distinguir entre ajuste autónomo o adaptación (p.e. ayudas gubernamentales a la agricultura para compensar condiciones climáticas adversas).

## 6 y 7. Evaluación de ajustes autónomos y de estrategias de adaptación

### •Evaluación de una estrategia de adaptación

Aunque no hay un método generalmente aceptado para plantear las políticas nacionales o regionales para adaptarse al CC, se puede establecer un procedimiento que permite ayudar en el proceso de la toma de decisiones. En este caso se pueden también establecer siete pasos:

- Definición de objetivos
- Relación de impactos climáticos de importancia
- Identificación de opciones de adaptación
- Examen de ligaduras
- Cuantificación de medidas y formulación de estrategias alternativas
- Ponderación de objetivos y valoración de sus intercambio
- Recomendación de medidas de adaptación

## - Definición de objetivos

Hay dos ejemplos de objetivos generales

(i) Promover el desarrollo sostenible

(ii) Reducir la vulnerabilidad

que se deben complementar con objetivos específicos consecuencia del compromiso público, de las preferencias públicas establecidas, legislación, etc.

## - Relación de impactos climáticos de importancia

Se trata de realizar una evaluación, siguiendo los métodos señalados anteriormente, de los impactos posibles de la variabilidad o cambio de clima sobre la unidad de exposición. Donde se espere que los fenómenos climáticos puedan causar algún daño, debe ser especificado con detalle de modo que se puedan identificar las opciones de adaptación apropiadas. Donde se esperen efectos beneficiosos, se deben examinar tanto 'per se' como por el hecho de poder compensar los efectos negativos.

En esencia se trata de evaluar la vulnerabilidad: grado en que queda perturbada la unidad de exposición como consecuencia de los eventos climáticos. Son importantes tanto los factores físicos como los socioeconómicos.

## - Identificación de opciones de adaptación (i)

El principal objetivo de evaluación incluye la preparación de una lista detallada de posibles respuestas adaptativas que podrían ser empleadas frente a los efectos del clima. Esa lista se podría preparar de diferentes maneras (campañas de campo, consultas a expertos) e incluiría todas las prácticas en uso o usadas con anterioridad así como posibles estrategias alternativas, que podrían incluir medidas de gestión, entre las que se incluirían las

- legales
- financieras
- económicas
- tecnológicas
- educación pública
- investigación y formación

## - Identificación de opciones de adaptación (y ii)

Se pueden señalar seis tipos de estrategias de adaptación:

- \* **Prevención de pérdidas**, acciones anticipadas para reducir la susceptibilidad de una unidad de exposición a los impactos del clima
- \* **Pérdidas tolerables**, cuando se aceptan los impactos adversos a corto plazo porque pueden ser absorbidos sin daños a largo plazo
- \* **Pérdidas distribuidas o compartidas**, cuando las acciones distribuyen el peso del impacto sobre una población o región mayor que la afectada directamente por el fenómeno climático
- \* **Cambio de uso o actividad**, para ajustarse a los efectos adversos o positivos del CC
- \* **Cambio de ubicación**, cuando es más importante conservar la actividad que su localización y se produce la migración a áreas más adecuadas para el nuevo clima
- \* **Restauración**, de un sistema a sus condiciones originales tras daños o modificaciones debidas al clima

## - Examen de ligaduras

Muchas de las opciones de adaptación anteriormente identificadas es probable que estén sujetas a leyes o influenciadas por normas sociales comunes, las cuales pueden fomentar, restringir o prohibir totalmente su uso. Por esta razón es importante examinar cuidadosamente, puede que en un estudio separado, cuáles de esas ligaduras están afectando y cómo podrían influir sobre el rango de posibles elecciones disponibles.

## - Cuantificación de medidas y formulación de estrategias alternativas

El siguiente paso es evaluar la eficacia de cada medida de adaptación con respecto a los objetivos establecidos. Si fuera posible se utilizarían modelos para su simulación bajo diferentes escenarios climáticos. Algunas otras fuentes alternativas serían evidencias históricas o documentales, material de campañas o informes de expertos. También se deberían realizar análisis de incertidumbres y evaluación de riesgos.

Un aspecto importante a considerar es la cuantificación de los ritmos de adaptación y sus costes.

## - Ponderación de objetivos y valoración de sus intercambios

Se trata de un punto clave. Los objetivos deben ser ponderados de acuerdo con las preferencias asignadas y proceder a comparaciones entre las efectividades de las diferentes estrategias para llegar a los objetivos. Hay que tener en cuenta que es probable que unos objetivos entren en conflicto con otros y que haya que pensar en cambios entre objetivos o entre componentes de las estrategias. Para ello es necesario conocer, no sólo los impactos y los costes, sino su reparto entre sectores y población.

## - Recomendación de medidas de adaptación

Los resultados de la evaluación se deberían compilar de tal forma que proporcionara información a los responsables de las políticas y de la toma de decisiones sobre las mejores estrategias de adaptación disponibles. Se debería incluir alguna indicación de las hipótesis y de las incertidumbres implicadas en el proceso de evaluación y de los criterios usados (p.e., reglas de decisión, principios clave de la evaluación, apoyo nacional e internacional, viabilidad institucional o técnica) de tal forma que se faciliten las elecciones.

## 6 y 7. Evaluación de ajustes autónomos y de estrategias de adaptación

### • Desarrollo de una estrategia de adaptación

A continuación se indican algunas necesidades de orden práctico para llevar a cabo una evaluación de adaptación según lo visto anteriormente. Se incluyen

- Requisitos institucionales
- Necesidades de datos
- Herramientas analíticas
- Costes
- Ejercicios de políticas
- Seminarios de sensibilización

## - Requisitos institucionales

Los procedimientos formales descritos, usados con éxito y rutinariamente para la gestión una gran variedad de recursos en países desarrollados, requiere, como requisito previo, cierta estructura institucional y de información. Para ello debe existir una cierta estructura capaz de permitir que el estudio se puede realizar de forma uniforme y pueda ser replicado. Esto puede no ser así en ciertos países, por lo que se debe entender lo anterior como algo muy general y detallado debiendo, en cada caso, ser adaptado a las circunstancias particulares.

## - Necesidades de datos

Las necesidades de datos pueden variar considerablemente dependiendo del estudio concreto. Es posible que se pueda disponer más fácilmente de la información biológica y física (datos de producción agrícola, climatológicos o hidrológicos) que de la socioeconómica. Incluso es posible que la recopilación de datos socioeconómicos debe ser una parte del estudio. Esto haría el estudio caro en términos monetarios, de tiempo y de recursos humanos. Una alternativa serían los informes de expertos, pero se debe aplicar con cautela para evitar los peligros de percepciones locales y falta de conocimientos.

## - Herramientas analíticas

Se ha indicado repetidas veces que el análisis puede, y debe, requerir el uso de modelos de muy diferentes tipos y niveles de dificultad. Muchos de ellos son disponibles como programas para ordenadores personales. Sin embargo, independientemente de su precio (que no necesariamente debe ser importante) y de su considerable complejidad, a menudo es necesario enlazar los modelos de tal forma que la salida de uno es la entrada de otro. En consecuencia, la mayor ligadura puede ser la disponibilidad de datos en ciertas regiones.

## - Costes

El coste de realizar un estudio de adaptación al CC puede variar enormemente. Un estudio detallado puede costar varias decenas de millones de pesetas ( $10^5$  ECU), pero para estudios de pequeña escala se pueden obtener resultados muy útiles por unos pocos millones ( $10^4$  ECU).

## - Ejercicios de políticas

Constituyen un método posible para evaluar los ajustes políticos. Los ejercicios de políticas combinan elementos de la modelización con los informes de expertos. Inicialmente se les consideraba como un medio de mejorar la interacción entre científicos y políticos. Se invita a participar a personas con experiencia en la administración, industria y finanzas junto con científicos de experiencia en ‘ejercicios’ (a menudo basados en principios del juego) en que se les pide que juzguen las respuestas adecuadas de políticas para un número dado de escenarios climáticos. Sus decisiones se evalúan usando modelos de impacto.

## - Seminarios de sensibilización

Un método menos formal de comunicar resultados importantes de investigación a los responsables de las políticas es mediante la organización de reuniones sobre CC y sus posibles efectos. Si van dirigidas a los políticos o a otros líderes sociales, puede ser un vehículo muy efectivo para ganar influencia en las actitudes y finalmente en las políticas.