

EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA PRODUCCION Y RENDIMIENTO DE CULTIVOS POR SECTORES

EVALUACION DEL RIESGO AGROCLIMÁTICO POR SECTORES

Marzo de 2013

FONDO FINANCIERO DE PROYECTOS DE DESARROLLO – FONADE E INSTITUTO DE
HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES – IDEAM.

Mery Esperanza Fernández



Contrato de Cooperación CO- T1150
Mery Esperanza Fernández
FONDO FINANCIERO DE PROYECTOS DE DESARROLLO – FONADE
INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES – IDEAM
Apoyo a la Agenda colombiana de adaptación al cambio climático
Evaluación del riesgo agroclimático por sectores



Contenido

I.	INTRODUCCION.....	6
II.	GENERALIDADES DEL CAMBIO CLIMATICO.....	8
III.	Revisión bibliográfica.....	14
1)	Estudios sobre el uso de herramientas y metodologías agroclimáticas y análisis de Cambio climático en Latinoamérica.....	17
2)	Estudios sobre el uso de herramientas agroclimáticas y análisis de Cambio climático en Colombia.....	21
IV.	Impacto del Cambio Climático en el sector agropecuario.....	26
1)	Sector agrícola en Colombia.....	29
2)	Adaptación al cambio climático y acciones de mitigación.....	32
V.	DESCRIPCION DE MODELOS AGROMETEOROLOGICOS.....	33
1)	Modelación de cultivos.....	33
1.	MODELO DNDC.....	34
2.	DSSAT.....	35
3.	APSIM - Agricultural Production Systems Simulator.....	36
4.	CROPWAT.....	36
5.	CROPSYST.....	37
6.	WOFOST.....	38
7.	AQUACROP.....	40
8.	MODELO ET0 CALCULATOR.....	42
9.	SIMPROC.....	42
10.	AMBER.....	44
11.	BEKLIMA.....	45
VI.	BIBLIOGRAFÍA.....	47



Contrato de Cooperación CO- T1150
Mery Esperanza Fernández
FONDO FINANCIERO DE PROYECTOS DE DESARROLLO – FONADE
INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES – IDEAM
Apoyo a la Agenda colombiana de adaptación al cambio climático
Evaluación del riesgo agroclimático por sectores

EVALUACION DEL RIESGO AGROCLIMÁTICO POR SECTORES

EFFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA PRODUCCION Y RENDIMIENTO DE CULTIVOS POR SECTORES

PRIMER INFORME: ESTADO DEL ARTE SOBRE LA AGRICULTURA Y EL CAMBIO CLIMATICO

CONTRATO DE COOPERACIÓN TÉCNICA CO-T1150

CONTRATO FONADE DE PRESTACION DE SERVICIOS No. 2130628

MERY ESPERANZA FERNANDEZ PORRAS

MARZO DE 2013



EFFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA PRODUCCION Y RENDIMIENTO DE CULTIVOS POR SECTORES

En el marco de la agenda colombiana de adaptación al cambio climático se suscribió un acuerdo de cooperación entre FONADE y el IDEAM cuyo objetivo es la evaluación del riesgo agroclimático por sectores el cual asocia su objetivo al componente 4 de la mencionada agenda. Dicho acuerdo se ampara bajo el contrato No. 2130628 cuyo objetivo es determinar los efectos del cambio climático en la producción y rendimientos de cultivos agrícolas seleccionados, mediante la utilización de modelos agroclimáticos.

El presente informe contiene los resultados de revisiones bibliográficas sobre las relaciones de cambio climático y la agricultura, la descripción de los modelos más relevantes utilizados en diferentes países y de un análisis de las bondades y limitaciones de cada uno para la posibilidad de aplicación por parte del IDEAM.



DETERMINACIÓN DE LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA PRODUCCIÓN Y RENDIMIENTO DE CULTIVOS AGRÍCOLAS SELECCIONADOS, MEDIANTE UTILIZACIÓN DE MODELOS AGROCLIMÁTICOS

Objetivo general

Determinar los efectos del cambio climático en la producción y rendimientos de cultivos agrícolas seleccionados, mediante la utilización de modelos agroclimáticos.

Objetivos específicos

1. Estudiar y analizar varios modelos agroclimáticos de simulación de rendimientos.
2. Establecer bases de datos con información climática y agrícola, adecuada para alimentar los modelos seleccionados.
3. Implementar y dejar operando los modelos en diferentes equipos de la subdirección de Meteorología.
4. Establecer los impactos del cambio climático en la producción o rendimientos de al menos 3 cultivos seleccionados.

Actividades

1. Investigar el estado del arte de las relaciones del cambio climático y la agricultura, incluidas las investigaciones realizadas en la última década, los últimos informes del IPCC y el tema de la disponibilidad de modelos agroclimatológicos aplicados a establecer el comportamiento futuro de la agricultura, bajo nuevos escenarios climáticos.
2. Hacer un diagnóstico de los modelos agroclimáticos que mejor se adaptan a las condiciones del país.
3. Realizar el inventario de la información climatológica, edáfica y agronómica disponible para alimentar los modelos agroclimáticos, para cultivos y regiones que se seleccionarán con base en los resultados de los puntos anteriores.
4. Seleccionar al menos tres cultivos y dos áreas modelo por cultivo.
5. Seleccionar un modelo, implementarlo en computadores de la Subdirección y alimentarlo con la información disponible.
6. Establecer el proceso adecuado para correr el modelo operativamente y presentar resultados preliminares con información actual.
7. Documentar el trabajo con una nota Técnica que contenga los conceptos básicos, el sustento teórico de los modelos, análisis de resultados obtenidos y un anexo con el tutorial detallado del manejo del modelo seleccionado.
8. Impartir capacitación continua a los profesionales del grupo de Agrometeorología en los fundamentos y operación del modelo agroclimático.

I. INTRODUCCION

Una de las mayores preocupaciones a nivel mundial es la influencia que ha tenido y tendrá el calentamiento global y por tanto el cambio climático en los diferentes sectores económicos especialmente en los países en vías desarrollo los cuales presentan mayor vulnerabilidad y menor resiliencia en su población. Las observaciones científicas que empezaron a realizarse hace unas décadas indicaron un calentamiento global del planeta además de encontrar un incremento en la frecuencia de eventos extremos que se evidencian a través de inundaciones, sequías, olas de calor entre otros (Stott et al. & Jones et al., 2004).

El aumento irrestricto de las emisiones de gases está subiendo la temperatura del planeta. Las consecuencias incluyen el derretimiento de glaciares, el aumento de las precipitaciones y de la frecuencia de eventos meteorológicos extremos, y modificaciones en las estaciones del clima (IFPRI, 2009). La emisión de gases efecto invernadero generados por un acelerado desarrollo económico asociado a un aumento de la población puede amenazar la sostenibilidad socioambiental en un futuro sumado a los cambios en los patrones de precipitación y temperatura que podrían generar difícil acceso a los recursos naturales y por consiguiente desplazamiento en la población y otros impactos a nivel social y económico.

La evidencia del aumento en la concentración del dióxido de carbono y otros gases invernadero como el metano, el monóxido de carbono y óxido nitroso, en la atmósfera es irrefutable (Pimentel, 1991; Rabbinge et al., 1993). El sector agrícola a nivel global es el que más aporta emisiones por CO₂ con un 13.5 %, después del sector industrial con 19.4% y el suministro de energía con un 25.9% de acuerdo al cuarto informe del IPCC (Ar4 Syr, IPCC, 2007). Según el IPCC, los aumentos en las concentraciones de metano y óxido nitroso se deben principalmente a la agricultura.

De acuerdo con el DNP, los eventos extremos relacionados con el cambio climático, como son los deslizamientos e inundaciones para los años 1970 a 2000, alcanzaron daños estimados en US\$ 2.227 millones, los cuales representaron el 2,66% del PIB del año 2000. Esto sin tener en cuenta, que en la última década 2000 - 2010, el país superó los niveles históricos de inundaciones en los principales ríos, y que algunas regiones del país sufrieron los periodos más secos de los últimos 30 años¹.

En Colombia el sector agrícola que ocupaba un renglón importante en el la economía del país, actualmente ocupa un PIB del % 2.2 pues el sector que más porcentaje es el de Explotación de minas, comercio, transporte y servicios (DANE 2012). De acuerdo Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural este se ha visto afectado gravemente debido a la ocurrencia de eventos climáticos extremos especialmente durante las fases del Fenómeno El Niño y La Niña. Las anomalías climáticas involucradas en el cambio climático a través de la variabilidad climática generan un impacto socioeconómico de grandes proporciones en el ámbito regional, en donde la agricultura depende del régimen de lluvias y comportamiento de temperatura, lo que se ocasiona inundaciones y deslizamientos en terrenos cultivados, proliferación de plagas y expansión de enfermedades, cambios en los ciclos vegetativos de los cultivos, cambios en los ciclos de plagas, mayor estacionalidad de la producción, pérdidas en la

¹ Citado por el IDEAM, en la Segunda comunicación nacional ante la convención marco de la Naciones Unidas ante el Cambio Climático (2009).



producción y rendimiento de cultivos, importación de productos agrícolas y amenaza a la seguridad alimentaria entre otros.

Teniendo en cuenta los impactos negativos ocasionados del cambio climático, la comunidad científica con apoyo de entidades gubernamentales se ha preocupado en generar documentos sobre evidencias del cambio climático, impactos y efectos en escenarios futuros. Es así que la necesidad de tener proyecciones de los impactos del cambio climático sobre diferentes escenarios socioeconómicos y ecosistémicos ha permitido que los expertos hayan desarrollado modelos que simulen el sistema climático en el futuro. Según Oviedo & León, el reto es conocer los posibles cambios que puedan ocurrir en una región o en una localidad para definir medidas de adaptación que permitan minimizar el impacto del cambio climático en el área de interés. Para tal efecto es necesario generar escenarios regionales y locales de clima futuro para así evaluar el impacto del cambio esperado en cada escenario. En el tema específico de obtención de escenarios regionales y locales de cambio climático a nivel suramericano se cuentan con experiencias en México, Argentina, Brasil, Perú, Chile, Colombia (Oviedo & León, 2009).

En Colombia el IDEAM ha generado escenarios para las variables de precipitación y temperatura para el clima presente y futuro usando información de condiciones iniciales con los modelos de baja resolución de Reino Unido, Estados Unidos y Alemania, usando los modelos PRECIS (UK), WRF (USA) y GSM-MRI (Japón) para realizar el downscaling dinámico². Estos modelos han sido utilizados en diversos estudios para analizar proyecciones en diferentes sectores en nuestro país.

De acuerdo a lo anterior y a lo mencionado en el componente 4 dentro del programa de apoyo a la agenda colombiana de adaptación al cambio climático, actualmente se trabaja en la generación de escenarios futuros de precipitación y temperatura, pero son escasos los estudios sobre la influencia de estos escenarios en actividades tan importantes como la agricultura. Existen modelos que son capaces de simular las predicciones futuras, a partir de especificaciones en riesgo de cada cultivo en particular, en función de los escenarios climáticos esperados. Es por eso que el objetivo de este proyecto es alimentar los modelos agroclimáticos que mejor se acoplen a los cultivos del país, con los nuevos escenarios y establecer cuáles serán los cambios a futuro en los indicadores de producción y rendimiento. En el presente estado del arte se presentarán los resultados de las revisiones bibliográficas sobre cambio climático, agricultura y el uso de modelos agroclimáticos.

² Segunda comunicación nacional ante la convención marco de la Naciones Unidas ante el Cambio Climático (2009). Capítulo 4.



II. GENERALIDADES DEL CAMBIO CLIMATICO

Cambio climático según el IPCC se refiere al cambio en el estado del clima que puede ser identificado (por ejemplo usando pruebas estadísticas) por cambios en la media y/o en la variabilidad de sus propiedades y que persiste por un periodo extendido, típicamente décadas o más. Este significado difiere del de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio climático (UNFCCC), donde el cambio climático hace referencia al cambio del clima que es atribuido directa o indirectamente a la actividad humana la cual altera la composición de la atmósfera global que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables (IPCC, 2007)³. Para la NOAA el cambio climático es una parte normal de la variabilidad natural de la tierra, la cual está relacionada con las interacciones entre la atmósfera, océano, y tierra, como también los cambios en el total de radiación solar que alcanza la tierra. Un ejemplo es la variabilidad de los datos de temperatura de los últimos 420.000 años derivados del casquete polar en el Antártico (NOAA, 2007).

La comunidad científica a través de observaciones históricas ha evidenciado el cambio climático en el decrecimiento de la cobertura de nieve, el incremento del nivel del mar, las variaciones regionales de los patrones de precipitación y los cambios en extremos de tiempo y clima (Jones et al, 2004). Según el reporte síntesis del IPCC de más de 29.000 series de datos, de 75 estudios, que muestran un cambio significativo en muchos sistemas físicos y biológicos, más del 89 % son consistentes a un cambio esperado como respuesta de un calentamiento (IPCC, 2007).

El cambio climático responde al aumento de gases efecto invernadero (GEI) especialmente al CO₂. La NOAA menciona que la quema de combustibles fósiles, como el petróleo y el gas natural agrega CO₂ a la atmósfera, donde el actual nivel es el más alto en los pasados 650.000 años. El cuarto reporte del IPCC concluye que “el incremento observado en la temperatura media global desde mediados del siglo XX se debe más al incremento observado en las concentraciones de gases efecto invernadero de tipo antropogénico (NOAA, 2007).

³ IPCC, 2007. Climate Change 2007. Synthesis report. http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr.pdf

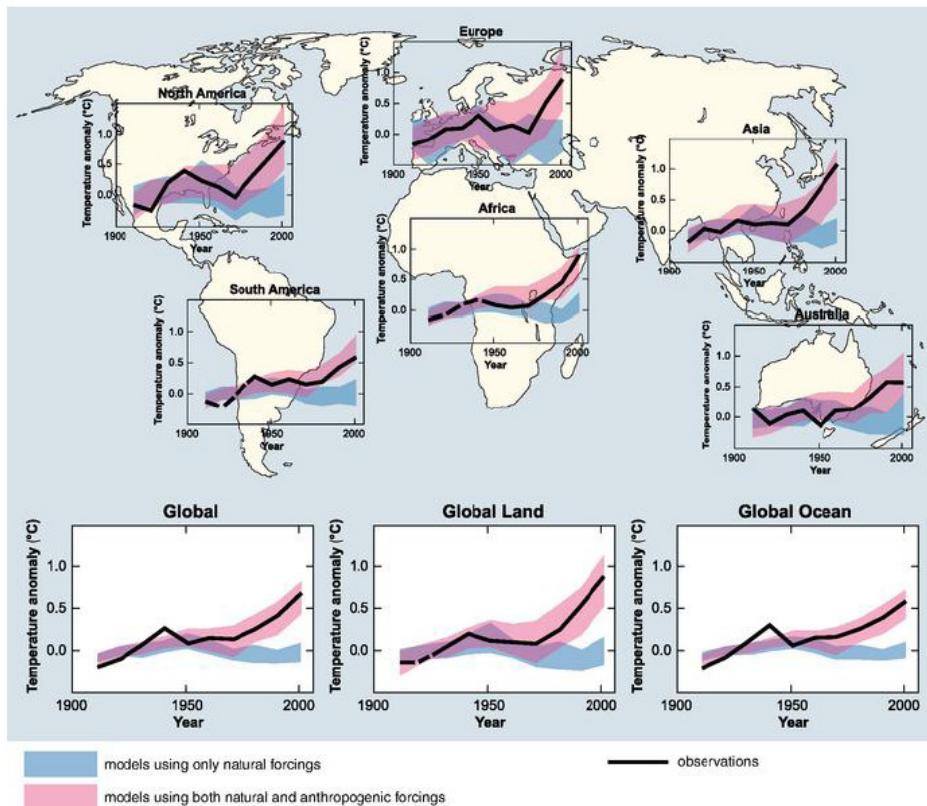


Figura 1. Evolución de temperaturas observadas en el mundo y resultados de los modelos con forzamiento natural y antropogénico para el periodo 1900-2000. Fuente: IPCC, AR4, 2007.

El Cuarto informe de evaluación del IPCC, menciona que las concentraciones de GEI y aerosoles, cobertura del suelo y radiación solar alteran el balance de energía del sistema climático y son conductores del cambio climático, ya que estos afectan la absorción, la dispersión y la emisión de radiación dentro de la atmósfera y en la superficie terrestre, es así que el aumento gradual de la temperatura global es atribuida a estos gases de efecto invernadero. El resultado positivo o negativo en los cambios del balance de energía debido a esos factores se expresa en forzamiento radiativo, que se usa para comparar las influencias de calentamiento o enfriamiento en el clima global (Ar4 Syr, WGI TS.2, IPCC, 2007). El forzamiento radiativo de CO₂ ha tenido un incremento del 20% desde 1995 al 2005, el más grande cambio para cualquier década en los últimos 200 años (Ar4 Syr, IPCC, 2007). En la figura 1, se resumen las evidencias en el impacto del cambio climático en Latinoamérica de acuerdo al cuarto informe de evaluación del IPCC.

Resumen gráfico del impacto de cambio climático en la región (IPCC, IV informe)

- o Los arrecifes de coral y los manglares amenazados por mayor temperatura superficial del mar
- o En el peor escenario de nivel del mar, desaparecen los manglares en las costas bajas
- o La Amazonía pierde 43% de 69 especies arbóreas al final del siglo XXI "sabanización" en la parte oriental
- o Cerrados: Pérdida de 24% de 138 de especies arbóreas para un incremento de temperatura de 2° C
- o Reducción de tierras aptas para café
- o Incremento de aridez y falta de recursos hídricos
- o Incremento fuerte de extinción de: mamíferos, aves, mariposas, anfibios y reptiles hacia 2050
- o Reducida disponibilidad de agua por reducción de glaciares y caída en generación hidroeléctrica
- o Desaparición de capa de ozono
- o Degradación severa de suelos y desertificación
- o Amenaza en el Río de la Plata por incremento en tormentas, marejadas y elevación del nivel del mar
- o Incrementada vulnerabilidad a eventos extremos

Las áreas en rojo corresponden a sitios cuya biodiversidad está severamente amenazada, tendencia que continuará en el futuro

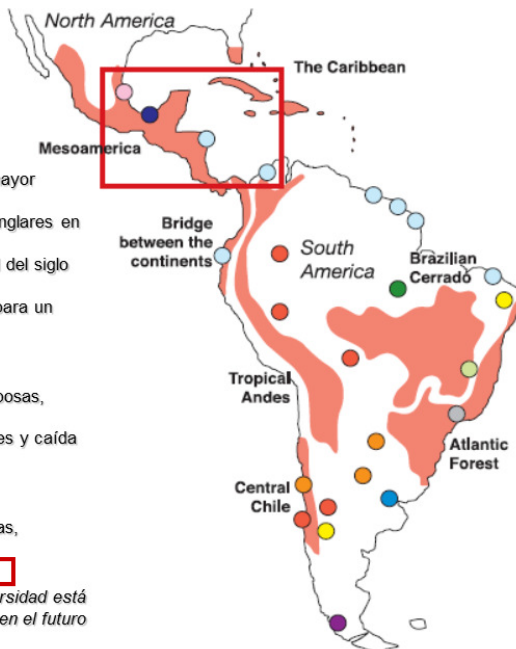


Figura 2. Resumen gráfico del impacto del cambio climático en Latinoamérica de acuerdo al cuarto informe de evaluación del IPCC presentado para el taller de gestión del riesgo y adaptación al cambio climático en el sector agropecuario en las subregiones y amazónica. Fuente: Zapata-Martí R. Cepal.

Las emisiones GEI debido a las actividades humanas han crecido desde épocas preindustriales, con un incremento del 70% entre 1970 y 2004 las cuales vienen de generación de energía, transporte e industria, mientras que las construcciones residenciales y comerciales, la deforestación y el sector agrícola ha estado creciendo en una tasa baja, donde la agricultura emite un 13.5%. (IPCC, 2007).

Las actividades humanas resultan de las emisiones de los cuatro GEI de larga vida: CO₂, el metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O) y halocarbonos (un grupo de gases que contienen flúor, cloro o bromo). Las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero aumentan cuando las emisiones son más grandes que los procesos de eliminación (IPCC, 2007).

La concentración atmosférica global de CO₂ incrementó desde la época preindustrial un valor de 280ppm a 379 pmm en 2005. La tasa de crecimiento de concentración de CO₂ fue más grande en el periodo de 1995 a 2005 con un promedio de 1.9 ppm por año (AR4 Syr, IPCC 2007). La concentración atmosférica global de CH₄ fue de 1774 ppb en el 2005 y la de N₂O se concentró desde la época preindustrial de 270 ppb a 319 ppb en el 2005. (AR4 Syr WGI 2.3, 7.4, SPM, IPCC 2007).

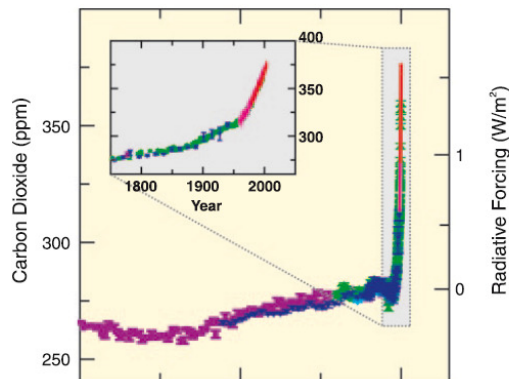


Figura 3. Concentraciones de CO₂ en los últimos 10.000 años y desde 1750 en el recuadro interno. Fuente: IPCC. Reporte cuarta comunicación de cambio climático, 1997.

Es muy probable que el aumento observado en la concentración de CH₄ es predominantemente debido a la agricultura y el uso de combustibles fósiles. El aumento en la concentración de N₂O se debe principalmente a la agricultura. (AR4 Syr, GTI 2.3, 7.3, RRP, IPCC, 2007).

De acuerdo a los resultados obtenidos en el inventario nacional de Gases de Efecto Invernadero (GEI) para el 2000 y 2004 determinaron que el aporte de los GEI se compone de: dióxido de carbono (50%), metano (30%) y óxido nitroso (19%); quedando el 1% para el resto de gases que causan efecto de invernadero y no están dentro del Protocolo de Montreal, como los hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (CFC) y halocarbonos y hexafluoruro de azufre (IDEAM, 2008c). Según el inventario de GEI para el año 2004, Colombia aporta el 0,37% (180.010 Gigagramos) del total emitido en el mundo (49 gigatoneladas), y las emisiones individuales (per cápita) están por debajo del valor medio mundial y muy distante de los valores registrados para Europa, Asia Occidental y Norteamérica, lo cual es un aspecto positivo.

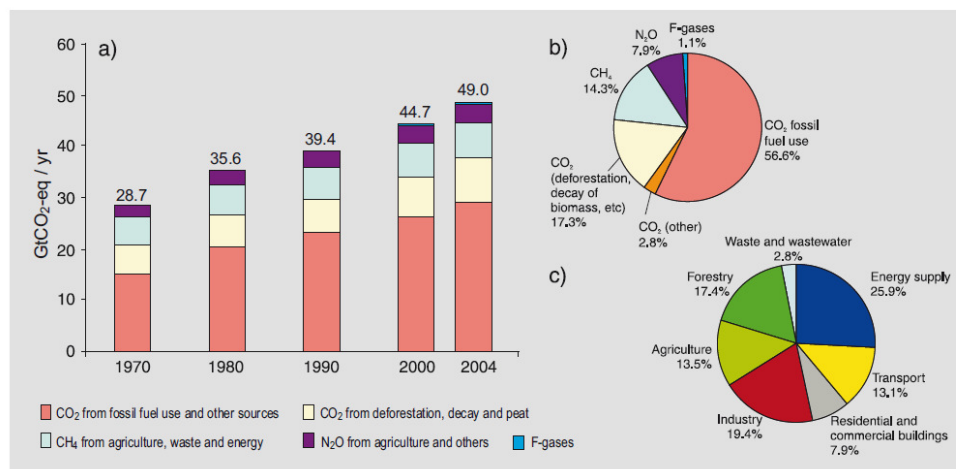


Figura 4. (a) Emisiones global anual de GEI antropogénicos de 1970 a 2004. (b) Parte de diferentes GEI antropogénicos del total de emisiones en el 2004 en términos de CO₂-eq. (c) Parte de diferentes sectores



del total de las emisiones de GEI en 2004 en términos de CO₂-eq. Fuente: IPCC. Reporte cuarta comunicación de cambio climático, 1997.

Según el IDEAM en Colombia los sectores que más emisiones de GEI aportaron en el 2004 fueron: Agricultura (38%); Energía (37%); y Uso del suelo, cambio de uso del suelo y silvicultura –Uscuss– (14%). Seguidos por: Residuos sólidos (6%) y Procesos industriales (5%). Al sumar las emisiones totales de los módulos de Agricultura con los de Uscuss, es evidente el aporte que tiene el sector agropecuario (Aprox. 50%) de las emisiones totales⁴.

Expertos consideran que de seguir el patrón de emisiones actual de CO₂, el nivel atmosférico de este gas se duplicará para finales del siglo XXI. Los modelos indican modificaciones climáticas al provocarse un incremento significativo en la temperatura del aire, cambios en los patrones de las precipitaciones e incremento de la frecuencia de eventos climáticos severos como los periodos de sequía y de inundaciones (Tubielo et al. 2000)

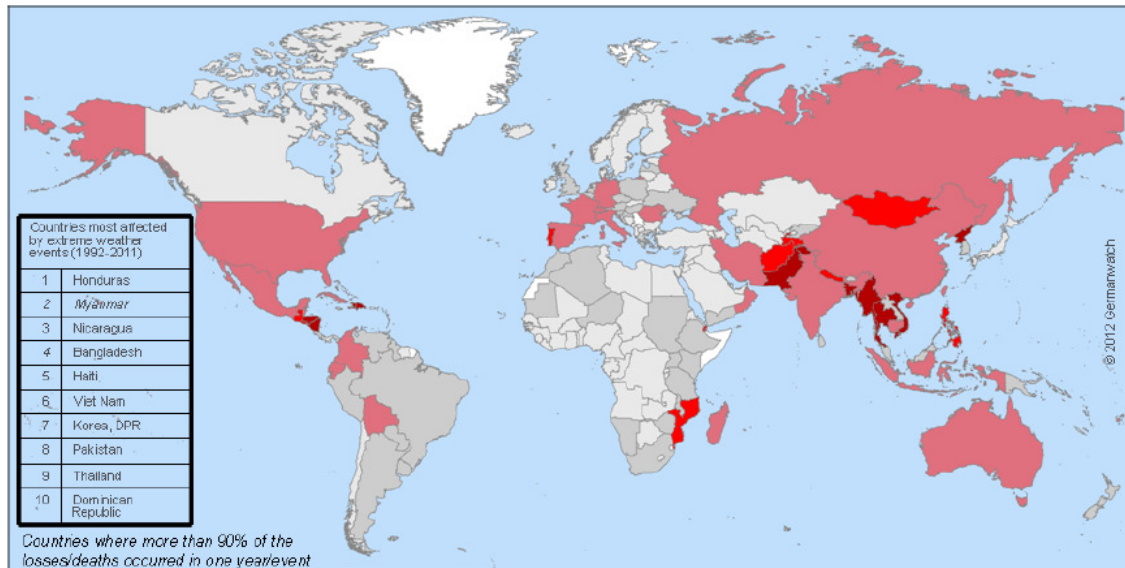
Según un análisis sobre efectos del cambio climático en la agricultura en Panamá, elaborado por expertos de CEPAL de la subregional de México, indica que las opiniones también señalan que la presencia de GEI con el crecimiento de la población mundial y la pobreza de muchas áreas en el mundo, está y podría seguir provocando severos impactos negativos sobre varios sectores sociales y económicos. Así, por ejemplo, las economías más susceptibles de sufrir los estragos de este fenómeno son las que se encuentran en etapa de desarrollo y aquellas que se localizan cerca del ecuador y con latitudes bajas, donde las temperaturas tienden a ser más elevadas (Mendelsohn y otros, 2001)⁵.

La organización Germanwatch en su octavo informe sobre el Índice de riesgo climático global hace un análisis de los países más afectados por eventos extremos de variabilidad climática en el mundo desde 1992 a 2011, Honduras, Myanmar and Nicaragua han sido identificados como los más afectados en un periodo de 20 años, seguidos por Bangladesh, Haiti and Viet Nam. En la figura se observa los países que mayor impacto han tenido por eventos extremos atribuidos al cambio climático, allí Colombia se encuentra entre los países más impactados⁶.

⁴ Segunda comunicación nacional ante la convención marco de las naciones unidas sobre cambio climático. Inventario nacional de emisiones, Gases de efecto Invernadero. 2009

⁵ Citado por Mora. J et. al., CEPAL, 2010 en Efectos del cambio climático en la agricultura de Panamá. Unidad de Desarrollo Agrícola de la Sede Subregional de la CEPAL en México.

⁶ Harmeling & Eckstein, 2013. Global climate risk index 2013. Who suffers most from extreme weather Events? Weather-related loss events in 2011 And 1992 to 2011. Germanwacht. Alemania.



Climate Risk Index: Ranking 1992 – 2011
Figura 5. Países donde más del 90 % de pérdidas y muertes han ocurrido en un año/ evento. Fuente: Germanwatch and Munich Re NatCatSERVICE, 2012.



III. Revisión bibliográfica

En esta sección se mencionarán los hallazgos encontrados en la literatura sobre los efectos del cambio climático en la agricultura de diversos países, enfatizando en Colombia. La mayoría de estudios describen los impactos causados por la variabilidad climática y el calentamiento global los cuales se enmarcan dentro del extenso tema de cambio climático, los documentos más importantes son los informes de evaluación del IPCC y las comunicaciones nacionales ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático elaboradas en cada país, de los cuales mucha información sirve de base para seguir investigando especialmente en el tema de mitigación y adaptación.

Según CEPAL, 2010, los enfoques generalmente adoptados para calcular los efectos del cambio climático sobre el sector agropecuario pueden resumirse en dos familias: espaciales y estructurales (McCarl et. al., 2001; Molua y Lambi, 2007 y Schimmelpfennig et. al., 1996). El primer método observa la producción agrícola y el clima de las regiones y a partir de ello se estiman las diferencias, en tanto que el enfoque estructural mezcla las respuestas económicas y las físicas de los cultivos proporcionadas por los productores agrícolas. El uso de ambas técnicas puede permitir la generación de estudios mucho más integrales⁷.

El enfoque espacial permite determinar los efectos del CC en el sector agrícola teniendo en cuenta los contrastes entre las variables de la tierra, la producción agrícola y variables que impliquen algún costo climático, esta perspectiva toma enfoques como los Ricardianos (Mendelsohn et. al., 1994) que a través de técnicas de regresión, emplea información desagregada y calcula los efectos de variaciones en el clima, de factores económicos y no económicos en el valor de la tierra agrícola. Según CEPAL también son usados los modelos de Equilibrio General Computable (CGE, por sus siglas en inglés) y modelos de Sistemas de Información Geográfica (SIG). Una de las ventajas de este tipo de modelaciones es que permiten identificar los diferentes patrones espaciales de la producción usando alguna técnica estadística que ayude a comprender los posibles cambios existentes. (CEPAL. 2010).

Mendelsohn y Seo, han generado modelos Ricardianos en Estados Unidos, India, en países de Africa y de Suramérica y en Sri Lanka, encontrando que un aumento de temperatura afectaría negativamente los niveles de ingreso neto de los productores agrícolas y un incremento en las precipitación tendría un impacto negativo⁸. La evidencia es clara cuando se indica que el nivel del desarrollo de un país tiene un considerable efecto en la sensibilidad del valor de la tierra ante el cambio climático. Un documento específico de Seo y Mendelsohn, explora como los productores de Latinoamérica se adaptan a las variables ambientales exógenas seleccionando otros cultivos que no habían cultivado antes. Ellos estimaron un modelo multinomial en 2000 productores de 7 países en Suramérica entre ellos Colombia hallando como resultado que los productores en zonas secas tenderán a escoger cultivos como papa y maíz, los de zonas secas moderadas escogerán trigo y soya y los de zonas húmedas tenderán a

⁷ Citado por Mora. J et. al., CEPAL, 2010 en Efectos del cambio climático en la agricultura de Panamá. Unidad de Desarrollo Agrícola de la Sede Subregional de la CEPAL en México.

⁸ *Ibíd.*



escoger frutas, hortalizas y calabaza⁹, es decir que cultivaran en nuevos espacios climáticos diferentes a los tradicionales. Eso dependería en el cambio del uso del suelo y de la orientación de los sistemas agrícolas, un ejemplo es que los agricultores que practican agroecología pueden verse menos vulnerables a los efectos de la variabilidad climática.

Según CEPAL, Darwin y otros (1995) señalan que al realizar estudios a nivel agregado, a nivel país ó región, existen dos limitaciones que no se consideran: a) los efectos del cambio climático en otras regiones; pues asumen que el clima fuera del área de estudio se mantiene constante, y b) el papel del comercio mundial en diseminar los efectos entre las distintas regiones. Para rectificar estas restricciones, los CGE (Modelos de equilibrio compatible) ofrecen la posibilidad de modelar la agricultura con respecto a otros sectores económicos. Pese a ello, los CGE tienen la ventaja de tomar los precios como endógenos y consideran vínculos intersectoriales, (Schlenker y otros, 2006)¹⁰.

En Colombia este modelo CGE fue utilizado en el 2010 por la Dirección nacional de planeación (DNP), para realizar un análisis de los Impactos Económicos del Cambio Climático para Colombia. Según los autores, en la literatura sobre evaluación de CC, se encuentran los modelos “bottom-up”, que desagregan la economía (ó un sector) detalladamente y al final agregan los resultados individuales; y los modelos “top-down”, los cuales son construidos desde el nivel agregado y se desagregan hasta lo particular. Dentro de esta categoría se encuentran los Modelos de Equilibrio General Computable (MEGC). Un modelo de equilibrio general tiene la ventaja de analizar la incidencia de los sectores en la economía a través de sus interrelaciones¹¹. Estos modelos MEGC se construyen a partir de los datos económicos de un año particular para un país o una serie de países o regiones, esta información se puede tener a nivel agregado o a nivel sectorial. El DNP para este caso utilizó el modelo MEG4C que se basa en el modelo GREEN (“General Equilibrium Environmental Model”, por sus siglas en inglés) desarrollado por la OECD (Organization for Economic Co-operation and Development) para cuantificar los efectos de políticas para las reducción de emisiones de gas carbónico, debido a que el modelo presenta una limitante en el horizonte temporal, ya que sería necesaria una acumulación de capital para observar los efectos del CC sobre la economía, un ejemplo es, que para un análisis de política ambiental ese horizonte sería de décadas o hasta de un siglo.

El efecto estructural, según CEPAL, estima la respuesta de los cultivos ante escenarios climáticos en los que se especifican promedios anuales por décadas o datos con una frecuencia diaria para ciertas variables climáticas: temperatura y precipitación. Con base en las estimaciones se simulan cambios en la producción. La utilización de este enfoque metodológico tiene la ventaja que permite obtener información detallada de las respuestas físicas, biológicas y económicas, así como los posibles ajustes sin embargo una desventaja es

⁹ Seo, N., & Mendelsohn R. 2007. An Analysis of Crop Choice: Adapting to Climate Change in Latin American Farms. Niggol Seo University of Aberdeen Business School, UK and Robert Mendelsohn School of Forestry and Environmental Studies, Yale University, USA.

¹⁰ *Ibíd.*

¹¹ DNP, 2010. Análisis de los Impactos Económicos del Cambio Climático para Colombia utilizando un Modelo de Equilibrio General Computable Subdirección de Desarrollo Ambiental Sostenible – DNP. Bogotá, Colombia.



que para estudios agregados se requieren múltiples relaciones para grandes áreas y sistemas diversos de producción a partir de pocos lugares y cultivos (Schimmelpfennig y otros, 1996)¹².

Teniendo en cuenta que impactos negativos de la agricultura frente a escenarios de cambio climático pueden tener una significativa incidencia en la seguridad alimentaria, el IFRPI, en trabajo conjunto de varios expertos han elaborado un análisis que combina el método espacial y estructural, el cual integra el modelamiento del crecimiento de cultivos con el modelo biofísico (DSSAT) y el modelo de proyección de la oferta y demanda agrícola mundial (IMPACT 2009), usando los dos escenarios de cambio climático para A2, el NCAR de Estados Unidos y el CSIRO de Australia. Adicionalmente el estudio presenta un análisis del costo de inversiones en investigación agrícola, vías rurales, e infraestructura y eficiencia del riego, que apuntan a una mejora en la productividad como opción de adaptación para los productores. Como resultados los expertos concluyen que el rendimiento de los cultivos disminuirá, se afectará la producción, aumentarán los precios de los cultivos y la carne, y se reducirá el consumo de cereales, todo lo cual conducirá a la reducción del consumo de calorías y al aumento de la malnutrición infantil¹³.

El congreso de los Estados Unidos ha desarrollado desde el 2011-2013 un programa de investigación de cambio climático (United States Global Change Research Program) conformado por 14 agencias, el cual busca evaluar los procesos naturales dentro de este cambio global, específicamente analizará el impacto sobre la agricultura y la ganadería, de acuerdo al primer avance indica que el calentamiento experimentado en el hemisferio norte ha producido un desplazamiento significativo de las zonas de cultivo de los Estados Unidos. Según este reporte del IICA la sequía que afectó el sur de los Estados Unidos durante 2011 causó grandes pérdidas en las cosechas agrícolas y disminuyó sus rendimientos. Se anticipó que para 2012 las sequías se agravarán (figura 5) y evidentemente sucedió así debido al Fenómeno La Niña¹⁴. Para el IICA existe mucha incertidumbre en los pronósticos de precipitación lo cual hace difícil anticipar con exactitud los cambios en la producción agrícola frente a escenarios de cambio climático. Las predicciones generadas por los modelos son muy variadas y suelen ser sensibles a los supuestos y los escenarios utilizados para realizar la estimación (IICA, 2012).

¹² Citado por Ramírez D. & Ordaz J. 2010 en “Efectos del cambio climático en la agricultura de Nicaragua”. Unidad de Desarrollo Agrícola de la Sede Subregional de la CEPAL en México

¹³ Nelson, Rosegrant & et.al. 2009. Cambio Climático. El impacto en la agricultura y los costos de adaptación. Instituto Internacional de Investigación sobre Políticas Alimentarias (IFPRI, por sus siglas en inglés). Washington.

¹⁴ IICA, 2012. Nota Técnica. Resultados del Foro USDA Agricultural Outlook 2012: Moving Agriculture Forward: Growing, Innovating, and Celebrating 150 Years. (Tercera entrega). Costa Rica.

Sequías persisten en el Sur de Estados Unidos

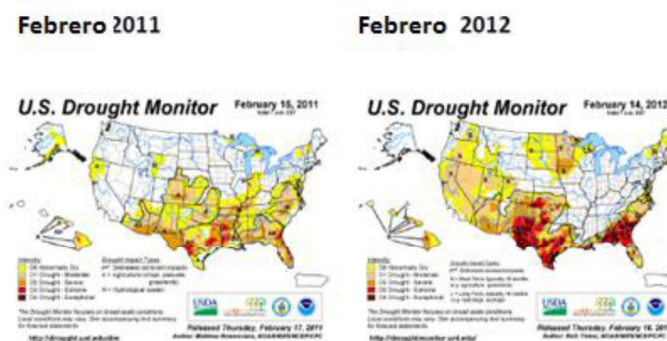


Figura 6. Sequía en el Sur de Estados Unidos debido al Fenómeno La Niña 2011-2012.

1) Estudios sobre el uso de herramientas y metodologías agroclimáticas y análisis de Cambio climático en Latinoamérica

A nivel regional se han generado esfuerzos para disminuir incertidumbre frente al CC, es por eso que uno de los estudios más completos en Centroamérica corresponde al de “Central America Country Studies Project Team” que incluye análisis sobre la vulnerabilidad del agua, la agricultura y los recursos costeros al cambio climático. Dentro de este gran estudio se incluyeron análisis y prioridades de los países centroamericanos que corresponden a aspectos socioeconómicos, ambientales y climatológicos de la región¹⁵.

Otro estudio mencionado por CEPAL fue desarrollado para los países de Mesoamérica es el de Magrin y Gay (en Alfaro y Rivera, 2008), ellos plantean que, en caso de no atender las secuelas del CO₂, el rendimiento de los granos en la región podría alcanzar disminuciones hasta de 30% para el año 2080 si se considera un escenario bastante cálido. Asimismo, este estudio pronostica que la demanda de agua para irrigación se incrementará notablemente ante un clima más caliente y ocasionará mayor competencia entre el uso doméstico y el agrícola. Por otra parte, estos autores muestran que el cambio climático ocasionará la salinización y desertificación de las tierras agrícolas y que para 2050, estos fenómenos afectarán 50% de dichas tierras¹⁶.

CEPAL tomando un enfoque espacial sobre análisis de cambio climático, publicó un documento en el que se presenta los efectos del CC sobre el sector agropecuario de Nicaragua y Costa Rica desarrollado en el marco del proyecto “La economía del cambio climático en Centroamérica”¹⁷. En el estudio se usó el modelo Ricardiano que evaluó los impactos del valor de la tierra de los agricultores de Nicaragua ocasionando reducciones, según este

¹⁵ Citado por Mora, J et. al., CEPAL, 2010 en Efectos del cambio climático en la agricultura de Panamá. Unidad de Desarrollo Agrícola de la Sede Subregional de la CEPAL en México.

¹⁶ *Ibíd.*

¹⁷ Ramírez D. & Ordaz J. 2010. Efectos del cambio climático en la agricultura de Nicaragua. Unidad de Desarrollo Agrícola de la Sede Subregional de la CEPAL en México.



modelo se observó que con un aumento de 1°C en la temperatura media anual podría presentarse una reducción promedio de US 1.85 en el valor contingente de la renta de la tierra (Ramírez D. & Ordaz J. 2010). Adicionalmente los resultados mostraron que se esperan pérdidas importantes en la producción y rendimientos en los cultivos más importantes como lo son (maíz, frijol y café). En este estudio también se incluyeron los impactos económicos a través de estimaciones que muestran que las pérdidas acumuladas al año 2100 de la producción agropecuaria nicaraguense representarían alrededor de 22% del PIB de 2007, considerando una tasa de descuento de 2%.

Para el caso de Costa Rica, el estudio de CEPAL¹⁸ tuvo el mismo objetivo, analizar los efectos del cambio climático en la agricultura. Para este trabajo se utilizó la misma metodología que el estudio de Nicaragua, encontrando que los cultivos de Maíz, Frijol y café se verían afectados negativamente en su producción y rendimientos. En el tema de renta de propiedad los autores concluyen que en el caso de un aumento de un grado en la temperatura media anual una reducción en el ingreso recibido por concepto de alquiler de alrededor de 1,3 dólares mensuales, lo que equivale a una disminución del 1,2% en los ingresos que provienen del alquiler de la propiedad (Ordaz J & Ramírez D.2010)

En Panamá los estudios que se ha realizado toman con base la información de la Primera Comunicación Nacional sobre Cambio Climático (PCNCC) que considera cuatro subproyectos, uno de ellos es el primer inventario de GEI en Panamá, el cual determinó los sectores de energía, procesos industriales, utilización de solventes, agricultura, cambio del uso de la tierra-silvicultura (CUTS, en adelante) y desperdicios. Los GEI para los que se midieron las emisiones fueron: dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (NO₂), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NOX), y los compuestos volátiles distintos del metano (CVDM). Para la agricultura y la ganadería, las fuentes generadoras de los GEI fueron: ganado doméstico, fermentación entérica y manejo del estiércol, cultivo de arroz, quema prescrita de sabanas, quema en el campo de residuos agrícolas y suelos agrícolas.

Para este estudio, lo que respecta al ganado doméstico y manejo de estiércol, las estimaciones realizadas sobre las emisiones de CH₄ originadas por la fermentación entérica y el manejo de estiércol resultaron en 81,7 Gg¹⁹. La mayor contribución fue hecha por el ganado bovino lechero y no lechero. No obstante, es posible que a partir de las excretas de los animales domésticos se produzca una cierta emisión de CH₄. Las emisiones de CH₄ procedentes de los arrozales resultaron en 7,2 Gg, donde los arrozales anegados participaron con sólo 2,8 Gg. En cuanto a las emisiones directas de N₂O derivados los suelos dedicados a la producción animal y las emisiones indirectas de N₂O procedentes del nitrógeno utilizado en la agricultura fueron de 8,8 Gg. En lo que se refiere a la quema en el campo de residuos agrícolas, específicamente para el cultivo de la caña de azúcar y debido a que la cosecha se efectúa en forma semimecanizada en la mayoría de los ingenios azucareros del país, las emisiones más relevantes de CO para este subsector alcanzaron 19,2 Gg (Mora J. et al. CEPAL, 2010).

¹⁸ Ordaz J & Ramírez D. 2010. Efectos del cambio climático en la agricultura de Costa Rica . Unidad de Desarrollo Agrícola de la Sede Subregional de la CEPAL en México.

¹⁹ Según la metodología de IPCC, los GEI deben medirse en Gigagramos (Gg), en donde un gigagramo equivale a 1.000 toneladas.



Otro estudio que aborda los posibles impactos de un nuevo escenario climático en la productividad del arroz en Panamá es el de Moreno. A. (2002)²⁰. En la investigación se utilizó el modelo ecofisiológico SIMPROC²¹ para simular el comportamiento de este cultivo usando Los escenarios climáticos que se generaron con el modelo de circulación general HADCM2 con un aumento de la temperatura de 2,5 °C. Los resultados del estudio muestran que la modificación del clima afectaría el comportamiento productivo del cultivo de arroz por lo que la implementación de estrategias de adaptación se debería basar en el manejo racional de los Recursos Hídricos, Manejo Integrado de Cuencas Hidrográficas y Alerta Temprana(Moreno , 2002).

De otra parte el modelo simulador de productividad SIMPROC también fue utilizado en el estudio realizado por Instituto de Investigaciones Agropecuarias INIA con apoyo del Ministerio de Agricultura de Chile y Agrimed Centro de Agricultura y medio ambiente²² sobre el “Impacto, Vulnerabilidad y Adaptación al Cambio Climático en dos Zonas Agroclimáticas del Sector Silvoagropecuario de Chile”. Al parecer los resultados de análisis de simulación de este modelo frente a escenarios de cambio climático han sido exitosos, tanto que se utilizó a nivel nacional para estudiar los “Impactos productivos en el Sector Silvoagropecuario de Chile frente a Escenarios de Cambio Climático”, proyecto ejecutado por AGRIMED de la Facultad de Ciencias agronómicas de la Universidad de Chile en el 2008. En la investigación se presenta una proyección de los impactos productivos de los cambios climáticos en Chile, para mediados del siglo XXI (años 2040 y 2070), realizada para dos escenarios: A2 y B2, previstos por el IPCC. En el siguiente aparte se mencionaran los resultados de este estudio con el uso del modelo SIMPROC.

Cabe resaltar el interés de algunos autores que se han aproximado al estudio del efecto del cambio climático sobre pequeños productores agrícolas. Altieri & Nicholls, 2008, en un artículo describen los impactos del cambio climático en agricultores tradicionales como también las características agroecológicas de los sistemas agrícolas indígenas los cuales pueden ser útiles para el diseño de sistemas agrícolas en los planes de adaptación²³. Los autores indican que los pequeños productores de los países en vías de desarrollo son los más vulnerables frente al CC.

²⁰ Moreno A. 2002. “Escenarios de Cambio Climático y Evaluación de sus Posibles Impactos en el Comportamiento Productivo del Cultivo del Arroz en la República de Panamá”. Tesis de Magíster en Gestión y Planificación Ambiental. Universidad de Chile. Chile.

²¹ Este modelo fue desarrollado por el centro de Agricultura y Medio ambiente de la U. de Chile y simula el crecimiento y producción de los cultivos, integrando los principales procesos ecofisiológicos y su regulación climática.

²² El modelo simulador de productividad fue desarrollado por el centro AGRIMED en la Universidad de Chile y ha servido de herramienta para diversos estudios de cambio climático.

²³ Miguel A Altieri, Clara Nicholls. 2008. los impactos del cambio climático sobre las comunidades campesinas y de agricultores tradicionales y sus respuestas adaptativas. Department of Environmental Science, Policy and Management, University of California. USA.



De otra parte en México un grupo de expertos se han realizado varios estudios sobre el tema, con base a dos proyectos: Estudio País y el proyecto “Utilización de pronósticos climáticos para actividades agrícolas en el estado de Tlaxcala”, analizaron con detalle el impacto del ENOS en la agricultura de maíz de temporal en algunos municipios de ese estado. Los autores utilizaron las salidas de los modelos CCCM (Canadian Climate Center Model) y GFDL (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory) para obtener las variaciones de temperatura, precipitación y radiación provocadas por una duplicación del bióxido de carbono. Así mismo se estudiaron los posibles efectos biofísicos en el maíz temporal teniendo en cuenta la disponibilidad hídrica y térmica de la planta. Se utilizó el modelo de simulación de crecimientos de maíz Ceres-Maize de Jones y Kiriny, 1996, introduciendo la variedad del maíz, etapas fenológicas, tipo de suelo y manejo de cultivo. Los resultados arrojados mostraron un incremento en la vulnerabilidad del Maíz²⁴ donde un clima “normal” se asimilaría a un posible escenario del Fenómeno El Niño, lo implicaría que la agricultura de temporal se afrontaría a grandes pérdidas o que sufriría importantes cambios para adaptarse además de considerar que los pronósticos climáticos pueden constituirse en una medida adaptativa en sí. (Conde C., Ferrer R. et al. 2002).

El Programa Cooperativo para el Desarrollo Tecnológico Agroalimentario y Agroindustrial del Cono Sur (PROCISUR) creado desde 1980 y lo constituyen los Institutos Nacionales de Investigación Agropecuaria (INIAs), de Argentina, Bolivia, Brasil, Chile, Paraguay y Uruguay y el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), a través de dos plataformas regionales. El autor Carriquiry hace una muy completa documentación acerca de los efectos del cambio climático en los países mencionados, en cada aparte menciona las evidencias científicas del CC, el cambio climático en la región y su impacto en la agricultura; la vulnerabilidad y adaptación al cambio climático; las características de la agricultura familiar y medidas de adaptación²⁵.

El Índice de Riesgo Global climático Germanwatch²⁶ es un análisis basado en uno de los conjuntos de los datos más fiables disponibles sobre los impactos de los eventos climáticos extremos y están asociados a datos socioeconómicos. El Índice de Riesgo Climático Germanwatch 2013 es la 8ª edición del análisis anual. Este representa una pieza importante en el rompecabezas global, más amplio de los impactos relacionados con el clima y las vulnerabilidades asociadas, pero por ejemplo no tiene en cuenta otros aspectos importantes como la elevación del nivel del mar, deshielo de los glaciares o mares más ácidos y cálidos. Se basa en los datos del pasado por lo que no se debe utilizar para una proyección lineal de los efectos del clima en el futuro. Además, es importante señalar que un evento extremo no solo puede remontarse únicamente al cambio climático antropogénico, de acuerdo con el índice Global de Riesgo Climático Honduras, Myanmar y Nicaragua fueron los países más afectados

24 Conde C., Ferrer R. Gay C. & Araujo R. Impacto del cambio climático en la agricultura de México. Año ¿?

25 Carriquiry M. 2011. Agricultura familiar y cambio climático en el Mercosur ampliado. Documento preparado por las Plataformas Tecnológicas Regionales de Agricultura Familiar y de Sustentabilidad Ambiental de PROCISUR, Santiago de Chile, Chile.

26 Harmeling & Eckstein, 2013. Global climate risk index 2013. Who suffers most from extreme weather Events? Weather-related loss events in 2011 And 1992 to 2011. Germanwacht. Alemania.



por fenómenos extremos meteorológicos desde 1992 hasta 2011 (Harmeling & Eckstein, 2013).

2) Estudios sobre el uso de herramientas agroclimáticas y análisis de Cambio climático en Colombia

Los escenarios de cambio climático han permitido determinar impactos y proyecciones en diferentes sectores económicos como el energético, el ecosistémico y agrícola. Aunque en Colombia existen estudios relacionados con cambio climático y agricultura utilizando escenarios de cambio climático, la mayoría se han ejecutado en el marco de la primera y segunda comunicación ante la convención marco de Naciones Unidas ante el Cambio Climático y la Dirección Nacional de Planeación, el resto de investigaciones se elaboran en el marco de tesis de maestría y doctorados en universidades colombianas, especialmente en el tema de variabilidad climática con el Fenómeno el Niño y la Niña, eventos que han afectado seriamente el sector agrícola colombiano.

Cabe resaltar que en Colombia algunos sistemas agrarios están más consolidados en materia de investigación agrometeorológica y red de observaciones meteorológicas por lo que tienen mayor acceso a pronósticos y predicciones. Sistemas agrarios como el de café (FEDECAFE), Palma (CENIPALMA), Caña de azúcar (CENICAÑA), Cereales (FENALCE) y arroz (FEDEARROZ) han tenido más avance en el tema de agrometeorología con el uso de diversos modelos que permiten simular disponibilidad hídrica, rendimientos potenciales, simulación de crecimiento de cultivo así como respuesta de determinados cultivos a diversas alternativas de manejo. De otra parte se encuentran los pequeños agricultores quienes tienen poco o ningún acceso a la información agroclimática. Es por esto que la incidencia negativa del comportamiento climático en Colombia particularmente en la producción y rendimiento agrícola de los diversos cultivos, dificulta la toma de decisiones para el periodo de siembra y seguimiento en el ciclo fenológico en los cultivos de los pequeños agricultores o de las economías campesinas.

En el 2006, Ospina J., realizó su trabajo de tesis cuyo objetivo fue el de verificar, calibrar, ajustar y validar el modelo DSSAT para genotipos de maíz ampliamente cultivados en Colombia, bajo diferente oferta ambiental²⁷. Según el autor el modelo DSSAT efectivamente fue capaz de simular y pronosticar con el 15% de precisión, las variables de respuesta número de días a floración femenina, número de días a madurez fisiológica, número de granos por metro cuadrado, índice de cosecha y rendimiento de grano, en varias de las localidades del estudio. En este estudio solo se utilizó el modelo agroclimático DSSAT pero no se asoció con un análisis de variabilidad climática ni cambio climático.

²⁷ Ospina, J. 2006. Validación del modelo DSSAT en diferentes condiciones agroecológicas de Colombia, una herramienta para optimizar las prácticas de manejo del cultivo del maíz. Tesis de Magister en Ciencias Agrarias con Énfasis en Plantaciones Agrícolas Tropicales. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Medellín, Colombia.



Pinzón C. en su tesis de maestría, evaluó el efecto del fenómeno el Niño y la Niña en el agrosistema de maíz en Córdoba (Pinzón, 2009). Fernández M.²⁸ analizó el efecto del Fenómeno del Niño en el agrosistema de papa en el altiplano cundiboyacense, encontrando que el Fenómeno El Niño induce una señal marcada en la variabilidad climática de la región hallándose que hubo una relación marcada en el rendimiento del cultivo de papa y el índice IOS especialmente en el centro y norte de Boyacá y nororiente de Cundinamarca. En esta tesis se trabajó con el modelo CROPWATT, en donde los balances hídricos generados por el modelo para tres municipios (Guatavita, Chocontá y Ubaté) indicaron que evidentemente durante los eventos del fenómeno El Niño en la región se presentó un aumento en la deficiencia de agua, por tanto se dedujo que el cultivo de papa pudo verse expuesto a estrés hídrico durante el desarrollo vegetativo, principalmente en la etapa de tuberización, como también a la imposibilidad de la toma de nutrientes diluidos en el suelo lo que puede causar la reducción del potencial de rendimiento lo anterior se vio reflejado en la baja producción e incremento de los precios en 1992 durante el evento moderado de “El Niño” y en el periodo de 1997 y 1998 (evento El Niño muy fuerte) (Fernández, 2009).

La tesis de maestría en Meteorología de la Universidad Nacional de Colombia, elaborada por Rojas E.²⁹, analizó el comportamiento de las condiciones climáticas en tres estaciones del sur occidente de la Sabana Bogotá a escalas intra e interanual. En el trabajo se encontraron claras asociaciones entre la oscilación ENOS, la temperatura y la precipitación de la zona. Además mediante el software de simulación DSSAT y utilizando información climática a escala diaria y escenarios de cambio climático generados por el IDEAM, se realizaron simulaciones del cultivo de papa bajo escenarios de variabilidad climática y cambio climático en condiciones de cultivo comercial encontrando que las más importantes reducciones en los rendimientos simulados se observaron bajo condiciones de reducción precipitación y aumento de temperaturas máximas ocurridas bajo los eventos El Niño, teniendo en cuenta que estas reducciones fueron moduladas por las características de los suelos es decir que con suelos aptos y buenas prácticas los rendimientos podrían verse beneficiados en escenario futuro (Rojas, 2011).

Respecto a las emisiones de N₂O, el cual hace parte de la emisiones de GEI, DIAZ, 2012, realiza una modelación agrometeorológica de las emisiones de óxido nitroso desde suelos cultivados con *Brachiaria humidicola* (Pastos) bajo condiciones edafológicas y meteorológicas del Valle del Sinú en Colombia. Utilizando modelos estadísticos empíricos no lineales calculó la relación entre la humedad del suelo, la temperatura del aire y los flujos de N₂O emitidos desde suelos cultivados con *Brachiaria h.*, encontrando que “un incremento en la humedad del suelo favorecen el incremento de los flujos y que la temperatura del aire previa al período de los muestreos, igualmente influye en las emisiones, pero según la especie de *Brachiaria* cultivada” (Díaz. E. 2012).

²⁸ Fernández M. 2009. Efecto del fenómeno El Niño en el agrosistema de papa y sus impactos socioeconómicos en los departamentos de Cundinamarca y Boyacá para el periodo de 1976-2006. Tesis para optar el grado de Magister en Meteorología. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.

²⁹ Rojas E. 2011. Evaluación del desarrollo del cultivo de papa bajo escenarios de variabilidad climática interanual y cambio climático, en el sur oeste de la Sabana de Bogotá. Tesis de Grado. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.



Adicionalmente utilizó el modelo (Denitrification - Decomposition / DNDC) introduciendo variables meteorológicas y de propiedades de suelo para simular el proceso de descomposición y desnitrificación en el suelo cultivado con *Brachiaria humidicola*. Según Díaz, el modelo DNDC sería muy útil para la optimización de la gestión agronómica, la cuantificación de las emisiones de GEI con el cambio de uso de la tierra, y el desarrollo de opciones de mitigación de gases de efecto invernadero para las emisiones³⁰.

La FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) en el 2012 estableció un acuerdo con el DNP, MADR (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural) e IDEAM con el fin de realizar la adecuación del modelo Aquacrop desarrollado por FAO a las condiciones y características propias de Colombia para identificar los cambios en el rendimiento agrícola en función de la variabilidad climática y de los niveles de CO2 estimados para el futuro para los cultivos de arroz riego en la zona norte y meseta de Tolima y en Meta, caña de azúcar en el Valle del Cauca, maíz tecnificado en Córdoba y Meta, papa Diacol Capiro en el altiplano cundiboyacense y maíz amarillo tecnificado en el Tolima y el Valle del Cauca. Los autores (Díaz, Méndez y Bernal) analizaron las respuestas de los mencionados cultivos ante escenarios de cambio climático según el modelo AquaCrop además de comparar los resultados con el modelo DSSAT³¹.

Retomando el modelo MCGE utilizado por DNP en Colombia ya mencionado, en donde se tienen en cuenta los sectores económicos agregados, para efectos del CC, los expertos de DNP impactaron cuatro de los quince sectores del modelo: agricultura, ganadería, pesca y silvicultura. Para los dos primeros sectores (agricultura y ganadería) se estimaron funciones a partir de regresiones realizadas utilizando datos colombianos de la Red de Información y Comunicación del Sector Agropecuario, Agronet. Luego se estimó una regresión del cambio en la productividad, contra el cambio de temperatura, cambio porcentual en la precipitación y estas variables al cuadrado.

Según el DNP, en el caso de la agricultura, se seleccionaron cinco cultivos: i) maíz tradicional y arroz de riego, para cultivos transitorios, ii) palma de aceite y caña de azúcar, como cultivos permanentes más importantes y iii) banano, el segundo más importante producto de exportación. Se calculó la producción por hectárea en cada departamento como proxy de productividad. Los análisis de simulación arroja como resultado el comportamiento del PIB frente a los escenarios B2 y A2, como se observa en la figura

³⁰ Díaz. E. 2012. Modelación agrometeorológica de emisiones de Óxido Nitroso en *Brachiaria humidicola* bajo condiciones del Valle del Sinú. Tesis de Maestría en Meteorología. Universidad nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.

³¹ (Díaz, Méndez y Bernal) 2012. Uso del modelo AquaCrop para estimar rendimientos agrícolas en Colombia, en el marco del estudio de impactos económicos del cambio climático (EIECC). FAO, IDEAM, MDVR, DNP.

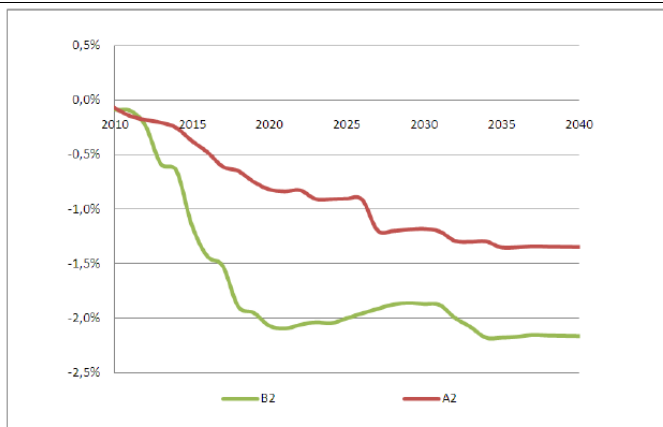


Figura 7. Pérdida del PIB para escenarios B2 y A2 simulado con MCGE. Fuente: SDAS-DNP

La figura 7 presenta la pérdida en el PIB de acuerdo con cada escenario. Los resultados sugieren que en los dos escenarios se tendrían impactos negativos. Los mayores impactos se darían bajo el escenario B2 con una pérdida promedio del 1,5% del PIB llegando a 2,3% en 2040. Bajo el escenario A2 el impacto en 2040 sería de 1,3% y el promedio hasta ese año sería de 0,8%³².

En términos de producción, el sector de la agricultura perdería en promedio 21,76% con respecto al escenario BAU “business as usual”. Es importante tener en cuenta que este modelo captura costos de NO adaptación, es decir los costos que sufriría la economía si no se invirtiera en cambio de variedades, sistemas de riego, etc. Es de resaltar que, de acuerdo a los análisis realizados, la productividad del sector de agricultura depende negativamente del aumento en la precipitación.

Este análisis del DNP indica, que al tener en cuenta el efecto del CC, la economía colombiana se proyectaría con una gran participación del sector minero debido a la disminución en rentabilidad de los sectores primarios. Este resultado debe tomarse con cautela ya que no se ha incluido disponibilidad de reservas. Por otra parte, la extracción de varios minerales requiere agua y el efecto de la disminución de recurso hídrico tampoco ha sido incluido en el modelo (DNP, 2010).

³² DNP, 2010. Análisis de los Impactos Económicos del Cambio Climático para Colombia utilizando un Modelo de Equilibrio General Computable Subdirección de Desarrollo Ambiental Sostenible – DNP. Bogotá, Colombia

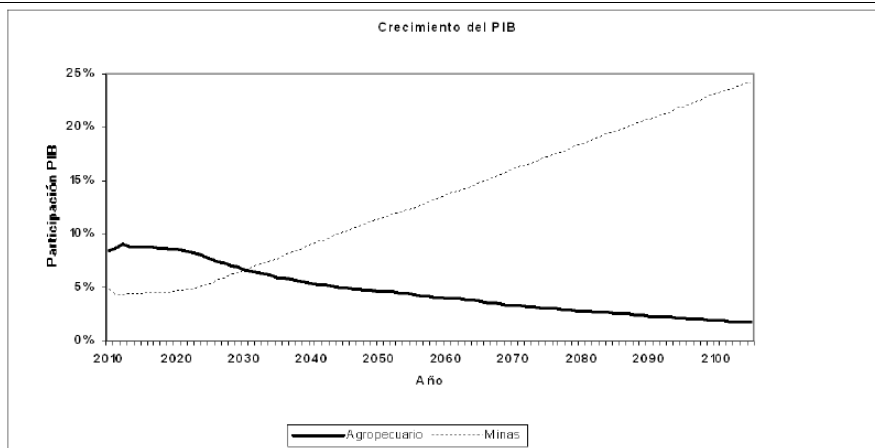


Figura 8. Participaciones de los sectores en la producción con choque de CC en el escenario A1B

El DNP concluye que el modelo MCGE presenta muchas limitantes, por ejemplo no tiene en cuenta la topografía y se toma a Colombia como una sola región, el modelo no incluye destrucción de capital por desastres naturales, ni impactos sobre salud, mortalidad, provisión del recurso hídrico ni biodiversidad, además el modelo contiene dos funciones de pérdidas aplicables a Estados Unidos donde la tecnología y la estacionalidad climática difiere de la de Colombia (DNP, 2010).

Sin embargo actualmente el Departamento Nacional de Planeación (DNP) está desarrollando el “Estudio de Impactos Económicos del Cambio Climático en Colombia” (EIECC), el cual tiene como objetivo evaluar los impactos del CC, estimar sus costos, y evaluar posibles medidas de adaptación. Este estudio tendrá el apoyo del CIAT especialmente en el tema de los efectos del CC en la Ganadería, Recurso hídrico y Biodiversidad a través del modelamiento con *Decision and Policy Analysis*(DAPA) para analizar y estimar el impacto. Para el sector ganadero se seleccionaron las zonas con más número de cabezas de ganado en el país, zonas lecheras y zonas de mayor extensión de pasturas. Para el caso de los forrajes utilizarán la herramienta DSSAT. Respecto a la Biodiversidad trabajarán con plantas nativas de importancia para el sector farmacéutico, alimenticio y cosmético en sectores de Amazonas, Caquetá, Putumayo y Chocó; en este tema el DNP trabajará con MaxEnt (Modelo de máxima entropía). En el tema de recursos hídricos evaluarán la agricultura de riego específicamente la de caña de azúcar, a través del modelo SWAT ((*Soil and Water Assessment Tool*) en las cuencas de Fraile, Guavio y Fuquene. El DNP aplicará los modelos de equilibrio general computable MCGE, de enfoque espacial para la evaluación de efectos del cambio climático³³.

³³ 2012. El DNP y CIAT, midiendo el impacto del cambio climático en Colombia. Ganadería, Recurso Hídrico y Biodiversidad.



IV. Impacto del Cambio Climático en el sector agropecuario

Conociendo los impactos del Cambio climático de los efectos físicos y atmosféricos investigados por la comunidad científica, es preciso aquí mencionar cuales son los efectos directos sobre los cultivos y plantas en base a los escenarios climáticos que proyectan modificaciones en los patrones de precipitación y de temperatura del aire.

En términos generales, los rendimientos de muchos cultivos, podrían disminuir significativamente por las mayores temperaturas, como consecuencia, por ejemplo, del estrés térmico e hídrico, del acortamiento de la estación de crecimiento y de la mayor presencia de plagas y enfermedades. Las producciones animales también se verían afectadas, por el impacto del cambio climático en la productividad de las pasturas y forrajes y según sus requerimientos específicos. (PROCISUR).

Una de las actividades económicas sobre la que más se resentirán los efectos del calentamiento global es la agricultura. Adams y otros (1988) destacan entre los efectos principales: la modificación en los cultivos debido a un incremento atmosférico en la concentración de CO₂; mayor probabilidad de un incremento en la población de plagas, y ajustes en las demandas y ofertas de agua para irrigación. Como resultado se espera que la productividad de algunos cultivos importantes disminuya. (CEPAL, Costa Rica, 2010).

Los efectos directos sobre los procesos fisiológicos en las plantas, debido al aumento en la concentración de CO₂, han sido demostrados y sus consecuencias sobre el crecimiento, desarrollo y producción vegetal han sido evaluadas con diferentes modelos (Rabbinge et al., 1993).

Efectos en la agricultura por la concentración de CO₂ y aumento de temperatura del aire

Según Tubiello un incremento en el Dióxido de Carbono elevaría la tasa fotosintética de las plantas y por consiguiente incrementaría el rendimiento. El incremento directo de la tasa de fotosíntesis de las plantas C₃ (trigo, arroz, papa, soya, frijol) resulta de dos propiedades de la enzima Rubisco (ribulosa 1,5-difosfato carboxylasa) que fija el CO₂ en esos cultivos. La enzima no se satura con la concentración actual de CO₂, por lo que un incremento en su concentración incrementará la velocidad de carboxylación (fijación de CO₂) y la fotosíntesis neta (Long et al., 2005). Además el CO₂ es un inhibidor competitivo de la reacción de



oxigenación, la cual conduce a la fotorrespiración, ésta comúnmente libera 20 a 40% de los productos de la fotosíntesis como CO₂.

Altas temperaturas del aire pueden detener la fotosíntesis, evitar la fertilización de los óvulos de las plantas e inducir a una deshidratación; en las plantas C₃ la tasa máxima de fotosíntesis está entre temperaturas de 20 y 32°C, a temperaturas superiores la tasa muestra una declinación y al alcanzar los 40°C, cesa enteramente, a esta temperatura la planta se encuentra en shock térmico, buscando la manera de subsistir (Brown, 2003).

De otra parte el periodo más vulnerable del ciclo fenológico es cuando ocurre la fertilización; el Instituto Internacional de Investigación del Arroz de México reporta que la fertilidad del arroz cae de 100% a 0% de 34% a 40°C; en el caso del maíz cuando hay temperaturas mayores de 36 °C se presenta reducción en la viabilidad del polen³⁴.

Salazar & Mejía indican que según (Peng et al. (2004) para el cultivo del arroz para el cual se ha determinado que durante la floración un aumento de un grado centígrado en la temperatura entre 30 y 40°C, reduce la fertilidad y la formación de grano en 10%.

Sin embargo las consecuencias del enriquecimiento de CO₂ y el aumento de la temperatura son positivas solamente bajo condiciones óptimas de crecimiento y considerando que la mayoría de los cultivos raramente se encuentran bajo condiciones óptimas de crecimiento, los beneficios por el enriquecimiento de CO₂ y aumento en la temperatura son mínimos (Rabbinge et al., 1993).

Tubielo et al. (2000) concluyeron que el incremento en la temperatura del aire, ocasionaría un aumento en la tasa de desarrollo fenológico, reduciendo el periodo de desarrollo y crecimiento que a su vez reduciría el rendimiento total del cultivo.

El cambio climático también ocasionará la reducción de las interacciones ecológicas del tipo mutualista entre las plantas y los polinizadores naturales, debido a los posibles cambios fenológicos ocasionados por la concentración de CO₂ en la atmósfera. Estas alteraciones en los ciclos fenológicos disminuirían los recursos florales disponibles para las especies polinizadoras entre un 17 y un 50%. La reducción de la coincidencia temporal entre plantas y polinizadores, no sólo causará la reducción en la dieta disponible de los insectos polinizadores sino que originará tanto su extinción como la de diversas especies vegetales (Memmott et al, 2007).

De otra parte se calcula que sólo el 17% de los fertilizantes nitrogenados producidos en 2005 fueron asimilados por los cultivos, dispersándose el resto por los ecosistemas y provocando grandes problemas de contaminación y de emisiones (Erisman, JW., et al. (2008).

Recientemente se planteó que los cálculos del IPCC de emisiones de N₂O de la agricultura podrían estar infravalorados de forma importante, habiendo subestimado unas 3-5 veces las emisiones de N₂O procedentes de los cultivos. De resultar cierto este dato, el

³⁴ Salazar & Mejía. Efectos del cambio climático en el rendimiento de los cultivos. U. de Gto. México.



impacto de la agricultura industrial sobre el cambio climático sería mucho mayor (Crutzen, P.J., et al. (2007).

Otros efectos en la agricultura por cambio climático según la FAO³⁵:

- Sería menos previsible el clima en general, lo que complicaría la planificación de las actividades agrícolas.
- Podría aumentar la variabilidad del clima, ejerciendo más presión en los sistemas agrícolas frágiles.
- Los extremos climáticos –que son casi imposibles de prever- podrían hacerse más frecuentes.
- Aumentaría el nivel del mar, lo que sería una amenaza para la valiosa agricultura de las costas, en particular en las islas pequeñas de tierras bajas.
- La diversidad biológica se reduciría en algunas de las zonas ecológicas más frágiles, como los manglares y las selvas tropicales.
- Las zonas climáticas y agroecológicas se modificarían, obligando a los agricultores a adaptarse, y poniendo en peligro la vegetación y la fauna.
- Empeoraría el actual desequilibrio que hay en la producción de alimentos entre las regiones templadas y frías y las tropicales y subtropicales.
- Se modificaría espectacularmente la distribución y cantidades de pescado y de otros productos del mar, creando un caos en las actividades pesqueras establecidas de los países.
- Avanzarían plagas y enfermedades portadas por vectores hacia zonas donde antes no existían.

Varios autores coinciden en que los efectos del CC pueden ser más graves especialmente para las economías campesinas o para los agricultores de subsistencia ubicados en ambientes frágiles que por lo general se ubican en países en vías de desarrollo, donde se esperan grandes cambios en productividad. Hay preocupación por áreas donde la agricultura de subsistencia es la norma, porque la disminución de tan solo una tonelada de productividad podría llevar a grandes desequilibrios en la vida rural (Jones y Thornton 2003)

Respecto a las tendencias en los escenarios de cambio climático un estudio global (Parry et al., 2004) indica que bajo el escenario de mayor calentamiento (HadCM3 SRES A1 F1) y si los efectos del CO₂ no son considerados, los cereales podrían reducir hasta un 30% de su productividad en el 2080. Sin embargo, si se incluyen los efectos del CO₂, los cambios de rendimientos podrían variar entre reducciones del 30% en México e incrementos del 5% en Argentina.

Otro estudio (Jones y Thornton, 2003) indica que los pequeños productores de maíz podrían esperar reducciones promedio del rendimiento del orden del 10 %, con fuertes variaciones regionales. Otro impacto negativo del cambio climático, en este caso sobre el cultivo del café, sería la disminución de las zonas aptas para su cultivo en Brasil. Por su parte, la productividad

³⁵ FAO, 1997. La agricultura y los cambios climáticos la función de la FAO



de las pasturas en zonas templadas (región pampeana de Argentina y Uruguay) se incrementaría entre un 1 y un 9% (Giménez, 2006).

De un modo general, los estudios específicos por país y por cultivo muestran importantes diferencias en las predicciones, asociadas a los MCG, o escenarios incrementales utilizados, el período y el escenario socioeconómico considerado, la inclusión del efecto CO₂ y la localidad. Otras incertidumbres derivan de la inexactitud de los modelos y de procesos no modelados. A pesar de la variabilidad de las proyecciones de rendimiento, aparecen comportamientos.

Para algunos expertos aumentar la habilidad del pronóstico no es la panacea, particularmente porque los pronósticos tienen asociados ineludiblemente incertidumbres, difíciles de comunicar y que dificultan su inclusión en la toma de decisiones por parte de los productores. Además, la situación de los costos de las semillas, créditos, situación del mercado y competencia, para citar algunos factores, pueden influir de manera determinante en la toma de decisiones, aun cuando se emitiera un pronóstico excelente. Conde C., Ferrer R. Gay C. & Araujo R.³⁶

1) Sector agrícola en Colombia

Según el comunicado de prensa del DANE sobre el Producto Interno Bruto - Cuatro Trimestre y Total Anual 2011, durante el año 2011 la economía colombiana creció en 5,9% con relación al año 2010. De igual forma, el PIB creció en 6,1% en el cuarto trimestre de 2011 comparado con el mismo trimestre del año anterior³⁷.

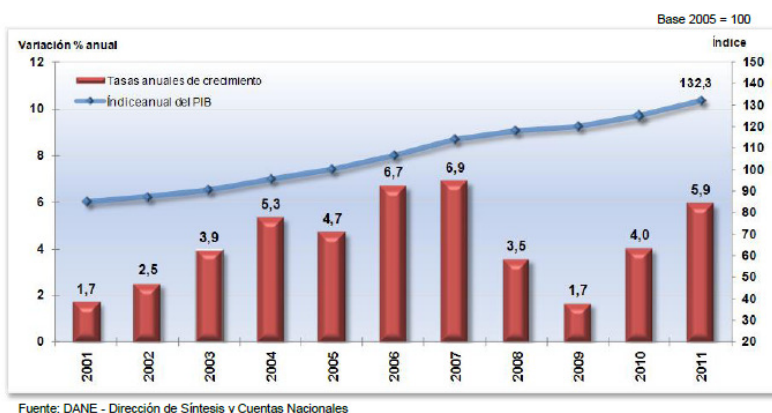


Figura 9. Crecimiento anual del Producto Interno Bruto en el periodo 2001 – 2011. Fuente: DANE, 2012

³⁶ Conde C., Ferrer R. Gay C. & Araujo R. Impacto del cambio climático en la agricultura de México.

³⁷ DANE, 2012. comunicado de prensa del DANE sobre el Producto Interno Bruto - Cuatro Trimestre y Total Anual 2011. Bogotá.



El Ministerio de Agricultura indica que el crecimiento del sector agropecuario durante el 2002 al 2010³⁸, ha permitido ampliar las áreas sembradas del país, aumentar la producción en toneladas de alimentos y ha disminuido el desempleo en el sector rural, es así que el sector mantuvo un crecimiento promedio anual de 3%, jalonado principalmente por el grupo de otros agrícolas, el sector pecuario y la pesca. En 2006 y 2007 con la entrada en vigencia del programa Agro, Ingreso Seguro, MADR logró las tasas de crecimiento más altas de la última década que alcanzaron niveles de 4%, reflejando la mayor inversión en el campo mediante el desarrollo de obras de infraestructura, riego y drenaje y un mayor acceso a recursos de financiamiento que estimularon el crecimiento de la producción. En 2009 el crecimiento fue inferior al promedio, apenas con un 1,0%, asociado a eventos de variabilidad climática (MADR, 2010). Según el DANE el comportamiento del sector en el último trimestre de 2011 registró una caída de -2,0% explicada por la disminución de café (-27,2%), flores (-25%), banano (-5,9%) y palma de aceite (-1,9%). Los anteriores sectores mostraron reducciones significativas debido a las afectaciones de los rendimientos de cultivo por afectaciones sanitarias y caídas en las exportaciones.

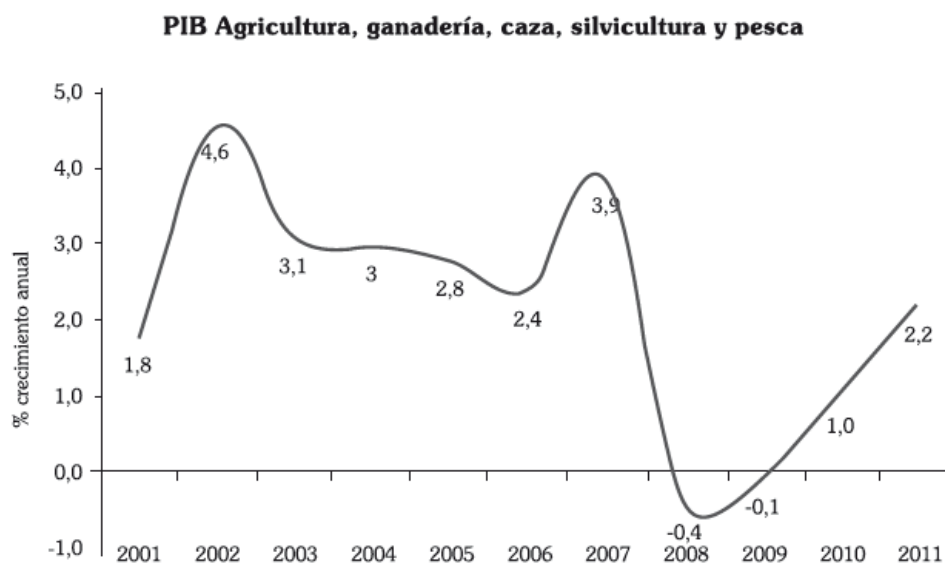


Figura 10. Comportamiento trimestral PIB Agricultura, ganadería, silvicultura y pesca. Fuente: DANE, 2012.

El MADR en convocatoria en el 2008, incluyó el tema Agricultura y Cambio Climático, en la cual, de los 38 proyectos que se presentaron por valor de \$5.285 millones, el MADR cofinanció 14 proyectos (6 en manejo sanitario y fitosanitario y 8 en manejo de suelos y aguas), cuyo valor total asciende a \$11.269 millones (MADR, 2010). Estos proyectos buscan investigar los efectos del cambio climático, la posibilidad de mitigación de sus efectos mediante la reducción de emisiones de GEI en el sector ganadero, sistemas de monitoreo y alerta temprana, evaluación de la compactación, riego con caudales reducidos y análisis energético de la cadena de la caña. Adicional a la anterior inversión el MADR impulsó la conformación de la Red de

³⁸ Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2010. Balance de Gobierno Logros y Retos del Sector Agropecuario 2002 – 2010.



Cambio Climático y Seguridad Alimentaria, en los que se incluye facilitar el intercambio de información y el uso de metodologías para generar escenarios de impacto del clima y evaluar sus implicaciones sobre los factores de producción y conservación ecosistémica además de promover el desarrollo de sistemas de alerta temprana para anticipar el efecto de variaciones climáticas extremas, tendencias de cambio climático e implementar medidas de adaptación (MADR, 2010).

Respecto a la obtención de semillas entre 2006 y 2010 la producción de semillas certificadas alcanzó 224.224 toneladas, entre semilla de algodón (826 toneladas), maíz (13.247 toneladas), frijol (123 toneladas), arroz (164.078 toneladas), papa (30.128 toneladas), sorgo (1.850 toneladas) y soya (14.172 toneladas) (MADR, 2010).

Sin embargo los análisis del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de la República de Colombia desde el segundo semestre del 2009, indican que el sector agropecuario colombiano viene padeciendo graves afectaciones por causas de índole climático. La intensidad del Fenómeno de El Niño hacia finales del 2009 e inicios del 2010 y de La Niña, la cual fue considerada como muy fuerte en los últimos 30 años e impactó a finales del 2010 e inicios del 2011, ocasionó pérdidas económicas importantes en el país. (MADR, 2011).

Según el documento de Perspectivas Agropecuarias Primer semestre 2011 “...se estima que a causa del Fenómeno de La Niña a febrero de 2011 se tenga en todo el país más de 1.000.000 hectáreas agropecuarias afectadas, de las cuales 800.287 hectáreas corresponden a área agropecuarias inundadas en todo el país, y alrededor de 200.000 hectáreas consideradas con afectaciones por exceso de humedad. Las mayores afectaciones se tuvieron en arroz, plátano, yuca, café maíz, palma africana y algodón”. (MADR, 2011).

Según las estadísticas Del MADR el invierno, que inició a mediados de 2010, tuvo efectos negativos sobre la agricultura reflejada en una caída de la producción a comienzos de 2011. Las inundaciones y el exceso de humedad incrementaron los problemas fitosanitarios, que en el caso de la palma y el café propiciaron la propagación de la pudrición del cogollo y de la roya respectivamente³⁹.

Los cultivos agrícolas se vieron afectados a causa de las inundaciones o los deslizamientos de tierra. El sector acuícola presentó daños en la infraestructura con la consecuente pérdida de millones de alevinos. El sector pecuario resultó afectado con la muerte de bovinos y las dificultades para la alimentación del ganado.

Respecto al cultivo del café, la caída en la producción cafetera se dio a partir del segundo trimestre de 2011 como consecuencia del Fenómeno de El Niño, la baja fertilización por encarecimiento de los abonos, y de la renovación de cafetales que suman 300.000 hectáreas en los últimos 3 años, que no están en etapa productiva (MADR, 2012).

³⁹ MADR. 2012. Perspectivas agropecuarias, primer semestre de 2012.



Los efectos del invierno en términos de daños a la infraestructura de producción, deslizamientos en zonas de ladera, exceso de humedad que retarda la floración de los cafetales, y dispersión de plagas y enfermedades como la roya, hicieron que la producción de 2011 cerrara en 7,8 millones de sacos, 18% por debajo de lo proyectado a principio del año (MADR, 2012).

Según el MADR, en los cultivos de ciclo corto, resalta el aumento en la producción de hortalizas (13%), papa (6,5%), y maíz (62,8%), tendencia que persistente desde 2010, debido a la percepción de buenos precios por parte de los productores y a programas de apoyo como el Plan País Maíz. La producción de arroz creció 0,9%, presentando una caída en los rendimientos hasta del 35% en la costa Atlántica y los Llanos Orientales, debido a la baja luminosidad en las áreas sembradas (MADR, 2012).

La sabana de Bogotá se vio gravemente afectada por inundaciones. La producción de leche disminuyó 3,8% por los efectos del invierno en algunas cuencas lecheras de Cundinamarca y Boyacá. Los ganaderos de Ubaté y Chiquinquirá tuvieron que buscar tierras altas, debido a los desbordamientos de la laguna de Fúquene y del río Suárez, que inundaron más de 5.000 hectáreas (MADR, 2012).

Al parecer está ocurriendo lo que la comunidad científica proyectó en años anteriores, Mendelsohn mencionó en el 2000 que “se ha estimado que un incremento de 2°C en la temperatura representaría una pérdida del 1.3% del PBI del sector productivo de América Latina” (Mendelsohn et al., 2000). En Colombia el sector agrícola particularmente viene perdiendo participación en el PIB total de la economía.

2) Adaptación al cambio climático y acciones de mitigación.

El 1992, los Gobiernos del Mundo adoptaron la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (Framework Convention on Climate Change CMNUCC), la cual fue el primer paso para abordar los problemas ambientales a los que se enfrenta el mundo. Esta convención ha tenido como uno de sus primeros logros establecer un inventario nacional de gases de efecto invernadero. Más tarde, en 1997, los gobiernos avanzaron en la toma de nuevas medidas y adoptaron el Protocolo de Kyoto. Este protocolo establece objetivos vinculantes para los países industrializados, con el fin de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. (CEPAL, Nicaragua)

Son muchas las medidas de adaptación que se están desarrollando en todos los países del mundo para mitigar los efectos del cambio climático, la mayoría se enmarcan y orientan en la adopción del CMNUCC y en los documentos generados por el IPCC. Varios casos se describirán en los siguientes informes.



PROCISUR constituido por los países del cono sur de Suramérica han propuesto varias opciones para reducir los impactos del CC en la agricultura:

- Utilizar la zonificación agroecológica para la elección de cultivos y fechas de siembra y cosecha apropiadas, considerando sus requerimientos térmicos e hídricos
- Introducción de nuevas variedades de cultivos y forrajes y reubicación de cultivos
- Manejo del suelo
- Mejoramiento e instalación de nuevas prácticas de manejo de los recursos hídricos y de los sistemas de riego, incluyendo la generación de nuevas fuentes de agua
- Ajustes en el control de plagas y enfermedades.
- Utilizar modelos de simulación de cultivos para evaluar los impactos y las medidas de adaptación a ser utilizadas.

Algunos ejemplos concretos de medidas sugeridas de adaptación son (Magrín G., 2007):

- Anticipar las fechas de siembra de trigo y maíz en la región Pampeana de Argentina y usar cultivares de ciclo más largo, para aprovechar los mayores períodos de crecimiento esperados.
- Cambios en las fechas de siembra de maíz y soja en el sur de Brasil y en Uruguay para evitar impactos negativos.

Sin embargo, resultados de investigaciones recientes sugieren que muchos agricultores especialmente los de subsistencia, se adaptan e incluso se preparan para el cambio climático, minimizando las pérdidas en productividad mediante la mayor utilización de variedades locales tolerantes a la sequía, cosecha de agua, policultivos, agroforestería, desyerbe oportuno, recolección de plantas silvestres y una serie de otras técnicas.

V. DESCRIPCIÓN DE MODELOS AGROMETEOROLÓGICOS

En este informe se hará una breve descripción de los modelos agroclimáticos más utilizados en el mundo para la simulación de diversas variables de los cultivos. En el próximo informe se hará un análisis más detallado de los modelos buscando las ventajas y limitaciones y algunos ejemplos de resultados para aplicarlos a nuestro país, lo que hace parte de las actividades de la fase 2.

1) Modelación de cultivos

A partir de la década de los ochenta, se han desarrollado una serie de modelos de simulación para varios cultivos: ALSIM (Alfalfa), GOSSYM (Algodón), CERES (Cebada, Maíz, Trigo, Sorgo, Arroz, Millo, Pasto), AUSCANE (Caña de Azúcar, Girasol), POTATOE (Papa), CROPGRO (Soya, Maní, Frijol, Garbanzo, Tomate, Pasto), CROPSIM-Cassava (Yuca), CANEGRO (Caña de azúcar), OILCROP-SUN (Girasol), SUBSTOR (Yuca, Ñame, Piña, Papa), SOYGRO, GLYCIM (Soya), PNTGRO (Maní), BEANGRO (Frijol), SUCROS (Crecimiento de cultivos) (Jones, et al., 2003;



Jones, et al., 2001; Ritchie, 1998; Scott C. y Chapman, 1993; Meira y Guevara, 1999; Whisler et al., 1986)⁴⁰.

Existen dos tipos de simulación de cultivos. La modelación científica ayuda a comprender el comportamiento del cultivo, su fisiología y su respuesta a los cambios ambientales. La modelación ingenieril es más funcional, basada en una mezcla bien establecida de teoría y relaciones empíricas robustas para apoyar la toma de decisiones.

En Colombia las técnicas de simulación de crecimiento de los cultivos han sido poco utilizadas. En Suramérica, países como Chile a través de AGRIMED, Argentina con INTA y Brasil con EMBRAPA ha adaptado modelos rendimiento por su mayor capacidad tecnológica e investigativa.

1. MODELO DNDC

Dependiendo del propósito y objetivos del modelo de cultivo se puede distinguir dos grandes enfoques científico o explicativo, Ingenieril o descriptivo. El modelo Desnitrificación - Descomposición (Denitrification - Decomposition / DNDC) es un modelo de simulación de los ciclos de carbono y nitrógeno en los suelos, según principios biogeoquímicos, en diversos agro-ecosistemas. El modelo puede ser utilizado para predecir el crecimiento del cultivo, la temperatura del suelo y los regímenes de la humedad, la dinámica del carbono del suelo, la lixiviación de nitrógeno y las emisiones de gases como el óxido nitroso (N_2O), el óxido nítrico (NO), nitrógeno (N_2), amoníaco (NH_3), el metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2)⁴¹.

Modelo DNDC - Versión 9.3, fue desarrollado por el Instituto de Estudios de la Tierra, los Océanos y el Espacio de la Universidad de New Hampshire – Estados Unidos. Este modelo funciona bajo Windows y ha sido usado y calibrado en países como China, India, Nueva Zelanda y Vietnam, entre otros (Mendez et al., 2009; Donna L et al 2010; Giltrap et al 2010; Cheng-I et al ,2005 y Saggat S. et al., 2004). Como todo modelo, DNDC requiere el ingreso de diversos parámetros y variables para su funcionamiento, como información de clima, información sobre el suelo, e información de la gestión agrícola.

El modelo DNDC consta de cinco sub -modelos que interactúan entre sí: Termo-hidráulico, Descomposición aeróbica, Desnitrificación, Fermentación y Crecimiento de la planta (que contiene sub-rutinas para el manejo de las prácticas del cultivo; tales como la rotación de cultivos, laboreo, riego, fertilización inorgánica y orgánica a través de la adición de estiércol). (Díaz, 2012). DNDC necesita datos diarios de las variables

⁴⁰ Ospina. J. 2006. Validación del modelo DSSAT en diferentes condiciones agroecológicas de Colombia, una herramienta para optimizar las prácticas de manejo del cultivo del maíz. Tesis de Magister en Ciencias Agrarias con Énfasis en Plantaciones Agrícolas Tropicales. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Medellín, Colombia.

⁴¹ Díaz. E. 2012. Modelación agrometeorológica de emisiones de Óxido Nitroso en *Brachiaria humidicola* bajo condiciones del Valle del Sinú. Tesis de Maestría en Meteorología. Universidad nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.



temperatura máxima, temperatura mínima en °C, radiación solar en MJ/m²/día y precipitación en cm.

Como beneficio según Díaz (2012), el modelo DNDC sería muy útil para acelerar la aplicación de los conocimientos disponibles a nivel de campo, para la optimización de la gestión agronómica, la cuantificación de las emisiones de GEI con el cambio de uso de la tierra, y el desarrollo de opciones de mitigación de gases de efecto invernadero para las emisiones.

2. DSSAT

DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) por sus siglas en inglés, es un modelo predictivo, determinístico, diseñado para simular el crecimiento del maíz, la dinámica del nitrógeno en el suelo, el comportamiento del agua y la temperatura a escala de campo; también se utiliza en investigación básica y aplicada sobre los efectos del cambio climático global (Ospina J. 2006). El modelo DSSAT (Sistema de Apoyo para la toma de Decisiones en la Transferencia Agrotecnológica) consta de seis módulos para simular el crecimiento de 16 cultivos de importancia económica y ha demostrado alta confiabilidad bajo distintas condiciones de clima, suelo y manejo (Jones 1993 citado por Giraldo et Al, 1998).

Funciones: (1) organizar y archivar bases de datos de clima, suelos, cultivos, experimentos y precios (2) simular producción de cultivos en una o varias épocas y en secuencias; (3) calibrar respecto a resultados experimentales (4) evaluar diferentes prácticas de manejo (Jones 1993 citado por Giraldo et Al, 1998).

Datos de entrada: Datos del cultivo, del suelo y de clima. El mínima set de datos se refiere a los datos requeridos para correr los modelos de cultivo y evaluar la simulación situación del cultivo (Datos de clima para analizar la duración del cultivo, perfil del suelo y datos de superficie del suelo, datos de manejo del cultivo para el experimento, datos experimentales observados). Los mínimos de datos climáticos requeridos incluyen: latitud y longitud de la estación climática, valores diarios de radiación solar, máxima y mínima diario de la temperatura del aire y lluvia total diaria.

De otra parte DSSAT contiene varios módulos dependiendo del cultivo:

CROPGRO: Vegetales, legumbres, algodón.

CERES: Maíz, arroz, trigo, sorgo

IXIM: Maíz

SBUSTOR: Módulo de crecimiento de papa

AROID: Módulo de crecimiento de plantas de tubérculo

CROPSIM: Módulos de crecimiento de la planta de Casava y trigo

CANEGRO: Módulo de crecimiento para caña de azúcar.

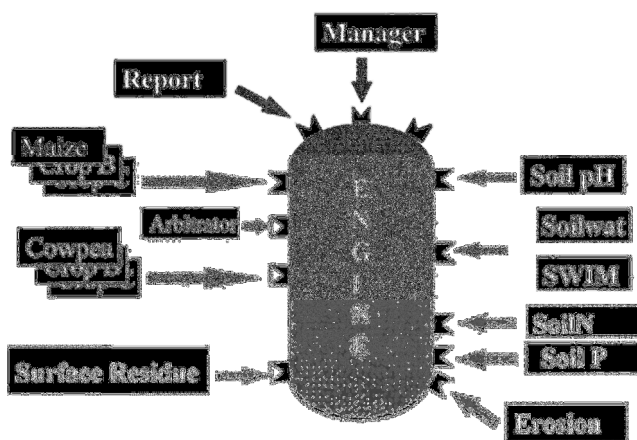
CASUPRO: Módulo de crecimiento para caña de azúcar.

3. APSIM - Agricultural Production Systems Simulator

APSIM es una estructura modular de modelamiento que ha sido desarrollado por Unidad de investigación de sistemas de producción agrícolas en Australia. APSIM fue desarrollado para simular los procesos biofísicos en sistemas campesinos en particular donde hay un interés en los resultados de la economía y la ecología de prácticas de manejo están de cara al riesgo climático.

Este módulo incluye diversos rangos de cultivos, pasturas y árboles, procesos del suelo incluyendo balance hídrico, Transformaciones de Nitrógeno y de fósforo, pH del suelo, erosión y rango completo de controles de manejo. APSIM ha sido usado en un amplio rango de aplicaciones, incluyendo soporte para la toma de decisiones agrícolas, diseños de sistemas de agricultura, evaluación del valor del pronóstico de clima estacional, análisis de cadenas de suministro en actividades de agronegocios, directrices de manejo de desarrollo de pruebas, evaluación de riesgo para elaboración de políticas del gobierno y como guía para investigación.

El siguiente es la representación diagramática de la estructura del módulo de simulación APSIM con módulos individuales y de suelo, módulos de interfaz y motor de simulación:



4. CROPWAT

CropWat es una herramienta de apoyo a las decisiones desarrollada por la División de Tierras y Aguas de la FAO. CROPWAT 8.0 para Windows es un programa de computación que puede ser usado para el cálculo de los requerimientos de agua de los cultivos y de sus requerimientos de riego en base datos climáticos y de cultivo ya sean existentes o nuevos. Además, el programa permite la elaboración de calendarios de riego para diferentes condiciones de manejo y el cálculo del esquema de provisión de agua para diferentes patrones de cultivos.



En general CropWat ejecuta las siguientes funciones:

- Entrada mensual, década y diario de datos climáticos para el cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET_o)
- Compatibilidad hacia atrás para permitir el uso de la base de datos CLIMWAT
- Posibilidad de estimar datos climáticos en la ausencia de valores medidos.
- Cálculo decadal y diario de las necesidades hídricas de los cultivos basado en algoritmos de cálculo actualizadas incluyendo el ajuste de valores de los coeficientes de cultivo
- Cálculo de las necesidades hídricas de los cultivos y la programación de riego para el arroz y el arroz de secano, utilizando un procedimiento recientemente desarrollado para calcular las necesidades de agua, incluyendo el período de preparación de la tierra.
- Uso interactivo para ajustar horarios de riego.
- Balance diario de agua suelo en tablas.
- representaciones gráficas de los datos de entrada, los requisitos de agua de los cultivos y los horarios de riego
- fácil importación / exportación de datos y gráficos a través de portapapeles o archivos de texto ASCII

5. CROPSYST

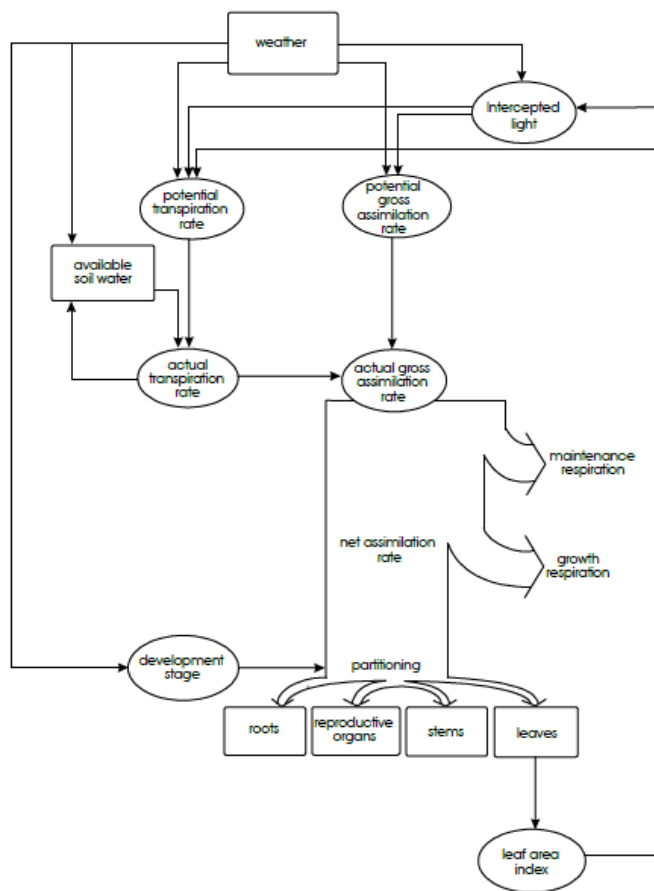
CropSyst (Modelo de Simulación de Sistemas de cultivo) es un modelo de simulación de crecimiento de multi-cultivo, multi-anual, el cual fue desarrollado con énfasis en una interfaz fácil de usar, y con un enlace al software SIG y un generador de tiempo (Stockle, 1996). Aún está en desarrollo el enlace de modelos de análisis económico y el riesgo. El objetivo del modelo es servir como herramienta analítica para estudiar el efecto del manejo de sistemas de cultivo en la productividad de los mismos y el medio ambiente. Para ello, CropSyst simula el balance hídrico del suelo, nitrógeno suelo-planta, fenología del cultivo, follaje del cultivo y crecimiento de las raíces, la producción de biomasa, rendimiento de los cultivos, la producción de residuos y la descomposición, erosión del suelo por el agua, y el destino de los plaguicidas. Estos se ven afectadas por las características del suelo, clima, características del cultivo, cultivo y las opciones de gestión del sistema que incluyen la rotación de cultivos, selección de variedades, riego, fertilización nitrogenada, la aplicación de pesticidas, el suelo y la salinidad del agua de riego, las operaciones de labranza y manejo de residuos.

6. WOFOST

WOFOST⁴² es una herramienta para el análisis cuantitativo del crecimiento y producción de los cultivos anuales. El crecimiento del cultivo es simulado en base a los procesos ecofisiológicos. La mayoría de procesos son de desarrollo fenológico, asimilación de CO₂, transpiración, respiración, división de asimilados de varios órganos y formación de materia seca como se ve en la figura.

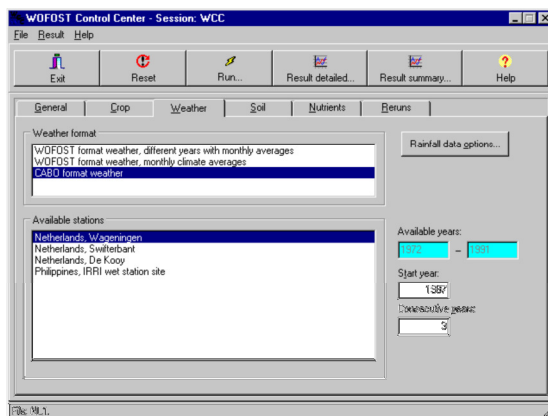
El crecimiento potencial y de agua disponible es simulado dinámicamente, con un tiempo de un día. La producción es calculada estadísticamente con base a las características de suelo y la disponibilidad hídrica.

El núcleo del submodelo de crecimiento del cultivo de WOFOST ha sido tomado del modelo SUCROS (Spitters et al., 1989; Van Laar et al., 1992). La producción limitada de nutrientes es calculada de acuerdo a los principios del modelo QUEFTS (Janssen et al., 1990).



⁴² H.L. Boogaard & A.J.W. De Wit. 2011. User's guide for the WOFOST Control Center 1.8 and WOFOST 7.1.3 crop growth simulation model WOFOST Control Centre 1.8 and WOFOST 7.1.3. Alterra, Wageningen University & Research Centre, Wageningen

WFOST es un modelo dinámico y explicativo. Este simula el crecimiento del cultivo con tiempo de un día, basado en el conocimiento de procesos a bajo nivel de integración. Sin embargo algunas partes del modelo son descriptivas y/o estáticas. Un modelo explicativo consiste de una descripción cuantitativa involucrado den el principal proceso. Los módulos de WFOST corresponden a cultivo, clima, suelo y nutrientes, como se ve en la figura siguiente.



La versión 6.0 del modelo WFOST está siendo aplicada para la caracterización de la producción Potencial en Rusia por el Instituto de Suelos de Moscú. Adicional a las versiones principales de WFOST muchos modelos han sido elaborados, es el caso de SWACROP2 un modelo formado por la unión del módulo de cultivo de WFOST al modelo SWATRE de tasa de transpiración y agua suelo (Huygen, 1992).

De otra parte Groot en 1987 simuló las dinámicas del Nitrógeno en el cultivo y el suelo. Poels and Bijker (1993) desarrollaron el modelo TROPFOR para simular el crecimiento y el uso del agua de los bosques tropicales adaptando el WFOST 4.1. En los años 90's WFOST 6.0 fue incluido como módulo de cultivo en SWAP versión 2.0 e integrado al modelo para simulación de flujo de agua y crecimiento de la planta en ambiente de suelo-agua-atmosfera-planta. (Van Dam et al., 1997)

En el proceso de validación el crecimiento del cultivo observado como en la realidad puede ser comparado con los resultados de simulación. Esto suministra una impresión de la suficiencia de las predicciones de WFOST. Cuando ocurren diferencias se puede calibrar el modelo, así el modelo debería ser revisado contra un grupo independiente de observaciones. Un problema que ocurre al respecto es que hay un enorme número de parámetros mientras solo hay unos pocos que pueden ser validados en el tiempo.

Una limitante de WFOST y otros modelos de simulación de crecimiento del cultivo radica en que algunos parámetros son fijos donde en la práctica se sabe que varían, eso se asocia con la relación entre el estado de desarrollo (Passioura, 1996). Este problema aumenta cuando los procesos en un nivel bajo de integración no se conocen lo suficiente.



En la figura siguiente se observan los resultados de la producción potencia del cultivo en kg/ha.

```
**HOFOST version 7.1.3, release February 2011
RUNNAM -> WCC
OUTPUT -> file: ..\output\wcc.out
RERUNS -> no reruns

WEATHER-> name: Netherlands, Wageningen
           file: ..\meteo\cabowe\nl1. start year: 1987
RAIN -> belonging to weather station
CROP -> name: Winter wheat 101, M-U.K., Denmark
        file: ..\cropd\wwh101.cab
SOIL -> name: ECI-coarse
        file: ..\soild\eci.new
START -> fixed emergence date IDEM = 1

start waterbalance = -99 sowing date = -99 emergence date = 1

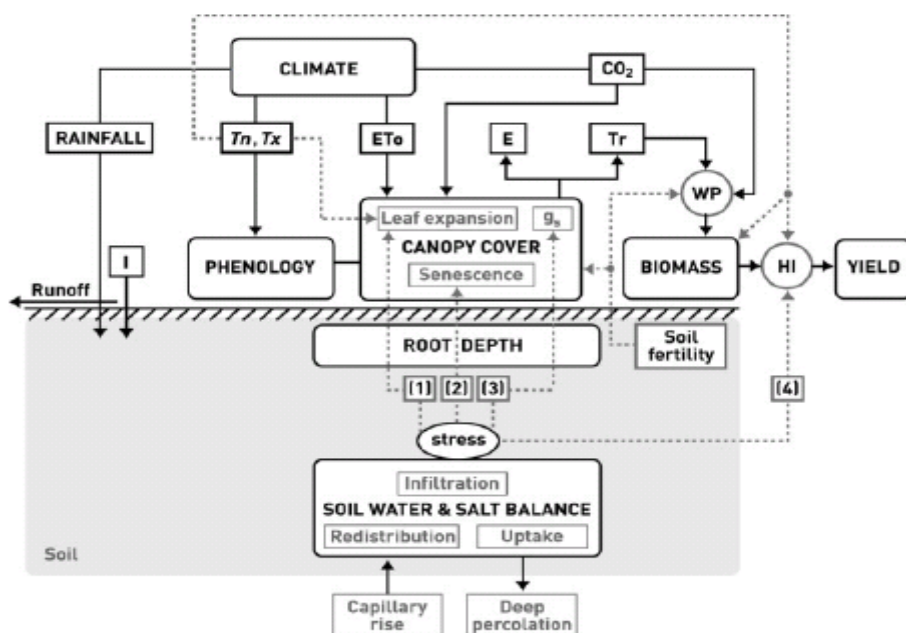
POTENTIAL CROP PRODUCTION
=====
DAY IDSEM DVS TSUM MLV WST WSO TAGP LAI TRA GASS MRES DMI
deg/d kg/ha kg/ha kg/ha kg/ha m2/m2 mm/d CH2O CH2O kg/ha/d
1 0 0.00 0. 68. 37. 0. 105. 0.14 0.02 1.4 1.1 0.2
51 50 0.07 67. 70. 38. 0. 108. 0.15 0.04 0.0 0.0 0.0
101 100 0.27 268. 173. 85. 0. 258. 0.37 0.32 39.4 2.7 25.1
151 150 0.78 781. 2755. 4391. 0. 7170. 5.84 1.08 220.1 63.7 104.3
169 168 1.00 1004. 2774. 7274. 532. 10780. 5.88 2.77 495.6 84.0 291.7
201 200 1.56 1538. 2316. 6846. 7446. 17695. 4.91 2.23 357.0 147.5 148.6
229 228 2.00 1957. 112. 3889. 8894. 19143. 0.24 0.27 10.1 10.1 0.0

SUMMARY:
HALT ANTH TWRT TWLV TWST TWSO TAGP HINDEX TRANSP TRC GASSST MREST
229 168 1231. 2974. 7274. 8894. 19143. 0.46 25.0 131. 39129. 9786.
```

7. AQUACROP

AquaCrop es un modelo descriptivo que simula la biomasa y el rendimiento potencial cosechable de un cultivo en respuesta a la disponibilidad de agua. AquaCrop es un modelo que estima el rendimiento de cultivos herbáceos donde se incluyen forrajes, vegetales, frutas, aceite, raíces y tubérculos. Este modelo fue desarrollado por la División de Tierra y Agua de la FAO y simula la respuesta en el rendimiento de acuerdo al agua transpirada por el cultivo, según el volumen de agua disponible en el suelo, estimado a partir de datos de lluvia y/o riego en el suelo; este modelo es muy útil cuando el agua es el factor limitante. Adicionalmente permite determinar épocas de siembra óptimas de acuerdo a condiciones de clima, suelos, cultivo y manejo agronómico. El motor del este modelo es el agua en donde la transpiración es trasladada dentro de la biomasa por medio de un parámetro denominado la productividad de agua que es la relación entre la biomasa producida en un metro cuadrado por un milímetro transpirado.

Según la FAO AquaCrop separa la transpiración del cultivo y la evaporación del suelo; desarrolla un modelo de crecimiento y senescencia de follaje (Canopy cover) como base para la estimación de la transpiración; donde el rendimiento final es una función de la Biomasa y el índice de cosecha. En la siguiente figura se observa el modelo conceptual de AquaCrop.



AquaCrop requiere de datos de entrada para cuatro módulos. El primero es el de clima (temperatura máxima, temperatura mínima, precipitación, vientos, radiación o brillo solar y humedad). El Módulo del cultivo requiere datos de fenología, raíces, índice de cosecha, Fecha de siembra, Densidad de Siembra y Desarrollo de follaje. El Módulo de manejo necesita información sobre irrigación y campo y por último el módulo de suelos requiere datos de variables hidrofísicas.

Este modelo se puede calibrar y validar en Colombia lo cual se ha hecho en varias zonas piloto, es útil para determinar fechas de siembra y puede establecer láminas de riego óptimas para el cultivo.

El modelo AquaCrop facilita los análisis del rendimiento del cultivo con base en las condiciones hídricas en determinados periodos de tiempo; ya sea en condiciones de secano ó con la lluvia estimada futura. Otra bondad del modelo es la de comparar los rendimientos reales de un año determinado en relación con lo esperado, bajo condiciones óptimas de humedad en el perfil del suelo. AquaCrop es útil como herramienta para diseñar, optimizar sistemas de riego estimando el aumento del rendimiento debido al agua adicional y su consecuente variación de rentabilidad en relación a la inversión requerida⁴³.

⁴³ (Díaz, Méndez y Bernal) 2012. Uso del modelo AquaCrop para estimar rendimientos agrícolas en Colombia, en el marco del estudio de impactos económicos del cambio climático (EIECC). FAO, IDEAM, MDVR, DNP.



8. MODELO ETO CALCULATOR

ET0 calculadora es un software desarrollado por la División de Tierras y Aguas de la FAO. Su función principal es la de calcular la evapotranspiración de referencia (ET₀) de acuerdo con las normas de la FAO. ET₀ representa la tasa de evapotranspiración de una superficie de referencia, la cual no le falta el agua. Un campo de pasto grande y uniforme se considera en todo el mundo como la superficie de referencia. El cultivo de referencia cubre completamente el suelo, se mantiene corto, bien regado y está creciendo activamente en óptimas condiciones agronómicas⁴⁴.

El software evalúa ET₀ a partir de datos meteorológicos por medio de la ecuación Penman-Monteith FAO. El programa puede manejar datos en escala de tiempo diarios, decadales y mensuales. Los datos se pueden dar en una amplia variedad de unidades y los datos especificados en los parámetros climáticos comúnmente utilizados pueden ser procesados. Cuando no hay datos de algunas variables meteorológica, se usan procedimientos para estimar datos faltantes a partir de los datos de temperatura o de condiciones climáticas específicas de acuerdo a las metodologías descritas en el informe de FAO N° 56; " Evapotranspiración del cultivo" (FAO; 2006). Incluso cuando el conjunto de datos contiene solamente la temperatura del aire máxima y mínima, aún es posible obtener estimaciones razonables de la ET₀.

9. SIMPROC

El modelo SIMPROC (Simulador de la Productividad de Cultivos, fue desarrollado por el centro AGRIMED de la Universidad de Chile) y fue utilizado en la Primera Comunicación Nacional de Cambio Climático. El modelo SIMPROC simula el crecimiento y producción de los cultivos, integrando los principales procesos ecofisiológicos y su regulación climática. Según Santibáñez el modelo lleva más de 20 años de desarrollo y validación. Ha sido aplicado en varios países con buenos resultados y es especialmente adaptado para la evaluación de los impactos de los cambios climáticos, gracias a que posee la capacidad de hacer simulaciones iterativas, probando el resultado de un cultivo en diferentes fechas del año, entregando un gráfico que permite conocer cuál fue la fecha de siembra más exitosa⁴⁵.

El modelo comenzó a desarrollarse en los 80, así es que su versión original es en DOS (Q-Basic), por lo que puede correr bien en sistemas operativos de 32 Bit. En 64 Bits se requiere de un emulador de 32. Existe una versión más reciente en Visual Basic pero que justamente estamos adaptando para climas tropicales donde las estaciones no son tan definidas.

⁴⁴ Ibíd.

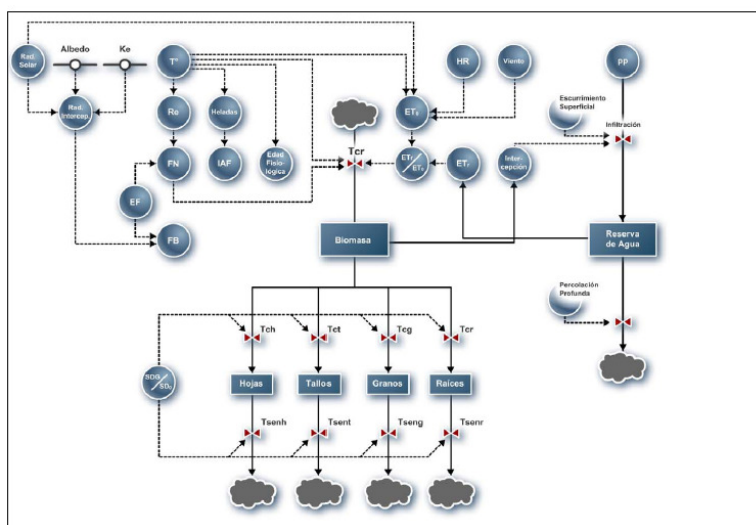
⁴⁵ Santibáñez. F. 2013. Comunicación personal por correo electrónico. AGRIMED, Chile.

Las variables de entrada que requiere el modelo son climáticas (temperatura máxima, temperatura, mínima, precipitación semanal, radiación solar, humedad relativa, evapotranspiración potencial) y variables ecofisiológicas como Temperaturas mínimas, óptimas y máximas de crecimiento, días-grado para el desarrollo y maduración, sensibilidad a heladas y al déficit hídrico por fases fenológicas, profundidad de raíces, eficiencia fotosintética, relación área-peso de las hojas, tasa de respiración de mantención y de crecimiento⁴⁶.

Variables de salida del modelo

Producción de materia seca, rendimiento de grano, frutos o parte cosechada, índice de área foliar, fecha de siembra y cosecha óptimas, consumo de agua, eficiencia productiva del riego y riesgos de heladas, de sequía y de estrés térmico en distintos momentos del año para cada especie.

A continuación se muestra un diagrama simplificado del modelo SIMPROC:



El modelo SIMPROC integra en el tiempo las respuestas ecofisiológicas de los cultivos frente a los estímulos climáticos. El crecimiento es simulado entre la emergencia y la cosecha. A partir de la interceptación de la radiación solar y del área foliar, simula en cada instante la producción fotosintética bruta. Una vez considerados los costos respiratorios se establece el potencial de producción de materia seca, proceso en el que influyen las temperaturas y la disponibilidad de agua en el suelo⁴⁷.

Mediante un balance hídrico del suelo se establece el grado de satisfacción de las demandas hídricas del cultivo, lo que a su vez, regula la velocidad del crecimiento. El modelo simula la fenología del cultivo a partir de la acumulación de días-grado,

⁴⁶ AGRIMED, 2008. “Impactos productivos en el sector silvoagropecuario de Chile frente a escenarios de Cambio Climático” Centro AGRIMED, Universidad de Chile. Chile

⁴⁷ AGRIMED, 2008. “Impactos productivos en el sector silvoagropecuario de Chile frente a escenarios de Cambio Climático” Centro AGRIMED, Universidad de Chile. Chile

variable de base para establecer en todo instante la edad fisiológica del cultivo. A partir de ésta, se modula el coeficiente de reparto del crecimiento entre los distintos órganos de la planta, así como su sensibilidad frente a eventos catastróficos como las heladas, el estrés térmico y la sequía. El área foliar del cultivo crece hasta que la fenología gatilla la senescencia, momento a partir del cual comienza a disminuir el área de hojas expuesta a la radiación solar y, con ello, la fotosíntesis hacia el final del ciclo⁴⁸.



Una de las mayores ventajas del modelo SIMPROC frente a otros modelos de cultivos, es que realiza la simulación de manera iterativa, es decir el modelo considera todas las fechas de siembra, para cada día del año, y escoge la fecha que maximice el rendimiento. El modelo entrega como resultado la fecha de siembra y de cosecha. Esto permite elegir la mejor siembra para informar el rendimiento potencial, a la vez que la fecha de siembra óptima. Esto se demuestra en el análisis que realizó AGRIMED sobre el efecto de rendimientos en cultivos bajo escenarios de cambio climático en Chile.

10. AMBER

El modelo AMBER fue desarrollado por Servicio Meteorológico alemán (DWD⁴⁹ por sus siglas en alemán) y es la principal herramienta para apoyar el pronóstico agrometeorológico.

AMBER proporciona información sobre el estado y evolución del desarrollo de enfermedades causadas por hongos y plagas de insectos, y es compatible con la planificación del trabajo de campo, mediante la indicación de condiciones de aplicaciones en tiempo favorable y la otra mediante la indicación de las condiciones agro-meteorológicas con de temperatura, evaporación y la humedad del suelo.

⁴⁸ *Ibíd.*

⁴⁹ DWD – Deutscher Wetterdienst – Servicio Meteorológico Alemán. 2012.



AMBER simula procesos físicos y biológicos en el suelo. Dependiendo del problema, calcula el clima existente. AMBER utiliza como parámetros de entrada las mediciones y las predicciones meteorológicas, así como los datos de tipo de suelo y la capacidad de campo.

Datos de entrada (resolución hora)

- Temperatura del aire
- RH
- Precipitación
- Velocidad del viento
- Radiación Global
- La radiación térmica cielo

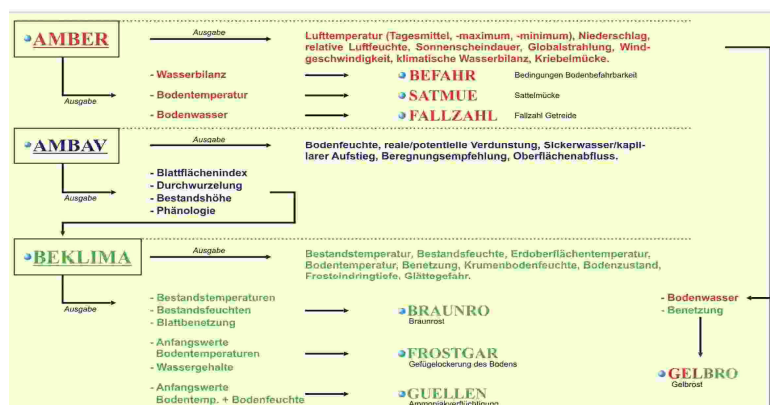
De entrada por el usuario los parámetros

- Suelo
- El desarrollo fenológico
- Cantidad de riego

Los datos de salida

- Evapotranspiración potencial
- Evapotranspiración real
- Humedad del suelo
- Agua de infiltración
- Interceptación

Existen varios módulos que dependerán de la variable que se va a analizar y del tipo de cultivos como se muestra en la figura siguiente.



11. BEKLIMA

Función de la medición de modelo BEKLIMA y cálculo de la temperatura del suelo y el contenido de agua. BEKLIMA es una variante de la AMBETI modelo, de acuerdo con DWD. BEKLIMA calculó los valores del estado del clima, la temperatura del suelo con respecto a la humectación de hoja. BEKLIMA también puede calcular a partir de la profundidad de



nieve, el agua de infiltración y la cubierta de nieve. Este modelo integra el balance de radiación y el balance hídrico.

BEKLIMA fue desarrollado en el Centro de Investigación agrometeorológico de Braunschweig es a la vez usado para fines de investigación, sino también para el uso de rutina dentro de la las funciones de agrometeorológica y asesoramiento.

Datos de entrada (resolución hora)

- Temperatura del aire
- RH
- Precipitación
- Velocidad del viento
- Radiación Global
- La radiación térmica

Los datos de salida

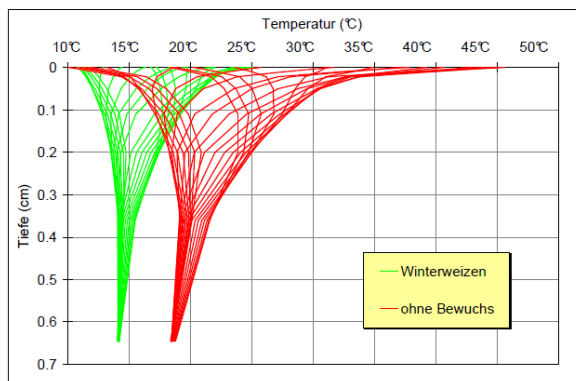
- Estado de clima (temperatura del aire, humedad relativa)
- Temperatura de la hoja, humectación de hoja
- Temperaturas en la superficie de la tierra
- La transpiración, evaporación del suelo
- Profundidad de la nieve
- Las temperaturas del suelo en varias capas
- Suelo contenido de agua en el suelo en varias capas (Humedad del suelo)
- Cantidad de nieve y cobertura agrícola
- Agua de infiltración

Parámetros de entrada definidos por el usuario

Tipo de suelo y la composición

- Vegetación (tipo, altura, área foliar, el estado, la distribución de la raíz)
- Los valores iniciales (la temperatura del suelo y el contenido de agua)

En el siguiente gráfico se observa la diferencia de temperaturas en el suelo a distintas profundidades para el cultivo de trigo de invierno y de vegetación.





VI. BIBLIOGRAFÍA

AGRIMED, 2008. “Impactos productivos en el sector silvoagropecuario de Chile frente a escenarios de Cambio Climático” Centro AGRIMED, Universidad de Chile. Chile

Altieri M & Nicholls C. 2008. los impactos del cambio climático sobre las comunidades campesinas y de agricultores tradicionales y sus respuestas adaptativas. Department of Environmental Science, Policy and Management, University of California. USA.

Conde C., Ferrer R. Gay C. & Araujo R. Impacto del cambio climático en la agricultura de México.

Crutzen, P.J., et al. (2007). “N₂O release from agro-biofuel production negates global warming reduction by replacing fossil fuels”. Atmos. Chem. Phys. Discuss., 7, 11191-11205.

Carrquiry M. 2011. Agricultura familiar y cambio climático en el Mercosur ampliado. Documento preparado por las Plataformas Tecnológicas Regionales de Agricultura Familiar y de Sustentabilidad Ambiental de PROCISUR, Santiago de Chile, Chile.

Erisman, JW., et al. (2008). “How a century of ammonia synthesis changed the world”. Nature Geoscience 1, 636-639

Díaz. E. 2012. Modelación agrometeorológica de emisiones de Óxido Nitroso en Brachiaria humidicola bajo condiciones del Valle del Sinú. Tesis de Maestría en Meteorología. Universidad nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.

Díaz, Méndez y Bernal. 2012. Uso del modelo AquaCrop para estimar rendimientos agrícolas en Colombia, en el marco del estudio de impactos económicos del cambio climático (EIECC). FAO, IDEAM, MDVR, DNP.

DANE, 2012. comunicado de prensa del DANE sobre el Producto Interno Bruto - Cuatro Trimestre y Total Anual 2011. Bogotá.

DNP, 2010. Análisis de los Impactos Económicos del Cambio Climático para Colombia utilizando un Modelo de Equilibrio General Computable Subdirección de Desarrollo Ambiental Sostenible – DNP. Bogotá, Colombia

DNP y CIAT 2012. Midiendo el impacto del cambio climático en Colombia. Ganadería, Recurso Hídrico y Biodiversidad.



Harmeling & Eckstein, 2013. Global climate risk index 2013. Who suffers most from extreme weather Events? Weather-related loss events in 2011 And 1992 to 2011. Germanwacht. Alemania.o, 1997

H.L. Boogaard & A.J.W. De Wit. 2011. User's guide for the WOFOST Control Center 1.8 and WOFOST 7.1.3 crop growth simulation model WOFOST Control Centre 1.8 and WOFOST 7.1.3. Alterra, Wageningen University & Research Centre, Wageningen

IFPRI, 2009. Instituto Internacional de Investigación sobre Políticas Alimentarias. Cambio Climático. El impacto en la agricultura y los costos de adaptación. Washington D.C.

FAO, 1997. La agricultura y los cambios climáticos la función de la FAO

Fernández M. 2009. Efecto del fenómeno El Niño en el agrosistema de papa y sus impactos socioeconómicos en los departamentos de Cundinamarca y Boyacá para el periodo de 1976-2006. Tesis para optar el grado de Magister en Meteorología. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.

IICA, 2012. Nota Técnica. Resultados del Foro USDA Agricultural Outlook 2012: Moving Agriculture Forward: Growing, Innovating, and Celebrating 150 Years. (Tercera entrega). Costa Rica.

IPCC, 2007. Climate Change 2007. Synthesis report. http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr.pdf

IPCC. Reporte cuarta comunicación de cambio climático

MADR. 2012. Perspectivas agropecuarias, primer semestre de 2012.

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2010. Balance de Gobierno Logros y Retos del Sector Agropecuario 2002 – 2010.

Mora. J et. al., CEPAL, 2010 en Efectos del cambio climático en la agricultura de Panamá. Unidad de Desarrollo Agrícola de la Sede Subregional de la CEPAL en México.

Moreno A. 2002. “Escenarios de Cambio Climático y Evaluación de sus Posibles Impactos en el Comportamiento Productivo del Cultivo del Arroz en la República de Panamá”. Tesis de Magister en Gestión y Planificación Ambiental. Universidad de Chile. Chile

Ordaz J & Ramírez D. 2010. Efectos del cambio climático en la agricultura de Costa Rica . Unidad de Desarrollo Agrícola de la Sede Subregional de la CEPAL en México.

Ospina. J. 2006. Validación del modelo DSSAT en diferentes condiciones agroecológicas de Colombia, una herramienta para optimizar las prácticas de manejo del cultivo del maíz. Tesis de Magister en Ciencias Agrarias con Énfasis en Plantaciones Agrícolas Tropicales. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Medellín, Colombia.



Segunda comunicación nacional ante la convención marco de las naciones unidas sobre cambio climático. Inventario nacional de emisiones, Gases de efecto Invernadero. 2009

Santibáñez. F. 2013. Comunicación personal por correo electrónico. AGRIMED, Chile.

Ramírez D. & Ordaz J. 2010 en “Efectos del cambio climático en la agricultura de Nicaragua”. Unidad de Desarrollo Agrícola de la Sede Subregional de la CEPAL en México

Rojas E. 2011. Evaluación del desarrollo del cultivo de papa bajo escenarios de variabilidad climática interanual y cambio climático, en el sur oeste de la Sabana de Bogotá. Tesis de Grado. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.

Rosegrant N. & et.al. 2009. Cambio Climático. El impacto en la agricultura y los costos de adaptación. Instituto Internacional de Investigación sobre Políticas Alimentarias (IFPRI, por sus siglas en inglés). Washington.

Salazar & Mejía. Efectos del cambio climático en el rendimiento de los cultivos. U. de Gto. México

Seo. N., & Mendelsohn R. 2007. An Analysis of Crop Choice: Adapting to Climate Change in Latin American Farms. Niggol Seo University of Aberdeen Business School, UK and Robert Mendelsohn School of Forestry and Environmental Studies, Yale University, USA.