

MATERIALES DE FORMACIÓN DEL GCE PARA LAS EVALUACIONES DE VULNERABILIDAD Y ADAPTACIÓN

Capítulo 7: Agricultura



ÍNDICE

ÍNDICE.....	I
7.1 INTRODUCCIÓN	1
7.2 FACTORES DEL CAMBIO	1
7.2.1 Efectos de la actual variabilidad climática	1
7.2.2 Factores de la respuesta agrícola al cambio climático	2
7.2.3 Factores no climáticos.....	6
7.3 EFECTOS POTENCIALES	7
7.3.1 Cultivos y ganado	7
7.3.2 Resumen de la situación	8
7.4 MÉTODOS HERRAMIENTAS Y REQUISITOS DE LOS DATOS.....	13
7.4.1 Consideraciones generales	13
7.4.2 Limitaciones y fuentes de incertidumbre	18
7.4.3 Combinación de escenarios de cambio climático con herramientas y modelos agrícolas	20
7.4.4 Índices agroclimáticos y Sistemas de Información Geográfica (GIS) .	23
7.4.5 Modelos estadísticos y funciones de rendimiento	23
7.4.6 Modelos de cultivos basados en procesos:	24
7.4.7 CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE LOS MODELOS DE CULTIVOS	28
7.4.8 Vinculación de los modelos de cultivos y los modelos estadísticos de respuesta de rendimiento	30
7.4.9 Herramientas económicas.....	33
7.4.10 Información sobre conjuntos de datos.....	36
7.5 EVALUACIONES INTEGRADAS	38
7.6 ADAPTACIÓN.....	39
7.6.1 Planificación	39



United Nations Framework Convention on Climate Change

7.6.2	Integración.....	48
7.6.3	Incorporación.....	48
7.6.4	Control y evaluación	49
7.7	BIBLIOGRAFÍA.....	51



7.1 INTRODUCCIÓN

Según el Cuarto Informe de Evaluación (AR4) del Grupo de trabajo II del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) (Easterling et al., 2007), el cambio climático afectará en diversos grados y maneras a los cultivos y al ganado. En la actualidad, aproximadamente el 40 % de la superficie terrestre se utiliza para pastos y tierras de cultivo (Foley et al., 2005). También se calcula que la vida de aproximadamente 450 millones de personas de las zonas en desarrollo depende enteramente del manejo de los servicios ecosistémicos (FAO, 2004), lo que refleja la importante escala del problema para el bienestar de la humanidad.

Existen numerosos estudios que documentan las implicaciones del cambio climático para la agricultura y plantean que éste representa una amenaza significativa para el desarrollo sostenible, especialmente para las Partes no incluidas en el anexo I. Identificar qué regiones, poblaciones y sistemas de producción de alimentos se enfrentan a un mayor riesgo por causa del cambio climático puede ayudar a establecer prioridades para la adaptación. Este capítulo se centra en los métodos para realizar dichas evaluaciones e incluye ejemplos de aplicación en países en desarrollo, así como una visión general de los conocimientos existentes sobre el tema. Los méritos de cada enfoque varían en función del nivel de impacto que se estudia, y con frecuencia los diferentes enfoques pueden servir de mutuo apoyo. Por ejemplo, los índices agroclimáticos simples suelen proporcionar la información necesaria sobre cómo responden los cultivos a las lluvias y la temperatura variable en amplias áreas geográficas; se utilizan modelos específicos de cultivos para probar una gestión alternativa que se pueda después utilizar como componente de un modelo económico que analice la vulnerabilidad regional o las estrategias nacionales de adaptación. Por tanto, la combinación de varios enfoques, métodos y herramientas suele ser la mejor opción.

7.2 FACTORES DEL CAMBIO

7.2.1 EFECTOS DE LA ACTUAL VARIABILIDAD CLIMÁTICA

En muchas regiones del mundo, como África, América Central y del Sur, el Sur y el Sureste Asiático y el Pacífico, el clima es extremadamente variable de un año a otro, viéndose afectados países enteros por problemas de sequía e inundaciones durante varios años. Esto suele resultar en graves problemas socioeconómicos.



La agricultura depende en gran medida de los recursos hídricos y las condiciones climáticas, especialmente en las regiones del mundo que son más sensibles a las amenazas climáticas, como África, América Central y del Sur, Asia y el Pacífico. Algunos países de estas regiones, en los que las situaciones económicas y sociales son muchas veces inestables, son extremadamente vulnerables a los cambios en los factores medioambientales. Es el caso, especialmente, de los países donde el amortiguamiento tecnológico contra la sequía y las inundaciones es menos avanzado, y donde los principales factores físicos que afectan a la producción (los suelos, el terreno y el clima) son menos propicios para la agricultura. La producción de cultivos, en consecuencia, es muy sensible a las grandes fluctuaciones del clima de año en año. Las plagas que afectan a los cultivos también dependen del clima y tienden a causar más daños en los países con un nivel tecnológico más bajo.

7.2.2 FACTORES DE LA RESPUESTA AGRÍCOLA AL CAMBIO CLIMÁTICO

La estimación de las futuras respuestas de la agricultura al cambio climático normalmente se basa en perspectivas del cambio climático futuro a través de los métodos y enfoques que se resumen en el capítulo 3. Como se resume más adelante, se elaboran una serie de perspectivas para reflejar las incertidumbres inherentes a la predicción de las condiciones futuras.

La agricultura es un sector complejo que implica diferentes parámetros conductores (medioambientales, económicos y sociales). En la actualidad, se sabe que la producción de cultivos es muy sensible al cambio climático (Easterling et al., 2007), con diferentes efectos según la región. En el AR4 del Grupo de trabajo II del IPCC se calcula una reducción general del rendimiento potencial de los cultivos y la disponibilidad de agua para la agricultura y la población, en muchas partes del mundo en desarrollo, a causa del cambio climático ([Tabla 7 - 1](#)).

Tabla 7 - 2: Cambio climático y factores relacionados relevantes para la producción agrícola y la seguridad alimentaria (adaptado de Parry et al., 2004) y de Easterling et al., 2007)

Factor climático	Dirección del cambio	Consecuencias y factores que interaccionan con la producción agrícola y la seguridad alimentaria
Subida del nivel del mar	Aumento	Intrusión de agua salada en zonas costeras (agrícolas) y salinización de las reservas de agua
Intensidad de precipitación/escorrentía	Ciclo hidrológico intensificado; generalmente en	Cambio en los patrones de erosión y deposición; cambio en los efectos de las tormentas; cambio en la incidencia



	aumento, pero con variaciones regionales	de inundaciones y daños por tormentas, tierras anegadas, aumento de plagas
Estrés por calor	Aumento de las olas de calor	Daños en la formación del grano, aumento de algunas plagas
Sequía	Se sabe poco, pero se esperan incrementos considerables de la variabilidad temporal y espacial	Cosechas perdidas, disminución del rendimiento, competencia por el agua
Dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera	Aumento	Aumento de la productividad de los cultivos pero también aumento de la proliferación de malas hierbas en competencia con los cultivos

Los principales factores de las respuestas agrícolas al cambio climático son los efectos biofísicos (

Tabla 7-2 Caracterización de los efectos agronómicos, capacidad de adaptación y resultados del sector

Impacto biofísico	Nivel de incertidumbre	Intensidad estimada de los efectos negativos	Capacidad de adaptación	Efectos socioeconómicos y otros efectos secundarios
Cambios en las condiciones de cultivo	Medio	Alto para algunos cultivos y regiones	De moderado a alto	Cambios en sistemas agrícolas óptimos; traslado de la industria de procesamiento agrícola; aumento del riesgo económico; pérdida de ingresos rurales; contaminación debida a la percolación de nutrientes; disminución de la biodiversidad
Cambios en las condiciones óptimas para la producción	Alto	Medio	Alto para los sistemas de producción	Cambios en los sistemas agrícolas óptimos; pérdida de ingresos rurales

ganadera		n intensiva		
Cambios en las precipitaciones y en la disponibilidad de recursos hídricos	De medio a bajo	Alto para los países en desarrollo	Moderado	Aumento de la demanda de irrigación; disminución del rendimiento de los cultivos; aumento del riesgo de salinización del suelo; mayor escasez de agua; pérdida de ingresos rurales
Cambios en las plagas agrícolas	De alto a muy alto	Medio	De moderado a alto	Contaminación debida al aumento del uso de pesticidas; menor rendimiento y calidad de los cultivos; aumento del riesgo económico; pérdida de ingresos rurales
Cambios en la fertilidad y la erosión del suelo	Medio	Alto para los países en desarrollo	Moderado	Contaminación debida a la percolación de nutrientes; disminución de la biodiversidad; menor rendimiento de los cultivos; abandono de las tierras; aumento del riesgo de desertificación; pérdida de ingresos rurales

) y los factores socioeconómicos (Tabla 7 -). La producción de cultivos se ve afectada biofísicamente por los cambios en las variables meteorológicas, incluido el aumento de las temperaturas, el cambio en el régimen de precipitaciones y el aumento de los niveles de dióxido de carbono en la atmósfera. Los efectos biofísicos del cambio climático en la producción agrícola dependen de la región y el sistema agrícola, y varían con el tiempo.

Los factores socioeconómicos influyen sobre las respuestas a los cambios en la productividad de los cultivos, con cambios de precio y cambios en la ventaja comparativa. La respuesta final depende de las estrategias de adaptación en cada región y sistema agrícola. La combinación de efectos biofísicos y socioeconómicos puede resultar en:

- Cambios en la combinación de cultivos empleados, y por tanto en el tipo de agricultura y el uso de la tierra rural;
- Cambios en la producción, en los ingresos agrícolas y en el empleo rural;

- Cambios en los ingresos rurales, la contribución al producto interior bruto (PIB) y las ganancias procedentes de las exportaciones agrícolas

Tabla 7-2 Caracterización de los efectos agronómicos, capacidad de adaptación y resultados del sector

Impacto biofísico	Nivel de incertidumbre	Intensidad estimada de los efectos negativos	Capacidad de adaptación	Efectos socioeconómicos y otros efectos secundarios
Cambios en las condiciones de cultivo	Medio	Alto para algunos cultivos y regiones	De moderado a alto	Cambios en sistemas agrícolas óptimos; traslado de la industria de procesamiento agrícola; aumento del riesgo económico; pérdida de ingresos rurales; contaminación debida a la percolación de nutrientes; disminución de la biodiversidad
Cambios en las condiciones óptimas para la producción ganadera	Alto	Medio	Alto para los sistemas de producción intensiva	Cambios en los sistemas agrícolas óptimos; pérdida de ingresos rurales
Cambios en las precipitaciones y en la disponibilidad de recursos hídricos	De medio a bajo	Alto para los países en desarrollo	Moderado	Aumento de la demanda de irrigación; disminución del rendimiento de los cultivos; aumento del riesgo de salinización del suelo; mayor escasez de agua; pérdida de ingresos rurales
Cambios en las plagas agrícolas	De alto a muy alto	Medio	De moderado a alto	Contaminación debida al aumento del uso de pesticidas; menor rendimiento y calidad de los cultivos; aumento del riesgo económico; pérdida de ingresos rurales
Cambios en la fertilidad y la erosión del suelo	Medio	Alto para los países en desarrollo	Moderado	Contaminación debida a la percolación de nutrientes; disminución de la biodiversidad; menor rendimiento de los cultivos; abandono de las tierras;

aumento del riesgo de desertificación; pérdida de ingresos rurales

Tabla 7 -3: Caracterización de los efectos acumulados sobre el sistema agrícola, capacidad de adaptación y resultados del sector

Impacto socioeconómico	Nivel de incertidumbre	Intensidad estimada de los efectos negativos	Adaptación autónoma (capacidad de resistencia privada)	Otros impactos
Cambios en sistemas agrícolas óptimos	Alto	Alta para áreas donde los sistemas agrícolas óptimos actuales son de gran envergadura	Moderada	Cambios en las actividades de producción agrícola y ganadera; traslado de la industria de procesamiento agrícola; pérdida de ingresos rurales; contaminación debida a la percolación de nutrientes; disminución de la biodiversidad
Traslado de la industria de procesamiento agrícola	Alto	Alta para algunos sectores alimentarios que requieren una amplia infraestructura o mano de obra local	Moderada	Pérdida de ingresos rurales; pérdida de patrimonio cultural
Aumento del riesgo (económico)	Medio	Alta para cultivos sembrados cerca de sus límites climáticos	Baja	Pérdida de ingresos rurales
Pérdida de ingresos rurales y de patrimonio	Alto	(Sin caracterizar)	Moderada	Abandono de las tierras; aumento del riesgo de desertificación; disminución del bienestar en las sociedades rurales;



cultural

migración hacia zonas urbanas; disminución de la biodiversidad

7.2.3 FACTORES NO CLIMÁTICOS

Los factores no climáticos como el uso del suelo, la degradación de la tierra, los procesos geológicos, la urbanización y la contaminación afectan al sector agrícola directa e indirectamente a través de sus efectos sobre el clima. Estos factores pueden operar de manera independiente o en asociación con otros (Lepers et al., 2004).

El enfoque de Hazell and Wood (2007) resulta útil, al examinar los factores no climáticos de cambio en el sector de la agricultura a tres escalas diferentes:

Factores a escala global: factores que afectan a la agricultura en todo el mundo, pero en diferente grado. Estos factores incluyen, entre otros, el comercio internacional y la globalización de los mercados, las políticas agrícolas de la OCDE, la rápida globalización de la ciencia y el acceso al conocimiento facilitados por la expansión de las opciones de comunicación global. Se trata de opciones que pueden servir para acelerar el flujo de la información, la tecnología y los productos relevantes para el desarrollo agrícola.

Factores a escala nacional: factores que afectan a toda la agricultura de un país, aunque los factores como malas infraestructuras y acceso al mercado pueden llevar a efectos diferenciados en el espacio. Entre los factores clave están los ingresos y la urbanización, los cambios en las cadenas de comercialización y en las políticas públicas.

Factores a escala local: específicos de cada área geográfica local y de los diferentes sistemas de producción agrícola. Entre los factores relevantes están la pobreza, la presión de la población, la salud, el diseño de la tecnología, los derechos de propiedad, el acceso a la infraestructura y a los mercados, y las oportunidades de empleo no agrícola.

Los factores no climáticos mencionados anteriormente reflejan el importante papel de la economía, desde la escala local a la global, a la hora de impulsar los sistemas y prácticas agrícolas. Además de estos factores económicos primarios, existen una serie de factores medioambientales que influyen significativamente en los sistemas agrícolas, como la actividad volcánica, los terremotos y tsunamis, la contaminación y las especies invasivas.



7.3 EFECTOS POTENCIALES

El cambio climático afecta a todos los sectores agrícolas de multitud de maneras que varían de una región a otra, ya que reduce la previsibilidad de los patrones climáticos estacionales y aumenta la frecuencia y la intensidad de fenómenos climáticos extremos, como las inundaciones, los ciclones y las olas de calor (FAO, 2011). Los efectos del cambio climático en el sector agrícola (Tabla 5-4) están adecuadamente documentados a través de varias organizaciones y de la literatura científica revisada por especialistas, incluido el IPCC y la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Esta sección presentará los efectos más importantes sobre los subsectores de los cultivos y el ganado, la silvicultura y la pesca, a fin de ponerlos en línea con las últimas conclusiones del AR4.

Tabla 7 - 4: Dirección probable del cambio en amplias áreas de impacto de la agricultura (adaptado de Easterling et al., 2007)

Impacto biofísico	Dirección del cambio	Nivel del confianza
Localización óptima de las zonas de cultivo	Cambio	Alto
Rendimiento de los cultivos	Cambio	Alto
Exigencias de irrigación	Aumento	Alto
Erosión del suelo y salinidad	Aumento	Medio
Daños por fenómenos climáticos extremos	Aumento	Medio
Degradación medioambiental	Aumento	Medio
Plagas y enfermedades	Aumento	Medio

7.3.1 CULTIVOS Y GANADO

Los efectos sobre los sistemas alimentarios y los cultivos a escala global pueden ser relativamente pequeños durante la primera mitad del siglo 21, aunque se irán haciendo más profundos en la segunda mitad del siglo (Easterling et al., 2007). Se calcula que la producción de cultivos sufrirá más en los países en desarrollo de latitudes principalmente bajas, y más pronto que en los países con latitudes principalmente entre medias y altas, debido a una combinación de agroclima y condiciones socioeconómicas y tecnológicas adversas (Alexandratos, 2005). Igualmente, los sistemas de producción



ganadera y de pastos se dan en la mayoría de los climas y van desde los sistemas de pastoreo extensivo de herbívoros hasta los sistemas intensivos basados en el forraje y el cultivo de cereales, donde los animales suelen permanecer bajo techo, en un entorno más controlado (Easterling et al., 2007). El cambio climático tiene efectos directos sobre la productividad ganadera, e indirectos a través de los cambios en la disponibilidad de piensos y pastos (FAO, 2011). Los efectos sobre los pastos y la producción ganadera se deberán al aumento de la concentración de dióxido de carbono (CO₂), en conjunción con cambios en la lluvia y la temperatura que probablemente tengan implicaciones significativas sobre las dehesas y zonas de pastoreo, con aumento de la producción en las dehesas húmedas templadas, pero disminución en las regiones áridas y semiáridas (Easterling et al., 2007). Los efectos específicos sobre el cultivo de alimentos, los pastos y el ganado por región se presentan en y Tabla 7 -.

7.3.2 RESUMEN DE LA SITUACIÓN

Se ha publicado un corpus considerable de literatura relacionada con los efectos del cambio climático y la agricultura en los últimos años por parte de organizaciones multilaterales, gobiernos nacionales y académicos. Cada vez está más claro que el cambio climático tendrá efectos diversos tanto espacial como temporalmente sobre subsectores clave, incluido el cultivo de alimentos y el ganado.

Es importante tener en cuenta que los cambios estimados en la frecuencia y la gravedad de los fenómenos climáticos extremos pueden tener mayores consecuencias para la producción de alimentos y la silvicultura que los cambios anuales estimados de temperatura y precipitaciones (Easterling et al. 2007). El calentamiento moderado a causa del cambio climático puede beneficiar al rendimiento de los cultivos y los pastos de las regiones con latitudes entre medias y altas. No obstante, un calentamiento ligero probablemente disminuya el rendimiento en las regiones secas según la estación y las regiones de latitudes bajas (Easterling et al., 2007).

Tabla 7--5: Resumen de conclusiones seleccionadas para el sector de la agricultura, por incrementos del calentamiento (Easterling et al., 2007)

Cambio de temperatura	Subsector	Región	Conclusión
De 1°C a 2°C más	Cultivo de alimentos	Latitudes de medias a altas	<ul style="list-style-type: none"> Limitación de frío mitigada para todos los cultivos La adaptación del maíz y el trigo aumenta el rendimiento entre un 10 % y un 15 %; rendimiento del arroz sin cambios; la variación regional es grande
	Pastos y ganado	Templada	<ul style="list-style-type: none"> Limitación del frío mitigado para los pastos; aumento de la frecuencia estacional de estrés por calor en el ganado
	Cultivo de alimentos	Latitudes bajas	<ul style="list-style-type: none"> Reducción del rendimiento del trigo y del maíz por debajo de la línea de partida; el arroz no cambia La adaptación del maíz, el trigo y el arroz mantiene el rendimiento en los niveles actuales
	Pastos y ganado	Semiárida	<ul style="list-style-type: none"> No aumenta la Productividad Primaria Neta (NPP); aumento de la frecuencia estacional de estrés por calor en el ganado
	Precios	Global	<ul style="list-style-type: none"> Precios agrícolas entre un 10 % y 30 % más bajos
De 2°C a 3°C más	Cultivo de alimentos	Global	<ul style="list-style-type: none"> 550 ppm CO₂ (aprox. igual a +2°C), aumento del 17 % en el rendimiento de los cultivos C3; dicho aumento está compensado por un aumento de 2°C en la temperatura si no se asume ninguna adaptación y de 3°C con adaptación
	Precios	Global	<ul style="list-style-type: none"> Precios agrícolas: Entre un 10% más bajos y un 10% más altos
	Cultivo de	Latitudes de	<ul style="list-style-type: none"> La adaptación aumenta el rendimiento

	alimentos	medias a altas	básico de todos los cultivos
	Pesca	Templada	<ul style="list-style-type: none"> Efecto positivo sobre la trucha en invierno, negativo en verano
	Pastos y ganado	Templada	<ul style="list-style-type: none"> Pérdida moderada de producción porcina y en el ganado estabulado
	Fibra	Temperatura	<ul style="list-style-type: none"> Disminución del rendimiento en un 9 %
	Pastos y ganado	Semiárida	<ul style="list-style-type: none"> Reducción del peso de los animales y de la producción de pastos; aumento del estrés por calor en el ganado
	Cultivo de alimentos	Latitudes bajas	<ul style="list-style-type: none"> La adaptación mantiene los rendimientos de todos los cultivos por encima de la línea de partida; sin adaptación, el rendimiento cae por debajo de la línea de partida en todos los cultivos
De 3°C a 5°C más	Precios y comercio	Global	<ul style="list-style-type: none"> Inversión de la tendencia a la baja en los precios de la madera Precios agrícolas: Entre un 10% y un 40% más altos Las importaciones de cereales de los países en desarrollo aumentarán entre un 10 % y un 40 %
	Silvicultura	Templada Tropical	<ul style="list-style-type: none"> Aumento del riesgo de incendios y de daños causados por los insectos Posible deforestación masiva del Amazonas
	Cultivo de alimentos	Latitudes bajas	<ul style="list-style-type: none"> La adaptación mantiene los rendimientos de todos los cultivos por encima de la línea de partida; sin adaptación, el rendimiento cae por debajo de la línea de partida en todos los cultivos
	Pastos y ganado	Tropical	<ul style="list-style-type: none"> Pérdida importante de producción porcina y en el ganado estabulado

Cultivo de
alimentos

Latitudes
bajas

- Reducción del rendimiento del maíz y el trigo por debajo de la línea de partida independientemente de la adaptación, pero ésta mantiene el rendimiento del arroz a niveles básicos

Pastos y
ganado

Semiárida

- Reducción del peso de los animales y del crecimiento de pastos; aumento del estrés por calor y de la mortalidad animal
-

Tabla 7 -6: Resumen de conclusiones seleccionadas para el sector de la agricultura, por incrementos de tiempo (Easterling et al., 2007)

Período de tiempo	Subsector	Ubicación	Conclusión
2020	Cultivo de alimentos	EEUU	<ul style="list-style-type: none"> Los fenómenos extremos, como el aumento de las precipitaciones fuertes, causan pérdidas de cultivos por valor de 3.000 millones de dólares en 2030 con respecto a los niveles actuales
	Pequeños agricultores y pescadores	Latitudes bajas, especialmente África oriental y meridional	<ul style="list-style-type: none"> Menor rendimiento del maíz, mayor riesgo de que se pierdan las cosechas, alta mortalidad del ganado
	Pequeños agricultores y pescadores	Latitudes bajas, especialmente Asia meridional	<ul style="list-style-type: none"> Fusión precoz de la nieve que causa inundaciones en primavera y escasez de riego en verano
	Silvicultura	Global	<ul style="list-style-type: none"> Aumento de las exportaciones madereras de los países templados a los tropicales Aumento de la cuota de producción maderera procedente de plantaciones Producción maderera entre un 5 % y un 15 % mayor
2050	Pesca	Global	<ul style="list-style-type: none"> Producción primaria marina entre un 0,7 % y un 8,1 % mayor, con grandes variaciones regionales
	Cultivo de alimentos	Global	<ul style="list-style-type: none"> Con adaptación, rendimientos del trigo, arroz y maíz por encima de los niveles básicos en regiones con latitudes medias y altas, y a niveles básicos en latitudes bajas
	Silvicultura	Global	<ul style="list-style-type: none"> Producción maderera entre un 20 % y un +40% mayor
2080	Cultivo de alimentos	Global	<ul style="list-style-type: none"> La necesidad de irrigación de los cultivos aumenta entre un 5 % y un 20 %, debido a la importante variación regional

Silvicultura	Global	<ul style="list-style-type: none">• Producción maderera entre un 20 % y un 60% mayor, con grandes variaciones regionales
Sector agrícola	Global	<ul style="list-style-type: none">• La estabilización en 550 ppm CO₂ mejora entre un 70 % y un 100 % el coste agrícola causado por el cambio climático no mitigado

7.4 MÉTODOS HERRAMIENTAS Y REQUISITOS DE LOS DATOS

7.4.1 CONSIDERACIONES GENERALES

Los métodos para valorar los efectos del clima en la agricultura y evaluar las estrategias de adaptación se han ido refinando con los años y son ampliamente utilizados por científicos, servicios de extensión, agricultores comerciales y gestores de recursos. Uno de los mayores retos para la evaluación agricultura-clima es el análisis de efectos biofísicos y socioeconómicos importantes, ya que hay que obtenerlos de interacciones complejas entre sistemas biofísicos y socioeconómicos que son en sí mismos difíciles de modelar.

Las herramientas que se presentan en este capítulo son adecuadas para utilizarlas cuando cambian las condiciones climáticas medias. Para evaluar los cambios en la frecuencia y la intensidad de fenómenos extremos como las sequías o las inundaciones, es importante incluir una combinación de respuestas empíricas en el rendimiento basadas en datos estadísticos y enfoques modeladores.

Se han desarrollado una serie de enfoques para la valoración de los efectos del cambio climático sobre la agricultura a raíz de los numerosos estudios realizados hasta a fecha. Entre los enfoques utilizados para evaluar los efectos biofísicos se incluyen:

- Los basados en índices;
- Modelos estadísticos y funciones de rendimiento;
- Modelos basados en procesos.

Además, se pueden utilizar diferentes herramientas para examinar los efectos socioeconómicos del cambio climático. Una herramienta relativamente simple de predicción económica suele resultar útil, como la desarrollada por el Programa de estudios de países de los Estados Unidos (Beioff y Warren, 1996). También se pueden



utilizar otros enfoques más complejos, como los modelos de regresión económica, los modelos microeconómicos y macroeconómicos, modelos de explotación y modelos domésticos y comunitarios.

Cada uno de estos métodos proporciona información sobre diferentes tipos de impactos. Por ejemplo, los índices agroclimáticos sencillos se pueden utilizar para analizar los desplazamientos de grandes áreas de zonas de cultivo, mientras que los modelos de crecimiento de cultivos basados en procesos deberían utilizarse para analizar los cambios en los rendimientos de cultivos específicos. Los efectos sobre los ingresos, la subsistencia y el empleo se evalúan mediante análisis económicos y sociales.

Además, se pueden realizar los estudios utilizando un enfoque regional o específico para un lugar. En un *enfoque regional*, se pueden aplicar y poner a prueba varias herramientas sencillas existentes bajo una serie de condiciones en una región dada, y visualizar los resultados en los mapas. Este simple enfoque regional es esencial para integrar el cambio climático, la producción de cultivos, los índices de la demanda de agua y los índices socioeconómicos a escala regional, proporcionando así una herramienta de evaluación de primer orden para analizar posibles estrategias de adaptación.

El *Compendio de métodos y herramientas para evaluar los impactos del cambio climático, y la vulnerabilidad y adaptación a éste*¹ de la CMNUCC, ofrece una visión general del abanico de herramientas que se pueden utilizar en el sector agrícola. Las herramientas mencionadas en el *Compendio* van desde análisis económicos del sector hasta modelos de cultivo a nivel de explotación agrícola. Los modelos de procesos de cultivos tratan el impacto de varios escenarios de gestión y cambio climático en cultivos únicos (p. ej. WOFOST, DSSAT, ALFALFA, ORYZA), cultivos múltiples (ej. APSIM) y ecosistemas enteros (ej. CENTURY).

Otras herramientas se pueden utilizar para analizar factores ecológicos o procesos concretos (ej. ACRU) o para apoyar decisiones estratégicas de adaptación con una perspectiva más amplia (ej. MAACV, RRI, CLOUD, CRAM). Los modelos económicos también ayudan al usuario a evaluar los efectos económicos de los cambios en el valor de la tierra, la oferta y la demanda y la producción de materias primas como resultado del cambio climático. Cuadro 7-1 Resume una serie de herramientas agrícolas utilizadas en el sector.

1

<http://unfccc.int/adaptation/nairobi_work_programme/knowledge_resources_and_publications/items/2674.php>



Cuadro 7-1: Herramientas enumeradas en el Compendio de métodos y herramientas de la CMNUCC (2008)

- APSIM (*Agricultural Production Systems Simulator*, Simulador de Sistemas de Producción Agrícola)
- WOFOST
- ACRU (*Agricultural Catchments Research Unit*, Unidad de Investigaciones de Captación Agrícola)
- Modelos de procesos de cultivos y suelos: CENTURY
- ORYZA 2000
- Sistema de Información y Apoyo a las Decisiones para los Estudios del Cambio Climático en el Sureste de América del Sur (IDSS-SESA Cambio Climático)
- Sistemas de apoyo a las decisiones con vínculos entre los índices agroclimáticos y escenarios sobre el cambio climático originados por los modelos de circulación general.
- Modelo de Adaptación Agrícola a las Variaciones Climáticas (MAACV)
- Índice de Riesgo Relativo (RRI)
- Apoyo Gubernamental a la Agricultura por Pérdidas Ocasionadas por la Variabilidad Climática
- AgroMetShell
- Cartografía Agroclimática del estrés hídrico
- Local Climate Estimator (New_LocClim)
- FAOCLIM 2.0
- CLIMWAT 2.0
- CM Box
- CLOUD (*Climate Outlooks and Agent-based Simulation of Adaptation in Africa*, Perspectivas climáticas y simulación basada en agentes de la adaptación en África)
- CRAM (*Canadian Regional Agriculture Model*, Modelo Agrícola Regional Canadiense)
- Modelo de irrigación: CROPWAT
- Modelo de irrigación: AquaCrop
- Modelos de procesos de cultivos: Sistema de Apoyo a las Decisiones de Transferencia Agrotecnológica (DSSAT) desarrollado por el Consorcio Internacional para la Aplicación de Enfoques de Sistemas a la Agricultura (ICASA)
- Modelos de procesos de cultivos: General-Purpose Atmospheric Plant Soil Simulator

(GAPS 3.1)

- Modelos de procesos de cultivos: Calculador de Impacto Erosión-Productividad (EPIC)
- Modelos de procesos de cultivos: Alfalfa 1.4
- Modelos de procesos de cultivos: AFRC-Wheat
- Modelos de procesos de cultivos: RICEMOD
- Modelos de procesos de cultivos: GOSSYM/COMAX
- Modelos de procesos de cultivos: GLYCIM
- Modelos económicos: Modelos econométricos (ricardianos)
- Modelos económicos: Modelo Input-Output (con IMPLAN)
- Modelos económicos: Modelos de equilibrio general (GTAP)
- Modelos económicos: Métodos estadísticos de respuesta del rendimiento (modelo ClimateCrop)

Tabla 7--7: Resumen de las características de los principales modelos agrícolas

Tipo de modelo	Descripción y uso	Ventajas	Inconvenientes
Índices agroclimáticos y sistemas de información geográfica (GIS)	Basados en combinaciones de factores climáticos importantes para los cultivos. Utilizados en muchos estudios de planificación agrícola. Útiles para el público en general	Cálculo simple. Efectivo para comparaciones interregionales o entre cultivos	Solo se basan en el clima, carecen de respuestas de gestión y no tienen en cuenta la fertilización del carbono
Modelos estadísticos y funciones de rendimiento	Se basan en la relación empírica entre el clima observado y las respuestas de los cultivos. Utilizados en la predicción del rendimiento para la alerta temprana contra hambrunas y los mercados de materias primas	Las actuales variaciones climáticas y de los cultivos están bien descritas	No explican los mecanismos causativos. Puede que no capten las futuras relaciones entre el clima y los cultivos o la fertilización del CO ₂
Modelos de cultivos basados en procesos:	Utilizados para calcular las respuestas de los cultivos a factores que afectan al crecimiento y al rendimiento (ej. el clima, los suelos y la gestión). Utilizados por muchos científicos agrónomos para investigación y desarrollo	Basados en procesos, ampliamente calibrados y validados. Útiles para poner a prueba una amplia gama de adaptaciones. Puesta a prueba de estrategias simultáneas de adaptación y mitigación. Disponibles para la mayoría de los	Requieren datos detallados sobre clima y gestión para obtener mejores resultados

principales cultivos			
Herramientas económicas	Utilizadas para calcular el valor de la tierra, los precios de las materias primas y los resultados económicos para los agricultores y los consumidores en función de los datos sobre la producción de los cultivos.	Útiles para incorporar consideraciones financieras y adaptaciones comerciales	No todos los sistemas sociales, familias e individuos están adecuadamente representados. No siempre se tienen en cuenta las alteraciones inducidas por el clima en la disponibilidad de tierra y de agua. Centrados en el beneficio y en la maximización de la utilidad. Los modelos son complejos y requieren muchos datos
Modelos domésticos y comunitarios	Descripción de estrategias de adaptación para condiciones actuales mediante la familia y la comunidad como unidad de respuesta.	Útiles en economías semi-comerciales	No generalizables; no abarcan el estrés climático futuro, si difiere del actual

Un *enfoque específico para un lugar* conlleva estudios locales que analicen la sensibilidad del rendimiento de los cultivos, la gestión agrícola y el uso del agua frente al clima a escala local, así como las implicaciones para las decisiones políticas que afecten a la gestión del agua. Los modelos de cultivo normalmente se centran en optimizar el tiempo de producción y la eficacia del uso de nutrientes (principalmente nitrógeno) y del agua irrigada.

Como los sectores económicos varían enormemente según los países y el entorno físico, lo apropiado será utilizar deferentes métodos de evaluación del impacto. Es probable que una *combinación de enfoques* conduzca al conjunto de resultados más sólido para una zona dada.

7.4.2 LIMITACIONES Y FUENTES DE INCERTIDUMBRE

Escenarios de cambio climático. Los escenarios de cambio climático se obtienen a partir de los modelos de circulación general (GCM) impulsados por cambios en la composición atmosférica de los gases de efecto invernadero (GEI), que proceden de diferentes argumentos en los escenarios socioeconómicos (véase el capítulo 4). Uno de



los retos principales es cómo interpretar los resultados obtenidos a partir de los escenarios climáticos. En todas las regiones, la incertidumbre con respecto a la magnitud de los cambios estimados resulta en incertidumbre en las evaluaciones agrícolas. Por ejemplo, en algunas regiones, las predicciones de lluvia (una variable clave para la producción de cultivos) puede ser positiva o negativa dependiendo del escenario climático utilizado. La incertidumbre derivada del modelo climático está relacionada con la limitación de los modelos actuales para representar todos los procesos atmosféricos y las interacciones del sistema climático. Las limitaciones asociadas con la proyección de vías de desarrollo socioeconómico son una fuente adicional de incertidumbre.

Variabilidad climática. Los climas regionales fluctúan de manera natural con respecto al promedio a largo plazo. Por ejemplo, la variabilidad de las precipitaciones ocurre en relación con el tiempo y la cantidad, afectando a la agricultura cada año. Gran parte de la variabilidad histórica que se ha dado en el pasado continuará ocurriendo, con el cambio climático modificando esos patrones de variabilidad, lo que puede resultar, por ejemplo, en cambios en el número y la intensidad de las sequías e inundaciones que deben ser cuidadosamente evaluados en cualquier evaluación del impacto, especialmente con respecto a los cambios en los patrones de precipitaciones futuros.

Modelos agrícolas. Los modelos agrícolas contienen muchas relaciones simples y derivadas empíricamente que no representan completamente los procesos reales de las plantas. Cuando los modelos se ponen a prueba adecuadamente contrastándolos con los datos observados (proceso de calibración y validación), los resultados representan el rendimiento agrícola en las condiciones climáticas actuales. No obstante, las simplificaciones de los modelos de cultivos son una fuente de incertidumbre de los resultados. Por ejemplo, los modelos agrícolas en general asumen que las malas hierbas, enfermedades y plagas de insectos están controladas; que no existen condiciones problemáticas del suelo, como la alta salinidad o acidez; y que no hay fenómenos climáticos catastróficos, como fuertes tormentas. Los modelos agrícolas simulan la gama actual de tecnologías agrícolas disponibles en todo el mundo. No incluyen las posibles mejoras en dicha tecnología, pero pueden utilizarse para probar los efectos de algunas posibles mejoras, como las variedades mejoradas y la irrigación programada. Hay una serie de modelos agrícolas utilizados ampliamente por científicos, servicios técnicos de extensión, agricultores comerciales y gestores de recursos para evaluar alternativas agrícolas para una ubicación concreta en diferentes condiciones (ej. años de sequía, cambios políticos relacionados con la utilización de agroquímicos, cambios en los insumos hídricos, entre otras).

Efectos del CO₂ sobre los cultivos. El CO₂ es un componente de la fotosíntesis de las plantas y por tanto influye en la producción de biomasa. También regula la apertura de los estomas de las plantas y afecta, consecuentemente, a su transpiración. Por tanto, en teoría, las plantas que crecen con más CO₂ ambiental producirán más biomasa y consumirán menos agua. Los experimentos realizados en invernadero lo confirman. Sin embargo, a causa de las múltiples interacciones de los procesos fisiológicos, en la práctica los cambios son menores que en la teoría. En el campo los cambios son aún menores. La mayoría de los modelos de cultivos utilizados para las evaluaciones del



cambio climático incluyen la opción de simular los efectos del aumento del CO₂ en el rendimiento de los cultivos y el uso del agua (véase Rosenzweig e Iglesias, 1998). Es difícil validar los resultados del modelo de cultivo porque solo existe un número limitado de experimentos de este tipo en el mundo, lo que suscita incertidumbre sobre los resultados simulados.

Problemas de escala. Aumentar la escala de los resultados de vulnerabilidad y adaptación a un nivel regional no es tarea fácil, como en la mayor parte de los ejercicios a escala. Idealmente, es posible usar la información de las explotaciones que son representativas de la agricultura de la región, y debe establecerse su grado de su representatividad. Pero es más frecuente que las evaluaciones regionales dependan de la información facilitada por los planificadores regionales y los economistas en lo referente a los efectos a escala regional, basada en los datos locales que les son suministrados y son debatidos por toda una serie de partes interesadas.

Proyecciones socioeconómicas. Las limitaciones de proyectar cambios socioeconómicos no solo afectan a los escenarios socioeconómicos, sino también a la capacidad potencial de adaptación del sistema. Por ejemplo, la incertidumbre sobre los cambios de la población (densidad, distribución, migración), el PIB y la tecnología determinan y limitan las posibles estrategias de adaptación que se pueden emplear (véase el capítulo 3 para más información sobre el desarrollo de escenarios socioeconómicos).

7.4.3 COMBINACIÓN DE ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO CON HERRAMIENTAS Y MODELOS AGRÍCOLAS

Dada la incertidumbre de los escenarios (magnitud del cambio y a veces dirección del mismo), un buen enfoque es utilizar varios escenarios posibles como punto de partida para los modelos agrícolas. Junto al uso de varios escenarios, también se fomenta el uso de conjuntos de modelos (Rotter et al., 2011). Además, la utilización de escenarios de sensibilidad combinados con modelos agrícolas (por ejemplo, un aumento de la temperatura hasta 3° C y los cambios en la precipitación de -30 % a +30 %) proporciona una idea de los umbrales tolerables de cambio para un sistema concreto.

Un método que ha mostrado ser efectivo para generar escenarios de cambio climático es estudiar los cambios en las últimas décadas y luego proyectar esos cambios en el futuro cercano. Por ejemplo, se toma la base de datos del clima a largo plazo de una región (o lugar) y se divide en dos períodos: por ejemplo, 1930-1960 y 1970-2000. Luego se estudian las propiedades estadísticas de cada uno de estos conjuntos de datos (medias, pero también frecuencias, de épocas de sequía, de tormentas, de la probabilidad de días subsiguientes con lluvia, etc.). Esto se consigue con "generadores de clima". El último paso es continuar (proyectar) la tendencia observada en todos esos parámetros estadísticos y crear un escenario sintético para el futuro próximo (por ejemplo, de 10 a 20 años).



Además de realizar análisis estadísticos de las tendencias climáticas, los resultados de los modelos climáticos regionales como PRECIS (véase el capítulo 4) se pueden usar como datos de entrada para el modelo de Sistema de Apoyo a las Decisiones de Transferencia Agrotecnológica (DSSAT) (véase **Error! Reference source not found.**). Las series temporales diarias de temperaturas máximas y mínimas, precipitaciones y radiación solar del experimento PRECIS se pueden utilizar como archivo climático de partida para el DSSAT y los cambios deseados en el rendimiento de los cultivos se pueden modelar en un marco de tiempo futuro. Este enfoque se ha usado recientemente en la Segunda Comunicación Nacional de Bután².

² <www.nec.gov.bt/climate/snc/>



Cuadro 7-2: Descripción del Sistema de Apoyo a las Decisiones de Transferencia Agrotecnológica (DSSAT)

El Sistema de Apoyo a las Decisiones de Transferencia Agrotecnológica (DSSAT) es un sistema de apoyo a las decisiones que incluye modelos informatizados basados en procesos que predicen el crecimiento, desarrollo y rendimiento en función de las condiciones locales del suelo y del clima, los escenarios de gestión de los cultivos y la información genética.

Los cultivos abarcados incluyen los cereales como el arroz, el trigo, el maíz, la cebada, el sorgo y el mijo, legumbres como la soja, cacahuetes, habas, garbanzos, tubérculos como la patata y la mandioca, algodón, caña de azúcar, hortalizas y varias otras especies (véase **Tabla 7 -3**). DSSAT también incluye un set de herramientas básico para preparar datos de entrada, así como programas de aplicación para el análisis estacional, de la rotación de los cultivos y espacial. Los modelos no solo predicen el rendimiento de los cultivos, sino la dinámica de los recursos, como el agua, el nitrógeno y el carbono, y el impacto medioambiental, como la lixiviación del nitrógeno. DSSAT incluye un componente económico que calcula el rendimiento recolectado basado en márgenes brutos y derivados, el precio de los productos recolectados y el coste de los insumos.

Los modelos utilizan como punto de partida los datos diarios del clima, la información sobre el perfil del suelo y datos básicos sobre la gestión de los cultivos. Normalmente, los resultados de los modelos se comparan con los datos experimentales locales con el fin de evaluar el rendimiento del modelo y determinar las características genéticas de las variedades locales.

DSSAT se puede usar a nivel de explotación agrícola para determinar el impacto del cambio climático sobre la producción y las posibles prácticas de adaptación que deberían desarrollar los agricultores. También se puede utilizar a nivel regional para determinar el impacto del cambio climático a diferentes escalas espaciales, siendo la principal consideración la disponibilidad de datos de entrada precisos. DSSAT se puede usar para cualquier región del mundo, siempre que haya disponibles datos locales de entrada. DSSAT se ha distribuido a más de 2.000 usuarios en más de 90 países y se ha probado en la mayoría de las regiones del mundo.

En el momento de redactar el presente documento, DSSAT estaba experimentando un período de transición debido a que el Consorcio para la Aplicación de Enfoques de Sistemas a la Agricultura (ICASA) había finalizado en julio de 2011. Los desarrolladores se están trasladando a una fundación DSSAT para seguir desarrollando el modelo. En el Taller de formación del GCE celebrado en Nairobi en noviembre de 2011 se utilizó una versión beta de DSSAT 4.5.

<<http://www.icasa.net/dssat/>>

Desarrollador: Dr. Gerrit Hoogenboom, Director de AgWeatherNet, Universidad del Estado de Washington, 24106 North Bunn Road, Prosser, Washington



7.4.4 ÍNDICES AGROCLIMÁTICOS Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (GIS)

Índices agroclimáticos sencillos combinados con GIS han sido utilizados para proporcionar una evaluación inicial de los impactos del cambio climático sobre la agricultura global y de los desplazamientos de áreas aptas para la agricultura en regiones concretas. Los índices agroclimáticos se basan en relaciones simples de la aptitud o el potencial de cultivos ante el clima (por ejemplo, identificando los umbrales de temperatura de un cultivo en particular o utilizando la temperatura acumulada a lo largo de la temporada de cultivo para predecir los rendimientos de la cosecha (véase, por ejemplo, Holden, 2001). Este tipo de coeficiente derivado empíricamente es especialmente útil para el mapeo a gran escala de áreas de impacto potencial.

Cuándo se combinan con una base de datos exhaustiva espacialmente de clima, cultivos y GIS, los índices agroclimáticos sencillos son una manera económica y rápida de determinar la alteración del potencial de los cultivos para áreas bastante grandes. La aplicación de índices agroclimáticos en África (Badini et al., 1997) ha permitido comprender las relaciones entre el clima, los suelos y los sistemas de producción agrícola, así como las complejidades asociadas con su variabilidad. Carter y Saarikko (1996) describen los métodos básicos para el análisis agroclimático espacial.

7.4.5 MODELOS ESTADÍSTICOS Y FUNCIONES DE RENDIMIENTO

Los modelos complejos de multi-variables intentan proporcionar una explicación estadística a los fenómenos observados teniendo en cuenta los factores más importantes (por ejemplo, pronosticando los rendimientos de los cultivos en función de la temperatura, la lluvia, la fecha de siembra y el uso de fertilizantes). Una posible desventaja de su suso para examinar los impactos del cambio climático futuro es su capacidad limitada para predecir los efectos de los fenómenos climáticos que se encuentran fuera de la gama de variabilidad actual. También se ha criticado su uso porque están basados en relaciones estadísticas entre factores, en lugar de en la comprensión de los mecanismos causales más importantes.

Se han desarrollado modelos de regresión múltiple para representar las respuestas del rendimiento basado en procesos para estas variables medioambientales y de gestión. Las funciones de rendimiento se han utilizado para evaluar la sensibilidad y la adaptación al clima, por ejemplo, en China (Rosenzweig et al., 1999) y a nivel mundial (Parry et al., 2004).



7.4.6 MODELOS DE CULTIVOS BASADOS EN PROCESOS:

Los modelos basados en procesos utilizan funciones simplificadas para expresar las interacciones entre el crecimiento de los cultivos y los principales factores ambientales que afectan a los cultivos (es decir, el clima, los suelos y la gestión), y muchos han sido utilizados en las evaluaciones de impacto climático. La mayoría han sido desarrollados como herramientas para la gestión agrícola, especialmente para proporcionar información sobre las cantidades óptimas de insumos (tales como fertilizantes, pesticidas y riego) y su tiempo óptimo. Actualmente existen modelos dinámicos de cultivos disponibles para la mayoría de los principales cultivos. En cada caso, el objetivo es predecir la respuesta de un cultivo concreto frente a factores específicos de clima, suelo y gestión que rigen la producción.

Los modelos dinámicos de crecimiento de cultivos ICASA/IBSNAT (Consortio Internacional para la Aplicación de Enfoques de Sistemas a la Agricultura – Sitios Internacionales de Referencia para la Transferencia de Agrotecnología) están estructurados como un sistema de apoyo de decisiones para facilitar las simulaciones de respuestas de los cultivos a la gestión (DSSAT). Los modelos ICASA/IBSNAT han sido utilizados extensamente para evaluar los impactos del clima sobre la agricultura a diferentes niveles, desde sitios concretos hasta extensas áreas geográficas (véase Rosenzweig e Iglesias, 1994 y 1998, para una descripción completa del método). Este tipo de estructura de modelo es especialmente útil para evaluar la adaptación de la gestión agrícola al cambio climático. El software DSSAT incluye todos los modelos ICASA/IBSNAT con una interfaz que permite el análisis de resultados.

El conjunto de modelos WOFOST es genérico e incluye los parámetros de modelo para ciertos cultivos (Supit et al., 1994; Boogaard et al., 1998). Hay varias versiones de los modelos, que se están desarrollando continuamente en la Universidad de Wageningen.

El modelo EPIC (Calculadora del Impacto de la Productividad de la Erosión; Sharpley y Williams, 1990) incorpora funciones simplificadas del crecimiento de los cultivos que responden al clima, al ambiente y a la gestión; se ha utilizado en algunas evaluaciones de impacto climático.

Tabla 7 -3 Resume los principales modelos de cultivos que se han utilizado para evaluar los efectos y la adaptación al cambio climático. Rosenzweig e Iglesias (1998) proporcionan directrices más completas para utilizar modelos de cultivos en los estudios sobre adaptación.

Tabla 7 -3: Modelos de cultivos

Cultivo	Modelo
Específico para cultivos	Modelos específicos para cultivos ICASA/IBSNAT incluidos en el software DSSAT (incluidos todos los modelos CERES y GRO que



se mencionan bajo cada cultivo)

Genérico	WOFOST proporciona una familia de modelos genéricos con parámetros específicos para el maíz, el trigo, la remolacha azucarera y más
Modelo general	EPIC
Requisitos de irrigación para todos los cultivos	CROPWAT
Alfalfa	ALSIM, ALFALFA
Cebada	CERES-Barley
Algodón	GOSSYM, COTCROP, COTTAM
Habas	BEANGRO
Maíz	CERES-Maize, CORNF, SIMAIZ, CORNMOD, VT-Maize, GAPS, CUPID
Cacahuetes	PNUTGRO
Mijo perla	CERES-Millet, RESCAP
Patatas	SUBSTOR
Arroz	CERES-Rice, RICEMOD
Sorgo	CERES-Sorghum, SORGF, SORKAM, RESCAP
Soja	SOYGRO, GLYCIM, REALSOY, SOYMOD
Caña de azúcar	CANEMOD
Trigo	CERES-Wheat, TAMW, SIMTAG, AFRC-WHEAT, NWHEAT, SIRIUS, SOILN-Wheat

Error! Reference source not found. El cuadro anterior proporciona más información sobre DSSAT como ejemplo de familia de modelos específicos para cada cultivo, y el cuadro Cuadro 7-3 proporciona información sobre CROPWAT como ejemplo de modelo genérico.

Iglesias et al., (2011(b)) utilizaron modelos de cultivos basados en procesos para proporcionar los medios para obtener información sobre las respuestas de los cultivos frente al clima y la gestión en nueve lugares de Europa, para representar las principales



regiones agroclimáticas y simular proyecciones para escenarios de cambio climático. En cada uno de los lugares, se simulan las respuestas de los cultivos basadas en procesos ante el clima y la gestión utilizando modelos de cultivo DSSAT para el trigo, el maíz y la soja. Las respuestas modeladas del trigo frente al clima son representativas de las posibles respuestas de los cereales de invierno en todas las regiones y de los cereales de invierno y de primavera en las regiones mediterráneas. La respuesta del maíz representa a la mayoría de los cultivos regados en verano, mientras que la respuesta de la soja frente al clima representa a muchos cultivos leguminosos de diferentes regiones. Los cultivos elegidos son representativos de aproximadamente dos tercios de la tierra cultivable de la mayoría de las regiones y se han utilizado en numerosas ocasiones para representar la producción alimentaria mundial. DSSAT simula el desarrollo fenológico diario y el crecimiento en respuesta a los factores medioambientales (suelo y clima) y a la gestión (variedad de cultivo, condiciones de plantación, fertilización con nitrógeno y riego). Los modelos DSSAT pueden simular los conocimientos actuales sobre el efecto del CO₂ en los cultivos (Long et al., 2006). Los datos climáticos diarios para el período 1961–1990 fueron obtenidos de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica

(NOAA) de los Estados Unidos; las características del suelo y los datos sobre gestión se obtuvieron de las estaciones de investigación agrícola. Los datos relativos a la distribución y la producción de los cultivos se obtuvieron de EUROSTAT. En la imagen Figura 7 - 1 se muestran ejemplos de cambios simulados en las variables de gestión y en Figura 7 - 2 se muestran los impactos del cambio climático observados en Europa.

Figura 7 - 1: Respuestas simuladas de los cultivos a la fecha siembra (a) y los aportes de agua y de nitrógeno (b) en una zona seca del Sur de Europa (Almería, España) (Iglesias et al., 2011 (b))

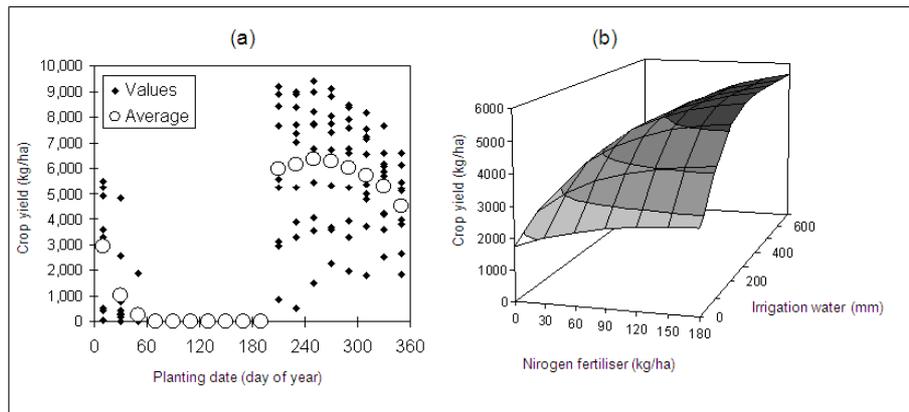
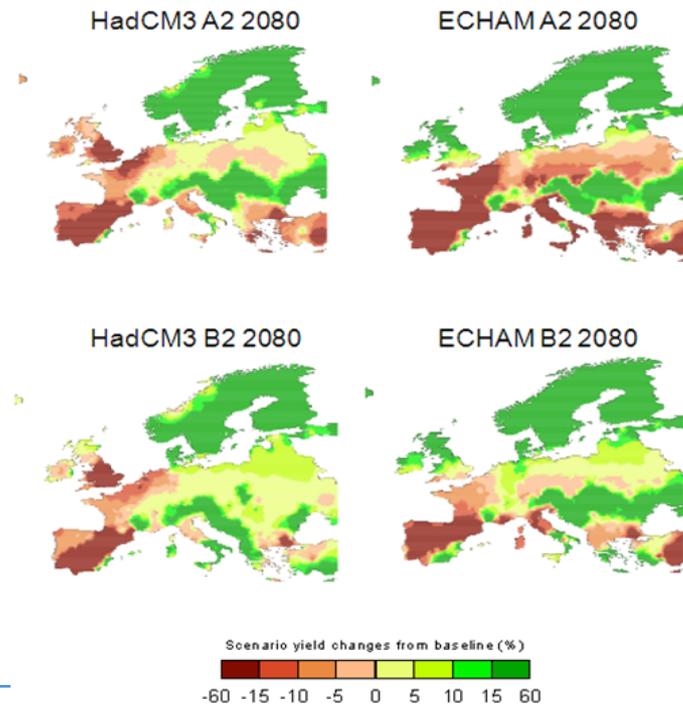


Figura 7 - 2: Cambios en el rendimiento de los cultivos con los escenarios HadCM3/HIRHAM A2 y B2 para el período 2071-2100 (Iglesias et al., 2011 (b))



Cuadro 7-3: Descripción de CROPWAT

CROPWAT es una herramienta de apoyo a la toma de decisiones basada en Windows y desarrollada por la División de Desarrollo de Tierras y Aguas de la FAO. CROPWAT se utiliza para realizar cálculos estándar para los estudios sobre evapotranspiración y uso del agua en los cultivos, concretamente el diseño y la gestión de los sistemas de riego. Permite desarrollar recomendaciones para unas mejores prácticas de riego, planificar la programación de riego en condiciones de suministro variable de agua y evaluar la producción en condiciones de secano o riego deficitario.

La herramienta se puede aplicar para poner a prueba la eficiencia y diferentes estrategias de irrigación (por ejemplo: la programación del riego, mejoras en la eficiencia del riego) en condiciones de cambio climático. La simulación de los efectos directos de los cambios en la concentración de CO₂ en la atmósfera sobre el uso de agua en los cultivos queda fuera del alcance de la herramienta. La herramienta requiere datos climáticos y sobre los cultivos (disponibles en la base de datos CLIMWAT, incluida en la herramienta) para los cálculos de las necesidades de agua de los cultivos y las necesidades de riego. El desarrollo de programaciones de riego y la valoración de las prácticas de secano y de regadío se basan en un equilibrio suelo-agua diario, utilizando varias opciones para las condiciones de abastecimiento de agua y gestión del riego.



CROPWAT para Windows y su manual están disponibles a través de la FAO:

<http://www.fao.org/nr/water/infores_databases_cropwat.html>.

7.4.7 CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE LOS MODELOS DE CULTIVOS

En la aplicación de los modelos de cultivos y las herramientas para evaluar la vulnerabilidad y adaptación al cambio climático es esencial la participación de las partes interesadas. Un primer paso obligatorio es que los técnicos interesados reúnan datos agrícolas del campo para la calibración y validación de los modelos de cultivos. Luego, los actores clave regionales evalúan la representatividad de los resultados del modelo agrícola para ampliar la escala espacial de los resultados del modelo.

En todos los modelos numéricos, incluidos los modelos agrícolas, el procedimiento implica ajustar los coeficientes que describen las características de los cultivos y su respuesta ante las condiciones ambientales. **Tabla 7 -4** La Tabla 7-9 resume los pasos para calibrar y validar los modelos agrícolas, con referencias específicas a los modelos DSSAT, a modo de ejemplo. En los modelos DSSAT, los coeficientes que se tienen que ajustar se incluyen en un archivo de "coeficientes genéticos" que representa conceptualmente a cada variedad de cultivo. En el software se incluye un archivo con los coeficientes genéticos de cada cultivo para las variedades más comúnmente utilizadas, ajustados sobre la base de numerosos experimentos de campo previos y avalados. Estos coeficientes son sólo un punto de partida y deberán ser nuevamente ajustados durante el proceso de calibración para representar el crecimiento de los cultivos y el desarrollo de la variedad seleccionada bajo las condiciones climáticas y de gestión de la zona en particular. Los pocos coeficientes genéticos que describen cada variedad pretenden representar sólo la fenología o el tiempo de las fases del desarrollo (por ejemplo, la etapa juvenil, la floración, la madurez fisiológica) y la acumulación de materia seca en los diferentes órganos (por ejemplo, raíces, partes vegetativas y granos). Dichos coeficientes no pretenden representar las numerosas características de cada variedad de cultivo, tales como las respuestas a plagas y enfermedades.

Tabla 7 -4: Resumen de pasos para la calibración y validación de los modelos de cultivos

Paso	Concepto/procedimiento	Ejemplo
1 Calibrar la fenología del cultivo	<p>La etapa de desarrollo del cultivo determina cómo se acumula la biomasa y a qué órgano de la planta se dirige.</p> <p>Ajustar las fechas simuladas de floración y madurez fisiológica a los datos de campo.</p>	<p>En el modelo CERES-Maize esto es descrito por los coeficientes P1 (tiempo termal desde que brota hasta que acaba la fase juvenil); P2 (punto hasta el cual se retrasa el desarrollo por cada hora de aumento en el fotoperiodo); y P5 (tiempo termal entre la floración femenina y la madurez fisiológica).</p> <p>Mediante el ajuste de estos coeficientes el desarrollo del cultivo se puede ajustar al desarrollo de campo</p>
2. Calibrar la producción de granos	<p>El ritmo y la cantidad adecuada de acumulación de biomasa determina la productividad final del cultivo.</p> <p>Ajustar el rendimiento de granos simulado a los datos de campo.</p>	<p>En el modelo CERES-Maize esto es descrito por los coeficientes G2 (numero máximo posible de mazorcas por planta) y G3 (tasa de llenado de la mazorca durante la etapa de llenado de granos lineales y en condiciones óptimas).</p>
3. Validar el modelo	<p>Asegurar que el ajuste del modelo de cultivo resulte en un conjunto de datos de campo experimentales</p>	<p>Los modelos bien calibrados siempre deberían simular correctamente las fechas de madurez de los cultivos. Los</p>



calibrado	para representar una zona agrícola más amplia. Probar si las fechas simuladas de floración y madurez, y la producción de granos reflejan los resultados de los agricultores	rendimientos simulados pueden ser más elevados que los observados en las explotaciones agrícolas, pero deberían representar la variación geográfica de los rendimientos de las fincas como resultado de las diferencias en el suelo y en las condiciones de gestión.
------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

7.4.8 VINCULACIÓN DE LOS MODELOS DE CULTIVOS Y LOS MODELOS ESTADÍSTICOS DE RESPUESTA DE RENDIMIENTO

Los modelos de cultivos basados en procesos proporcionan los medios para obtener información de las respuestas de los cultivos al clima y a la gestión cuando no hay datos experimentales disponibles (Lobell y Burke, 2010; Iglesias et al., 2000; Porter y Semenov, 2005; Steduto et al., 2009; Hansen y Jones, 2000). No obstante, los modelos de cultivos basados en procesos utilizan muchos datos, incluidos los datos climáticos diarios, las características del suelo y la definición de la gestión de los cultivos. Normalmente las restricciones de los datos limitan el uso de los modelos a los lugares donde está disponible la información necesaria para la calibración. Los modelos tampoco están hechos para evaluar los impactos de fenómenos extremos (incluidas las sequías, inundaciones, plagas y enfermedades).

Una metodología alternativa para vincular las herramientas agrícolas con los escenarios de cambio climático es seleccionar lugares representativos para simular las respuestas de los cultivos basados en procesos frente al clima y la gestión (por ejemplo, utilizando modelos de cultivos DSSAT). Los resultados se pueden utilizar después para definir modelos estadísticos de respuesta del rendimiento para cada lugar. Este enfoque ha demostrado ser útil para el análisis en China (Rosenzweig et al., 1999), España (Iglesias et al., 2000; Iglesias y Quiroga, 2007; Quiroga e Iglesias, 2009), y a nivel mundial (Lobell y Burke, 2010; Parry et al., 2004; Rosenzweig et al., 2004). Las variables que explican una proporción importante de la variación en el rendimiento simulado son: el agua de los cultivos (la suma de las precipitaciones y el riego); y la temperatura durante la temporada de crecimiento. Las formas funcionales para cada región representan las condiciones realistas de limitación de agua y las condiciones potenciales para la mezcla de cultivos, alternativas de gestión, y la posible adaptación endógena al clima asumida en cada zona. Esta metodología: extiende los resultados de los modelos de cultivos basados en procesos a zonas amplias y por tanto supera la limitación de los requisitos de datos para los modelos de cultivos basados en procesos; incluye condiciones que están fuera del alcance de las observaciones históricas de los datos sobre rendimiento de los cultivos; e incluye simulaciones de gestión óptima y por tanto estima las respuestas agrícolas a los cambios en el clima regional. Una aplicación actual de esta metodología es el modelo clima-cultivo (Iglesias et al., 2011 (b)) que se ha desarrollado para la evaluación del impacto mundial del cambio climático. Figura 7-3 La figura 7-3 y la Figura 7-4 muestran la productividad de los cultivos y los cambios en las necesidades



de agua proyectados para este modelo utilizando la nueva generación de escenarios de Moss et al. (2010), A1B y E1. (véase el capítulo 4)

Figura 7-3: Cambios acumulados en la productividad de la tierra con el escenario A1B (modelos DMIEH5-4 y HADGEM-1) para la década de 2050

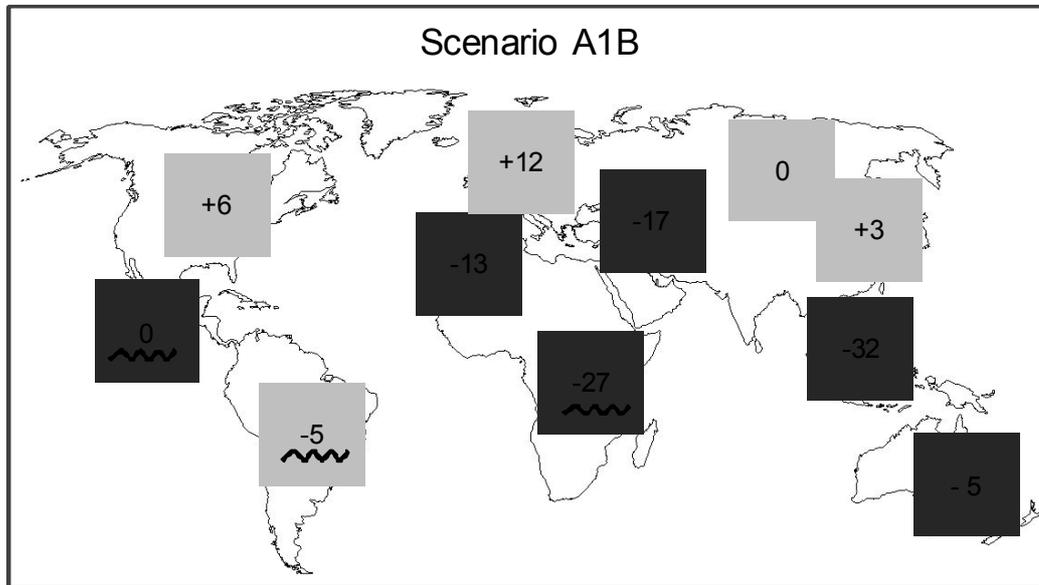
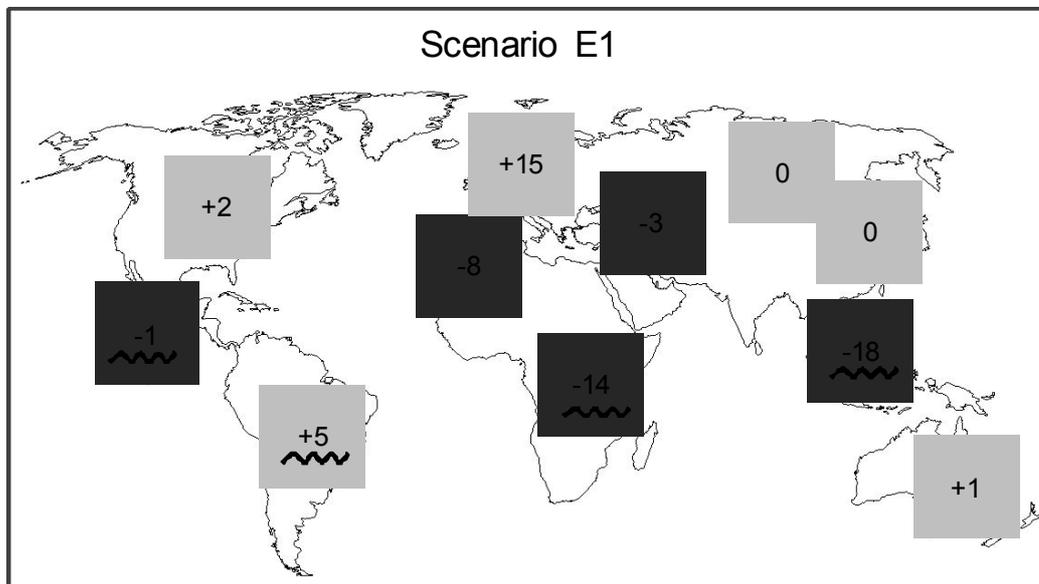


Figura 7-4: Cambios acumulados en la productividad de la tierra con el escenario E1 (DMICM3-1; E1: DMICM3-2; E1: HADGEM2-1) para la década de 2050



7.4.9 HERRAMIENTAS ECONÓMICAS

Los modelos económicos están diseñados para estimar los posibles efectos del cambio climático sobre la producción, el consumo, los ingresos, el PIB, el empleo y el valor de las explotaciones agrícolas. Sin embargo, puede que estos solo sean indicadores parciales del bienestar social. Puede que no todos los sistemas sociales, familias ni individuos (por ejemplo, los pequeños agricultores) estén adecuadamente representados en modelos que se basan en la teoría del productor y el consumidor. Muchos de los modelos económicos utilizados en los análisis de impacto hasta la fecha no tienen en cuenta las alteraciones inducidas por el clima en la disponibilidad de las tierras y el agua para irrigación, aunque se pueden incluir consideraciones tan importantes como estas. Los estudios y modelos basados en las economías de mercado presuponen el beneficio y la maximización de la utilidad.

Se han utilizado varios tipos de enfoques económicos para la evaluación del impacto agrícola. Los más útiles de ellos son los enfoques de predicción económica simples (por ejemplo: Benioff y Warren, 1996), que son predicciones basadas en un marco estructurado de información económica (producción, consumo y políticas reguladoras) y agrícola (técnicas de producción y cultivos alternativos). En general se trata de técnicas simples que se pueden usar en la mayoría de los estudios sobre el impacto del clima.

También se pueden utilizar los siguientes enfoques, aunque son relativamente complicados y pueden llevar tiempo, resultar difíciles y caros de aplicar.

Modelos económicos transversales. Una forma de análisis económico es el uso de análogos espaciales, es decir, patrones de cultivos en áreas con climas similares a los que pueden existir con el cambio climático. Este enfoque ricardiano se ha utilizado en una serie de aplicaciones (por ejemplo, Mendelsohn et al., 1994 y 1999). Los modelos económicos se pueden basar en relaciones estadísticas entre variables climáticas e indicadores económicos. Una ventaja del este enfoque es que la adaptación del agricultor a las condiciones climáticas locales se tiene en cuenta de manera implícita. Entre las desventajas está el hecho de que los precios de los alimentos y los precios de la producción de la finca se consideran como constantes, y que generalmente no se tienen en cuenta factores clave que determinan la producción agrícola, tales como la disponibilidad de agua y fertilización de carbono.

Modelos microeconómicos (a nivel de explotación agrícola). Los modelos microeconómicos se basan en el objetivo de maximizar el retorno económico de los insumos. Se diseñan para simular el proceso de toma de decisiones de un agricultor representativo en cuanto a los métodos de producción y asignación de la tierra, mano de obra, infraestructura existente y nuevo capital. Estos modelos de finca han sido desarrollados en la mayoría de los casos como herramientas para la planificación rural y la extensión agrícola, simulando los efectos de los cambios en los insumos (por ejemplo, fertilizantes, riego, créditos, habilidades de gestión) sobre la estrategia de la explotación (por ejemplo, la combinación de cultivos, el empleo). Tienden a optimizar los modelos económicos utilizando una programación lineal y requieren de datos bastante



específicos y habilidades analíticas avanzadas. Muchos toman una gama de tipos de explotación que representa a las que existen en una región y, para cada tipo, simulan la combinación de los cultivos e insumos que llevarían a maximizar los ingresos de la finca en ciertas condiciones. Las condiciones pueden ser varias (la variación del clima, los precios de los cultivos y los fertilizantes) y se puede modelar la respuesta apropiada de la explotación. Se pueden utilizar como información de entrada los cambios en el clima, en lugar de las variaciones meteorológicas, y se simula la respuesta a nivel de la explotación en cuanto a producción e ingresos.

Modelos domésticos y comunitarios. En las economías semi-comerciales puede ser más apropiado centrarse en las familias o en la comunidad como la unidad de respuesta. Aquí el objetivo puede ser asegurar un nivel mínimo de ingresos en vez de maximizar los ingresos. En estos casos, el análisis debe centrarse en las estrategias desarrolladas para reducir los efectos negativos de los cambios en el rendimiento de los cultivos en vez de en aumentar los positivos. Frecuentemente conocidas como estrategias de afrontamiento, han sido analizadas detalladamente en el contexto del riesgo de hambruna (normalmente relacionado con la sequía). Al igual que con los modelos de explotación agrícola, las evaluaciones del impacto climático que han incluido análisis eficaces de respuestas a nivel doméstico y comunitario, han tendido a utilizar la información de los estudios existentes, adaptándolos para tener en cuenta los cambios en el clima en lugar de las variaciones meteorológicas. Para ejemplos específicos de su uso en la evaluación del impacto climático en Kenia y la India, ver Akong'a et al., citado en Parry et al. (1998) y Jodha, citado en Gadgil et al. (1988). Para una discusión más general, ver Downing (1991).

Modelos macroeconómicos. Los modelos macroeconómicos pueden ser de una economía agrícola regional, nacional o global. A efectos del cambio climático, los modelos asignan el consumo doméstico y externo, así como la producción regional, basándose en perturbaciones concretas en la producción de cultivos, el abastecimiento de agua y la demanda de riego derivadas a partir de técnicas biofísicas. El crecimiento demográfico y las mejoras en la tecnología se establecen de manera exógena. Estos modelos miden la magnitud potencial de los impactos del cambio climático en el bienestar económico, tanto de productores como de consumidores de bienes agrícolas. Los cambios pronosticados en la producción y los precios para los modelos del sector agrícola podrán ser utilizados en modelos de equilibrio general de la economía a mayor escala. Adams et al. (1990) y Fischer et al. (2002) proporcionan ejemplos clave del uso de modelos macroeconómicos.

Modelos de equilibrio general. Los modelos de equilibrio general (GCE) representan el funcionamiento de la economía general desde una perspectiva de mercado. Los precios juegan un papel fundamental, ya que son el mecanismo a través del cual la economía a los golpes externos, como el cambio climático. Gracias a los cambios de precio, la oferta y la demanda se igualan en todos los mercados, adquiriéndose lo que se denomina un equilibrio general en la economía. Al mismo tiempo, se hace frente a las restricciones presupuestarias de los agentes económicos (por ejemplo, los ingresos familiares) en situación de equilibrio. Los modelos GCE globales tienen en cuenta los flujos del mercado internacional entre los países. El enfoque general de equilibrio ha



sido útil para entender las consecuencias económicas del cambio climático en la agricultura (Hertel, 1997; Stern, 2006; Quiroga e Iglesias, 2008; Iglesias et al., 2011 (a)).

Los cambios en la producción agrícola como consecuencia del cambio climático afectan al conjunto de la economía a través de una serie de mecanismos. En primer lugar, la reducción de la productividad de la tierra en el sector agrícola implica que se puede producir menos con los mismos insumos (por ejemplo, mano de obra). Esto llevaría a un aumento del precio de los bienes agrícolas, lo que a su vez originaría costes más altos en el sector, afectando entonces a los mercados de insumos. La reasignación de recursos afectará después al resto de los sectores económicos, por ejemplo por la subida de los salarios. Además, los cambios en la agricultura y los precios de los insumos afectarán a las decisiones de las familias en relación al consumo.

Cuadro 7-4: Descripción de GTAP

El Proyecto de Análisis del Comercio Mundial (GTAP) es una red global de investigadores y responsables políticos que lleva a cabo un análisis cuantitativo de temas de política internacional. El sistema de modelo de equilibrio general mundial de GTAP (Hertel, 1997; Brockmeier, 2000) está coordinado por el Centro de Análisis del Comercio Mundial del Departamento de Economía Agrícola de la Universidad de Purdue. La última versión del modelo se ha calibrado para el año 2004 y 2007 (base de datos GTAP 8), es decir, con una base de datos mundial que representa la economía mundial en 2004 y 2007. GTAP es un modelo multiregional de economía abierta que incluye a 128 regiones y 57 sectores.

Una ventaja de utilizar modelos GTAP para la evaluación agrícola es que se pueden explorar los vínculos entre las variables socioeconómicas (aumento de la población, progreso técnico) y los indicadores de seguridad alimentaria (producción de cultivos, abastecimiento de alimentos mundial) (Hertel, 1997; Conrad, 2001; Quiroga e Iglesias, 2008). El modelo incluye variables como las exportaciones e importaciones de cultivos y otros bienes agrícolas, el valor del PIB agrícola o los precios de los cultivos. La herramienta permite a los usuarios evaluar la respuesta del sistema de mercado a los golpes externos, como los efectos del cambio climático, incluidos los efectos intersectoriales indirectos.



GTAP y su manual están disponibles en:

<<https://www.gtap.agecon.purdue.edu/>>

7.4.10 INFORMACIÓN SOBRE CONJUNTOS DE DATOS

Los datos que estén o no disponibles afectarán al tipo de evaluación de impacto climático realizada, especialmente si el tiempo y los fondos son limitados. Los estudios sobre los efectos del cambio climático en la agricultura requieren una descripción cuantitativa de la unidad expuesta y las condiciones actuales (línea de partida) en el área estudiada. También se necesitan datos para proyectar las condiciones futuras (caso de referencia) en ausencia de cambio climático (por ejemplo, aumentos

proyectados en la tecnología agrícola o el uso de fertilizantes). Aunque los requisitos de datos específicos varían según el ámbito del estudio y el método seleccionados (que se tratarán en detalle más adelante), los grupos de datos generalmente necesarios y las posibles fuentes de datos se mencionan en ADAPTACIÓN .

Tabla 7-5: Resumen de los conjuntos de datos necesarios y posibles fuentes

Conjunto de Datos	Posibles fuentes	Comentarios
Fenología y rendimiento de cultivos experimentales	A nivel local, servicios experimentales y de extensión agrícola de la mayoría de las universidades agrícolas o ministerios de agricultura	Necesarios para calibrar los modelos agrícolas; dos años de datos son aceptables; se requieren datos asociados sobre gestión de cultivos
Rendimientos de los cultivos que se van a estudiar	A nivel local, servicios de extensión de la mayoría de los ministerios de agricultura	Series de tiempo para evaluar la variabilidad del rendimiento natural
Datos climáticos	Institutos meteorológicos; organizaciones internacionales (como la FAO y Administración Nacional Oceánica y Atmosférica)	Requieren series de tiempo para evaluar la variabilidad del clima natural y desarrollar escenarios
Características del suelo	Ministerio de agricultura; organizaciones internacionales (como la FAO).	Incluye la profundidad y textura del suelo para evaluar la capacidad de retención de agua del suelo
Producción (estadísticas tanto regionales como nacionales)	A nivel regional, anuarios agrícolas de los ministerios de agricultura; organizaciones internacionales	Requieren series de tiempo para evaluar la variabilidad de la producción natural
Gestión de cultivos	A nivel local y regional, servicios de extensión de los ministerios de agricultura; organizaciones internacionales; consulta a los actores clave	Incluye fechas de siembra de cultivos, variedades de cultivos, mano de obra, insumos de fertilizantes y riego
Uso de la tierra	Mapas o imágenes digitales de los ministerios de agricultura o medio ambiente; datos satelitales de las organizaciones internacionales	Son necesarios datos geográficamente explícitos para posibilitar la extrapolación espacial desde los lugares de muestreo a toda el área de

		estudio
Datos socioeconómicos generales	Ministerio de agricultura; organizaciones internacionales; consulta a los actores clave (incluidas las mujeres)	Incluir desde la contribución de la producción agrícola de los lugares de muestreo hasta el resultado total del área de estudio, porcentaje de mano de obra en el sector agrícola
Otros	Consulta a los actores clave (incluidas las mujeres)	Pueden ser necesarios datos adicionales para estudios específicos (por ejemplo, necesidades de riego, tasas de degradación y erosión del suelo)

7.5 EVALUACIONES INTEGRADAS

Una característica común de los diferentes enfoques de la evaluación del impacto climático es que todos tienen una dimensión geográfica. El clima y sus efectos varían en relación al espacio, y este patrón de variación probablemente cambia a medida que el clima cambia. Estos aspectos son de importancia fundamental para los responsables de formular políticas que operan a escala regional, nacional o internacional, debido a que los cambios en los patrones de recursos pueden afectar la equidad regional, con las consiguientes implicaciones para la planificación. Así, el análisis geográfico de los cambios climáticos y sus impactos, donde los resultados se presentan en forma de mapas, ha recibido una creciente atención en los últimos años. Esta tendencia ha venido acompañada por el rápido desarrollo de los GIS, que pueden ser utilizados para almacenar, analizar, unir y representar la información espacial. Con la mejora de las capacidades de los sistemas informáticos, ha aumentado también la factibilidad de realizar estudios de modelos detallados a escala regional. La limitación principal está en la disponibilidad de datos detallados para grandes extensiones; no obstante, las sofisticadas técnicas de interpolación estadística y la aplicación de generadores estocásticos del clima para proporcionar datos climatológicos artificiales en una alta resolución temporal pueden ofrecer soluciones parciales. Un ejemplo de herramienta de evaluación integrada de GIS para la vulnerabilidad y la evaluación agrícola es el modelo AEZ de la FAO (FAO, 1996 y 2002).

7.6 ADAPTACIÓN

7.6.1 PLANIFICACIÓN

Históricamente, la agricultura ha mostrado una considerable habilidad para adaptarse a condiciones cambiantes, ya sean de alteraciones en la disponibilidad de recursos, en la tecnología o en la economía. Muchas adaptaciones ocurren de forma autónoma y sin la necesidad de una respuesta consciente por parte de agricultores y planificadores agrícolas. No obstante, es probable, al menos en algunas partes del mundo y especialmente en los países en desarrollo, que la velocidad y la magnitud del cambio climático excedan a las del cambio normal en la agricultura. En consecuencia, será necesario adoptar tecnologías y estilos de gestión específicos para evitar los efectos más graves. En lo posible, los ajustes en las respuestas deben ser identificados junto con sus costes y beneficios. Hay mucho que ganar de la evaluación de la capacidad que existe en la tecnología actualmente disponible y la capacidad potencial que puede desarrollarse en el futuro.

Aunque la mayoría de las adaptaciones al cambio climático se caracterizarán en última instancia por respuestas a nivel de explotación agrícola, la estimulación de respuestas por parte de la política afecta a la velocidad y al alcance de la adopción. El tiempo necesario para aplicar las medidas de adaptación varía considerablemente, en función de la escala, el coste, los recursos y capacidades necesarios para aplicar la medida y las barreras que se deban superar. En el presente documento se toman en consideración dos tipos generales de adaptación: a nivel de explotación agrícola y a nivel de políticas. La adaptación a nivel de explotación agrícola incluye cambios en los cultivos o en la gestión de los mismos. **Tabla 7-6** La Tabla 7.11 presenta ejemplos de medidas de adaptación a nivel de explotación agrícola que pueden evaluarse con las herramientas mencionadas en este capítulo. Todas las medidas pueden contribuir a la adaptación al cambio climático, pero en muchos casos pueden tener efectos negativos imprevistos que deben evaluarse cuidadosamente, como medidas de adaptación que pueden parecer efectivas a corto plazo, pero limitan las opciones de adaptación en el futuro (Barnett y O'Neill, 2009). La adaptación a nivel de políticas puede crear sinergias con las respuestas de los agricultores, especialmente en países donde la educación de la población rural es limitada. La investigación para probar la fuerza de estrategias agrícolas alternativas y el desarrollo de nuevas variedades de cultivos también están entre las medidas políticas potencialmente efectivas.

Tabla 7-6: Ejemplos de medidas de adaptación a nivel de explotación agrícola, acciones para aplicarlas y posibles resultados (Iglesias et al., 2007 (a))

Medida	Acción	Resultado potencial
--------	--------	---------------------



Elección del cultivo	Uso de variedades resistentes a la sequía o al calor	Menor riesgo de pérdida de rendimiento y reducción de la necesidad de riego
	Uso de variedades resistentes a las plagas	Reducción de pérdida de las cosechas cuando las condiciones climáticas son favorables a la proliferación de malas hierbas y plagas
	Uso de variedades de maduración más rápida (o más lenta)	Asegura la maduración en una temporada de crecimiento acortada por la reducción de la humedad o de los recursos termales; maximización de rendimientos en temporadas largas de crecimiento.
	Alterar la mezcla de cultivos	Reducción de la variabilidad de producción
Labranza y tiempo de las operaciones	Cambio de la fecha de siembra	Coincidencia con los patrones alterados de precipitación
	Terraplenar, hacer terrazas	Aumento de la humedad disponible para las plantas
	Nivelación de la tierra	Difusión del agua y aumento de la filtración
	Reducción de la labranza	Menor pérdida de materia orgánica del suelo, menor erosión del suelo y menos pérdida de nutrientes
	Aradura profunda	Perforación de capas impermeables para aumentar la filtración
	Cambio de las prácticas de abono y barbecho	Retención de humedad y materia orgánica
	Alterar los cultivos	Reducción de la invasión de malas hierbas
	Cambio de las temporadas de cosecha	Evitar los efectos del aumento de la sequía en verano (por ejemplo, si se cambia de cultivos de primavera a cultivos de invierno)
Buenas prácticas agrícolas	Alteración del espacio entre filas y plantas	Las raíces crecen más hacia el agua del suelo



	Siembra intercalada	Menor variabilidad del rendimiento, maximización de uso de la humedad
Irrigación y recogida de agua	Introducción de nuevos sistemas de irrigación en zonas de tierras secas	Evitar pérdidas debido a la sequía
	Mejora de la eficacia del riego	Evitar la falta de humedad en las plantas
	Recogida de agua	Aumento de la humedad disponible
Uso de agroquímicos	Variar las cantidades aplicadas de fertilizantes	Aumentar el nitrógeno para mejorar el rendimiento si hay más agua disponible, o reducirlo para minimizar los costes de inversión
	Alterar el tiempo de aplicación	Por ejemplo, ajustar la aplicación a los patrones de precipitación alterados
	Variar la cantidad de control químico	Evitar daños por plagas, malas hierbas y enfermedades

Iglesias et al. (2011(c), 2007(b)) presentan una evaluación en términos de beneficios potenciales, viabilidad técnica y costes potenciales para una serie de posibles opciones de adaptación estudiadas, no solo para afrontar los riesgos del cambio climático, sino para que se puedan explotar las posibles oportunidades. **Tabla 7-7** La tabla 7-12 muestra una evaluación de las posibles opciones de adaptación para responder a los riesgos y oportunidades identificados. El nivel de aplicación, la categoría de opción y la información sobre la escala temporal (urgencia), dificultad técnica, coste potencial y posibles beneficios se establecen para cada opción posible de adaptación. La discusión de la tabla se divide a grandes rasgos en los riesgos, las medidas y las oportunidades identificados: distribución por zonas y productividad de los cultivos; inundaciones, sequía, escasez de agua y riego, calidad del agua, glaciares y permafrost, subida del nivel del mar, plagas y enfermedades, y ganado. La tabla sintetiza los resultados en una simple proporción cuantitativa del esfuerzo (promedio de escala temporal, coste potencial y dificultad técnica) frente al beneficio (posible) de diferentes medidas de adaptación para todos los riesgos y oportunidades identificados.

Tabla 7-7: Medidas de adaptación a los riesgos y oportunidades del cambio climático

CLAVE: (1) nivel de finca (F): nivel de política (P) – (2) técnica (T): gestión (MA): infraestructura (I) – (3) corto plazo (ST), medio plazo (MT) o largo plazo (LT) – (4) (5) (6) bajo/a (L), medio/a (M) o alto/a (H)

Riesgo / Medida	Nivel (1)	Categoría (2)	Escala de tiempo (3)	Dificultad técnica (4)	Coste potencial (5)	Beneficios potenciales (6)
Todos los riesgos						
Aplicar planes regionales de adaptación	P	MA	LT	H	M	H
Servicios de asesoría	P	MA	MT	M	M	H
Investigación: tecnología y biotecnología	P	MA	LT	H	H	H
Investigación: eficiencia del uso del agua	P	MA	MT	M	M	H
Investigación: gestión y planificación	P	MA	ST	M	L	H
Seguro	P	MA	MT	M	H	H
1. Alteración de la distribución por zonas y menor productividad de los cultivos						
Cambio de los cultivos y los patrones de cultivo	F	MA	ST	L	M	M
Cambio de las prácticas de cultivo	F	MA	MT	M	M	M
Aumento del uso de agroquímicos	F	MA	ST	L	M	L
Introducción de nuevas zonas de riego	P	MA	LT	H	H	H

Desarrollo de cultivos resistentes al cambio climático	P	T	LT	H	H	M
Diversificación del sustento	P	MA	MT	M	H	M
Traslado de la industria de procesamiento agrícola	P	MA	LT	H	H	H
2. Aumento del riesgo de inundaciones						
Crear/Recuperar los humedales	F	I	LT	H	H	M
Mejorar la gestión de las llanuras aluviales	F	MA	MT	H	H	H
Mejorar los sistemas de drenaje	F	I	LT	M	L	M
Reducir la presión del pastoreo para proteger contra la erosión del suelo	F	MA	MT	M	H	L
Adición de materia orgánica a los suelos	F	MA	ST	L	M	L
Incentivar a los agricultores para que sean custodios de las llanuras aluviales	P	MA	LT	M	H	H
Obras de defensa	P	I	LT	H	H	H
Aumentar a capacidad de interceptación del agua de lluvia (depósitos)	P	I	MT	M	M	H

3. Aumento del riesgo de sequía y escasez de agua

4. Aumento de la necesidad de riego adicional



Capítulo 7: Agricultura

Introducción de cultivos resistentes a la sequía	F	MA	LT	H	M	M
Traslado de cultivos de las zonas vulnerables	F	MA	LT	H	H	M
Mejora de la capacidad de retención de humedad del suelo	F	T	MT	M	M	L
Mayor eficiencia del uso de agua para riego	F	T	MT	M	M	H
Depósitos de agua a pequeña escala en las tierras de labranza	F	I	MT	M	M	H
Sistemas de riego avanzados	F	T	MT	M	H	H
Mejora de la capacidad de los depósitos	P	I	LT	H	H	H
Reutilización del agua	P	I	MT	H	H	H
Mejora de los precios y el comercio del agua	P	MA	LT	H	H	H
Introducción de auditorías de agua	P	MA	LT	H	L	H
Renegociación de los acuerdos de abstracción del agua subterránea	P	MA	LT	H	H	H
Establecer prioridades claras sobre el uso del agua	P	MA	LT	H	L	H



5. Deterioro de la calidad del agua

Mejora de la eficiencia de la fertilización con nitrógeno	F	MA	ST	L	L	L
-----------------------------------------------------------	---	----	----	---	---	---

Instrumentos para arar y airear la tierra	F	T	MT	L	M	L
-------------------------------------------	---	---	----	---	---	---

Desarrollar fertilizantes menos contaminantes	P	T	LT	M	L	H
-----------------------------------------------	---	---	----	---	---	---

6. Deterioro de la calidad de los suelos y desertificación

Introducción de agricultura de precisión	F	MA	LT	M	H	M
------------------------------------------	---	----	----	---	---	---

Gestión del carbono del suelo y ausencia de labranza	F	T	MT	M	M	M
------------------------------------------------------	---	---	----	---	---	---

7. Pérdida de los glaciares y alteración del permafrost

Captación de agua y sistemas de almacenamiento	P	I	LT	M	H	H
------------------------------------------------	---	---	----	---	---	---

Mejor mantenimiento y estructura de los edificios e infraestructuras	P	I	LT	M	H	M
----------------------------------------------------------------------	---	---	----	---	---	---

8. Intrusión del aumento del nivel del mar en las zonas costeras agrícolas

Cultivos alternativos	F	MA	MT	M	M	L
-----------------------	---	----	----	---	---	---

Mejorar los sistemas de drenaje	F	I	LT	M	H	H
---------------------------------	---	---	----	---	---	---

Obras de defensa	P	I	LT	H	H	H
------------------	---	---	----	---	---	---

Gestión de la intrusión de agua	P	MA	LT	H	H	H
---------------------------------	---	----	----	---	---	---



salada						
Reservar tierras como zonas de protección	P	MA	LT	H	H	H
9. Mayor riegos de plagas, enfermedades agrícolas y malas hierbas						
Aplicación adicional de pesticidas	F	MA	ST	L	L	L
Introducción de variedades resistentes a los pesticidas	F	MA	ST	M	H	M
Uso de depredadores naturales	F	MA	ST	M	M	L
Vacunar al ganado	F	MA	ST	L	M	L
Mejora del seguimiento	P	I	LT	H	M	H
Desarrollo de una estrategia de pesticidas sostenibles	P	MA	LT	M	M	L
10. Deterioro de las condiciones de la ganadería						
Cambio de las especies/razas a otras más tolerantes al calor	F	MA	LT	H	M	M
Cambio del régimen de pastoreo	F	MA	ST	L	L	L
Cambio de la composición de los pastos	F	MA	ST	L	L	L
Alimentación complementaria al pasto	F	MA	ST	L	M	L
Cambio del tiempo de	F	MA	MT	H	M	M



operaciones y de cría						
Aumento del refugio y la protección contra el calor	F	I	LT	M	H	M
Todas las oportunidades						
Aplicar planes regionales de adaptación	P	MA	LT	H	M	H
Servicios de asesoría	P	MA	MT	M	M	H
Investigación: tecnología y biotecnología	P	MA	LT	H	H	H
Investigación: eficiencia del uso del agua	P	MA	MT	M	M	H
Investigación: gestión y planificación	P	MA	ST	M	L	H
Cambio a variedades más productivas	F	T	MT	M	M	M
Mejora de la diversificación del los cultivos	F	T	LT	M	M	M
Ampliación de la ganadería a otras zonas	F	T	MT	M	H	M
Aumentar la tasa de abastecimiento	F	MA	ST	L	M	L
Disminuir la climatización en los invernaderos	F	T	ST	L	L	H
Introducir climatización geotérmica	F	T	ST	M	M	M

7.6.2 INTEGRACIÓN

En la evaluación del impacto del cambio climático en el sector agrícola es importante tener en cuenta cómo los cambios en otros sectores pueden contribuir también a los efectos observados en el sector agrícola (Tabla 7-7). Por ejemplo, los impactos en la costa pueden tener continuación en el sector agrícola, si la subida del nivel del mar afecta a la disponibilidad de tierras para la agricultura, o aumenta la salinidad de las tierras de cultivo.

Aunque que el impacto y la planificación de la adaptación se debaten a nivel de cada sector, es importante tener en cuenta las relaciones entre los sectores y cómo éstas pueden influir en la priorización general de los riesgos y en la planificación de la adaptación. Dicha evaluación intersectorial se conoce como "integración". El objetivo de la integración es entender las interrelaciones entre los riesgos específicos de cada sector para establecer prioridades de adaptación.

Esto puede ser importante para que los responsables de formular políticas y otros actores clave comprendan cómo un sector, una comunidad, una región o una nación podrían verse afectados en total por el cambio climático, y cuál puede ser el impacto económico total. También puede ser importante conocer cómo comparar diferentes sectores, regiones o poblaciones en términos de vulnerabilidad relativa para ayudar a establecer prioridades para la adaptación.

Hay básicamente dos enfoques para integrar la adaptación en la agricultura, la silvicultura y la pesca. El primero es utilizar modelos de evaluación integrados, como los descritos en el apartado 7.5 que toman explícitamente una perspectiva integrada espacialmente. El segundo enfoque es intentar comparar de manera transversal los resultados de una serie de evaluaciones centradas geográficamente, o evaluaciones de cultivos específicos, en un panorama coherente de prioridades y acciones de adaptación. Como se menciona en el apartado, los enfoques combinados suelen ser los mejores, y como tales, se deben pensar cuidadosamente los métodos para integrar sus resultados, incluido el análisis de criterios múltiples o herramientas basadas en la economía.

El capítulo 9 de estos materiales de formación proporciona más información sobre la integración de la evaluación del impacto y los resultados de adaptación.

7.6.3 INCORPORACIÓN

La incorporación se define como el proceso de incorporar los problemas climáticos y las respuestas de adaptación a las correspondientes políticas, planes, programas y proyectos a escala nacional, sub-nacional y local (USAID, 2007). Las medidas de adaptación no se suelen aplicar únicamente en respuesta al cambio climático, sino que frecuentemente logran otros beneficios de desarrollo. Cuando se elabora el informe de



comunicación nacional, es importante considerar cómo se van a incorporar los resultados en el país para que ocurra un cambio significativo.

El marco de incorporación del PNUD perfila tres componentes para la incorporación efectiva del cambio climático:

- Encontrar los puntos de partida y exponer las razones;
- Incorporar la adaptación a los procesos de formulación de políticas;
- Afrontar el reto de la aplicación.

En el capítulo 9 de este recursos se proporciona más información acerca de la integración.

7.6.4 CONTROL Y EVALUACIÓN

Una cuestión clave a la hora de aplicar opciones de adaptación es cómo controlar y evaluar la efectividad de la adaptación. Por suerte, una serie de organizaciones, incluido el PNUD y el Banco Mundial, trabajan para desarrollar enfoques prácticos de control y evaluación de la adaptación al cambio climático, aplicando "marcos basados en resultados" integrados en el contexto más amplio de la efectividad de la ayuda.

Algunos problemas a considerar en el diseño del control y la evaluación de la adaptación son (Kay et al., en preparación):

- Orientación a los resultados: ¿qué se quiere conseguir exactamente con la acción de adaptación?
- Contexto de decisión: ¿por qué se eligió esa acción de adaptación, quizá para centrarse en prioridades inmediatas de salud para reducir la vulnerabilidad o en efectos del cambio climático a más largo plazo? y ¿cuáles son las barreras, limitaciones y oportunidades que influyen en el éxito de su aplicación?
- Consideraciones espaciales: ¿a qué escala tendrá impacto la acción de adaptación?
- Consideraciones temporales: ¿Cuándo se conocerá el impacto de una acción de adaptación?

Estas son consideraciones importantes que también pueden ayudar en la planificación general de acciones de adaptación en relación con las zonas costeras, así como proporcionar un foco para asegurar que las acciones específicas elegidas durante el proceso de planificación son las más efectivas.



Existen cuatro pasos clave en el control y la evaluación para el propósito específico de informar de la aplicación de las prioridades de adaptación identificadas en las comunicaciones nacionales:

- Establecer un marco de control y evaluación;
- Desarrollar un plan de evaluación;
- Llevar a cabo la evaluación;
- Comunicar los resultados.

En el capítulo 9 se proporcionan más directrices para el control y la evaluación de la adaptación.

7.7 BIBLIOGRAFÍA

- Adams RM, Rosenzweig C, Peart RM, Ritchie JT, McCarl BA, Glycer JD, Curry RB, Jones JW, Boote KJ y Allen LH. 1990. Global climate change and US agriculture. *Nature*. 345: pp.219–224.
- Alexandratos N. 2005. Countries with rapid population growth and resources constraints: issues of food, agriculture and development. *Popul. Dev. Rev.* 31. pp. 237–258.
- Badini O, Stöckle CO and Franz EH. 1997. Application of crop simulation modeling and GIS to agroclimatic assessment in Burkina Faso. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 64: pp. 233–244.
- Barnett J y O'Neill S. 2009. Maladaptation: Editorial. *Global Environmental Change*. 20: pp. 211–213.
- Benioff R y Warren J (eds.). 1996. *Steps in Preparing Climate Change Action Plans: A Handbook*. Washington DC: Country Studies Program de los Estados Unidos.
- Boogaard HL, van Diepen CA, Rötter RP, Cabrera JMCA, y van Laar HH. 1998. *User's Guide for the WOFOST 7.1 Crop Growth Simulation Model and WOFOST Control Center 1.5*. Technical Document 52. DLO-Winand Staring Centre, Wageningen.
- Brockmeier M. 2000. *Impact of Agenda 2000 on Poland's Integration with the EU Integration Scenarios – Report I*. For PHARE PL 9607-01-24, Development of Analytical Capacity in the Area of Agri-Food Product Markets, (Component B), Varsovia. (trabajo sin publicar).
- Carter TR. y Saarikko RA. 1996. Estimating regional crop potential in Finland under a changing climate. *Agricultural and Forest Meteorology*. 79(4): pp. 301–313.
- Conrad K. 2001. Computable general equilibrium models in environmental and resource economics. En: T Tietenberg y H Folmer (eds.). *The international yearbook of environmental and resource economics*. 2002/2003. pp. 66–114.
- Downing, Thomas E. 1991. "Vulnerability to hunger in Africa: a climate change perspective," *Global Environmental Change*, Vol. 1:5: pp. 365-380
- Easterling WE, Aggarwal PK, Batima P, Brander KM, L. Erda L, Howden SM, Kirilenko A, Morton J, Soussana JF, Schmidhuber J y Tubiello FN. 2007: Food, fibre and forest products. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the*



- Intergovernmental Panel on Climate Change*. ML Parry, OF Canziani, JP Palutikof, PJ van der Linden and CE Hanson (eds.). Cambridge: Cambridge University Press. pp. 273–313.
- FAO. 2011 (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). Programa marco sobre adaptación al cambio climático.
- FAO. 2006. *World Agriculture: Towards 2030/2050 – Interim Report: Prospects for Food, Nutrition, Agriculture and Major Commodity Groups*. Roma: FAO. 78 pp.
- FAO. 2004. FAOCLIM, un CD-ROM que contiene datos agroclimáticos de todo el mundo. Disponible en <http://www.fao.org/sd/2001/EN1102_en.htm>.
- FAO. 2002. *Global Agro-ecological Assessment for Agriculture in the Twenty-First Century* [CD-ROM]. FAO Land and Water Digital Media Series Number 21. ISBN 9251048525.
- FAO. 1996. Zonificación agro-ecológica. Guía general *Boletín de suelos de la FAO* 73. Servicio de Recursos, Manejo y Conservación de suelos. Dirección de Fomento de Tierras y Aguas, FAO.
- Foley, J.A., DeFries, R., Asner, G.P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S.R., Chapin, F.S., Coe, M.T., Daily, G.C., Gibbs, H.K., Helkowski, J.H., Holloway, T., Howard, E.A., Kucharik, C.J., Monfreda, C., Patz, J.A., Prentice, I.C., Ramankutty, N. y Snyder, P.K. 2005. Global consequences of land use. *Science* 309: pp. 570-574.
- Fischer G, Shah M y van Velthuisen H. 2002. *Climate Change and Agricultural Vulnerability*. Viena: International Institute of Applied Systems Analysis.
- Gadgil S, Huda AKS, Jodha NS, Singh RP y Virmani SM. 1988. The effects of climatic variations on agriculture in dry tropical regions of India. *En*: ML Parry, TR Carter y NT Konijn (eds.). *Assessments in Semi-Arid Regions*, Volume 2 of *The Impact of Climatic Variations on Agriculture*. Dordrecht, Países Bajos: Kluwer Academic Publishers. pp. 495–521.
- Hansen JW y Jones JW. 2000. Scaling-up crop models for climate variability applications. *Agricultural Systems*. 65: pp. 43–72.
- Hazell P y Wood S. 2007. Drivers of change in global agriculture. *Philosophical Transactions of The Royal Society B: Biological Sciences*. 363(1491): pp. 495–515
- Hertel TW. 1997. *Global Trade Analysis: Modelling and Applications*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Holden NM. 2001. *Agro-Meteorological Modeling – Principles, Data and Applications*. Dublín: Agmet.



- Iglesias A, Garrote L, Quiroga S y Moneo M. 2011a. A regional comparison of the effects of climate change on agriculture in Europe. *Climatic Change*.
- Iglesias A, Mougou R, Moneo M, y Quiroga S. 2011b. Towards adaptation of agriculture to climate change in the Mediterranean. *Regional Environmental Change*. 11: pp.159–166.
- Iglesias A, Moneo M, Quiroga S y Garrote L. 2011c. Re-thinking adaptation priorities to climate change for agriculture in Europe. *Climatic Change*.
- Iglesias A y Quiroga S. 2007. Measuring the risk of climate variability to cereal production at five sites in Spain. *Climate Research*. 34: pp. 45–57.
- Iglesias A, Avis K, Benzie M, Fisher P, Harley M, Hodgson N, Horrocks L, Moneo M y Webb J. 2007a. *Adaptation to Climate Change in the Agricultural Sector*. Informe para la Dirección General de Agricultura y Desarrollo Rural de la Comisión Europea.
- Iglesias A, Garrote L, Flores F y Moneo M. 2007b. Challenges to manage the risk of water scarcity and climate change in the Mediterranean. *Water Resources Management*. 21(5): pp. 227–288.
- Iglesias A, Rosenzweig C y Pereira D. 2000. Agricultural impacts of climate in Spain: developing tools for a spatial analysis. *Global Environmental Change*. 10: pp. 69–80.
- Kay RC, Haines A, Rosenzweig C, Steffen W y Thom B. En preparación. Perspectives on Adaptation Effectiveness. En: Jean Palutikof, Martin Parry y Sarah Boulter et al. (eds.). *Climate Adaptation Futures*.
- Lobell DB y Burke MB. 2010. On the use of statistical models to predict crop yield responses to climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*. 150 (11): pp. 1443–1452.
- Lobell DB, Ortiz-Monasterio JI y Falcon WP. 2007. Yield uncertainty at the field scale evaluated with multi-year satellite data. *Agricultural Systems*, 92: pp. 76–90.
- Lepers E, Lambin EF, Janetos AC, de Fries R, Achard F, Ramankutty N y Scholes RJ. 2004. A synthesis of information on rapid land-cover change for the period 1981–2000. *BioScience*. 55: pp. 115–124.
- Long S, Ainsworth EA, Leakey ADB, Nösberger J y Ort DR. 2006. Food for thought: lower-than-expected crop yield stimulation with rising CO₂ concentrations. *Science*. 3(12): pp. 1918–1921.

- Mendelsohn R, Nordhaus W y Shaw D. 1994. The impact of global warming on agriculture: A Ricardian analysis. *American Economic Review*. 84(4): pp. 753–771.
- Mendelsohn R, Nordhaus W y Shaw D. 1999. The impact of climate variation on US agriculture. *En: R Mendelsohn y J Neumann (eds.). The Impacts of Climate Change on the U.S. Economy*. Cambridge, Reino Unido: Cambridge University Press. pp. 55–93.
- Moss RH, Edmonds JA, Hibbard KA, Manning MR, Rose SK, van Vuuren DP, Carter TR, Emori S, Kainuma M, Kram T, Meehl GA, Mitchell JFB, Nakicenovic N, Riahi K, Smith SJ, Stouffer RJ, Thomson AM, Weyant JP y Wilbanks TJ. 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463: pp. 747–756.
- Parry M y Carter T. 1998. *Climate Impact and Adaptation Assessment: A Guide to the IPCC Approach*. Londres: Earthscan.
- Parry, M.L., C. Rosenzweig, A. Iglesias, M. Livermore, y Fischer G. 2004. Effects of climate change on global food production under SRES emissions and socio-economic scenarios. *Global Environment Change*, 14: pp. 53-67
- Porter JR y Semenov MA. 2005. Crop responses to climatic variability. *Philosophical Transactions of the Royal Society. B*. 360(1463): pp. 2021–2035.
- Quiroga S e Iglesias A. 2008. Projections of economic impacts of climate change in agriculture in Europe. *Economía Agraria y Recursos Naturales*. 7(14): p. 65-82.
- Quiroga S e Iglesias A. 2009. A comparison of the climate risks of cereal, citrus, grapevine and olive production in Spain. *Agricultural Systems*. 101. pp. 91–100.
- Rosenzweig C e Iglesias A (eds.). 1994. *Implications of Climate Change for International Agriculture: Crop Modeling Study*. EPA 230-B-94-003. Washington DC: Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos.
- Rosenzweig C e Iglesias A. 1998. The use of crop models for international climate change impact assessment. *En: GY Rosenzweig, CK Strzepek, D Major, A Iglesias, D Yates, A Holt y D Hillel. 2005. Understanding Options for Agricultural Production. Water availability for agriculture under climate change: Five international studies. Global Environmental Change*.
- Rosenzweig C, Iglesias A, Fischer G, Liu Y, Baethgen W y Jones JW. 1999. Wheat yield functions for analysis of landuse change in China. *Environmental Modeling and Assessment*. 4: pp. 128–132.

- Rosenzweig, C., K.M. Strzepek, D.C. Major, A. Iglesias, D.N. Yates, A. McCluskey, y D. Hillel, 2004: Water resources for agriculture in a changing climate: International case studies. *Global Environmental Change*, 14: pp. 345-360
- Rotter, R.P., Carter, T.R. Olesen, J.E. y Porter, J.R. .2011. Crop-climate models need an overhaul. *Nature Climate Change* 1: pp. 175–177.
- Sharpley AN y Williams JR. 1990. EPIC – Calculador de Impacto Erosión-Productividad 1. Documentación del modelo. Boletín Técnico nº 1768 del US Department of Agriculture.
- Steduto P, Hsiao TC, Raes D y Fereres E. 2009. AquaCrop–The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: I. Concepts and Underlying Principles. *Agronomy Journal*. (101). pp. 426–437.
- Stern, N., S. Peters, V. Bakhshi, A. Bowen, C. Cameron, S. Catovsky, D. Crane, S.Cruickshank, S. Dietz, N. Edmonson, S.-L. Garbett, L. Hamid, G. Hoffman, D. Ingram, B. Jones, N. Patmore, H. Radcliffe, R. Sathiyarajah, M. Stock, C. Taylor, T. Vernon, H. Wanjie, y D. Zenghelis (2006), Stern Review: The Economics of Climate Change, HM Treasury, Londres.
- Supit I, Hooijer AA y van Diepen CA (eds.). 1994. *System Description of the WOFOST 6.0 Crop Simulation Model Implemented in CGMS*. Volume 1: Theory and Algorithms. EUR 15956. Luxemburgo: Oficina de Publicaciones Oficiales de las Comunidades Europeas.
- USAID (Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional). 2009. *Adapting to Climate Variability and Change: A Guidance Manual for Development Planning*. Disponible en <http://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PNADJ990.pdf >