

DIAGNÓSTICO DE MODELOS AGROCLIMÁTICOS

EVALUACION DEL RIESGO AGROCLIMÁTICO POR SECTORES

Abril de 2013

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

Mery Esperanza Fernández

Tabla de contenido

I.	DESCRIPCION DE MODELOS AGROMETEOROLOGICOS	1
II.	MODELACIÓN DE SISTEMAS AGRÍCOLAS	2
1.	MODELO DNDC	4
	Descripción del Modelo DNDC	4
	Parámetros de entrada	7
	Ventajas.....	7
	Desventajas	7
2.	DSSAT (Decisión Support System for Agrotechnology Transfer).....	8
	Parámetros de entrada	8
	Datos climáticos	9
	Datos del Suelo.....	10
	Manejo de datos y Experimento	10
	Contenido de los datos mínimos necesarios para la operación, calibración y evaluación del modelo CERES-Maíz (Hunt and Boote, 1998).....	12
	Estructura Modular del DSSAT	13
	Ventajas de DSSAT.....	16
	Desventajas de DSSAT	17
3.	APSIM - Agricultural Production Systems Simulator	17
	Historia de APSIM.....	17
	Estructura del modelo APSIM	18
	Aplicación de APSIM.....	19
	Predicción de rendimiento de los cultivos	20
	Política de distribución	20
	Desventajas	21
4.	CROPWAT	21
	Datos de Entrada	22
	Ventajas de CropWat	24
	Desventajas de CropWat.....	25
5.	CROPSYST	25

Objetivo de CropSyst.....	25
Módulos de CropSyst	25
Entradas del modelo CropSyst	26
Experiencias con CropSyst.....	27
6. WOFOST	27
Limitaciones de WOFOST	30
7. AQUACROP	30
Datos de entrada de AquaCrop.....	31
Media Anual del CO2 Atmosférico	33
Experiencias con AquaCrop en Colombia.....	34
Aplicaciones de AquaCrop.....	34
Ventajas de AquaCrop.....	35
8. MODELO ET0 CALCULATOR.....	35
Entrada de datos	36
9. SIMPROC.....	37
10. AMBER.....	39
11. BEKLIMA	40
Desventajas de AMBER Y BEKLIMA	41
12. AGROMET 2.9.0.3	42
Calculo de la radiación teórica extraterrestre.....	43
Programa de computo "COSOL".	43
FRIOLET / GDD.....	44
Siacer: sistema para la adaptabilidad de cultivos y estimación de rendimiento potenciales... 44	
Ventajas de Agromet 2.9.....	45
III. CONCLUSIONES	46
IV. INVENTARIO DE DATOS	46
V. BIBLIOGRAFÍA.....	47

EVALUACION DEL RIESGO AGROCLIMÁTICO POR SECTORES

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

SEGUNDO INFORME: DIAGNÓSTICO DE MODELOS AGROCLIMÁTICOS

CONTRATO DE COOPERACIÓN TÉCNICA CO-T1150

CONTRATO FONADE DE PRESTACION DE SERVICIOS No. 2130628

MERY ESPERANZA FERNANDEZ PORRAS

ABRIL 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 sobre el diagnóstico de los modelos más relevantes utilizados en países de América Latina, Europa y estados Unidos y de un análisis de las bondades y limitaciones de cada uno para la posibilidad de aplicación por parte del IDEAM. Este informe hace parte de las actividades 2 y 3 correspondientes al segundo mes.

I. DESCRIPCION DE MODELOS AGROMETEOROLOGICOS

En este informe se hará una descripción más a fondo de los modelos agroclimáticos utilizados frecuentemente en Latinoamérica y otros países del mundo para la simulación de diversas variables de sistemas agrícolas, su funcionamiento, que parámetros y variables requieren para su desempeño, así como sus ventajas y desventajas en la eventualidad de aplicarlos en Colombia.

Teniendo en cuenta el vertiginoso desarrollo y una óptima capacidad computacional, actualmente los investigadores entregan diversas y nuevas herramientas para el seguimiento de procesos, planificación y toma de decisiones en diferentes sectores nacionales. Una de ellas ha sido la modelación a través de programas que permiten describir la representación de un mundo real con cierto nivel de precisión pero sin llegar a duplicar lo existente en la realidad. Así un modelo es una representación simplificada de un sistema y un sistema es una parte bien delimitada del mundo real (Bandi, 2008). Siendo así el uso de la modelación en el sector agrícola surge como una alternativa en los procesos de planificación y como una herramienta para generar más investigación.

Dado que una de los objetivos de la agroclimatología es analizar las interacciones del sistema atmosfera- planta-agua-suelo, así como detectar y definir los factores del clima que limitan la producción agropecuaria también lo es la predicción del rendimiento de los cultivos y los posibles futuros comportamientos de las variables que pueden afectar positiva o negativamente a la planta, dando así una herramienta a los agricultores para la toma de decisiones en las diferentes etapas del cultivo y evitar pérdidas en su producción. Teniendo en cuenta la complejidad del sistema mencionado, el uso de los modelos de simulación tienen varias aplicaciones actuales y potenciales en respuesta a temas relacionados con la investigación, el manejo de cultivos y la planificación. Estos constituyen un elemento importante para tomar decisiones en la agricultura al cuantificar, interpretar y predecir las necesidades hídricas de los cultivos, el desarrollo de estos y sus rendimientos (Ruíz, 2005. Citado por Hernández & Soto, (2009). Sin embargo como indica (Guevara), la experimentación y las observaciones no pueden ser reemplazadas por los modelos, pero existe una estrecha relación entre ambos enfoques que hacen que tanto la experimentación y la investigación puedan enriquecer la comprensión y el conocimiento sobre el funcionamiento del sistema del cultivo. En varios países el sector agrícola ha venido incorporando el uso de modelación desde los servicios Meteorológicos, gremios productores y centros de investigación agrícola, impulsando a una mejor organización, planeación y producción como al fortalecimiento de estrategias de respuesta ante la emergencia causada por eventos extremos climáticos que impactan de manera significativa el sector.

Según Candelaria (2011), desde el enfoque de los agroecosistemas estos modelos se han usado para simular la sustentabilidad, bajo una visión holística y sistémica. Otra evolución importante ha sido considerar al productor como un sujeto que participa en la modelación y no como un componente más del sistema a modelarse, en el denominado modelaje participativo. En Colombia los procesos que se aproximan a este modelaje se orientan hacia las experiencias de cartografía participativa y de sistemas de alerta temprana participativa pero muy puntuales, los cuales se ven

limitados al momento de categorizar y sistematizar la información para la incorporarla en modelos de simulación.

La importancia de este informe es dar a conocer las características e importancia de algunos modelos agroclimáticos como herramienta principal en la toma de decisiones en las actividades agrícolas, especialmente en análisis de los rendimientos de un cultivo ante diversos manejos de suelo, de agua, de fertilización y ante el comportamiento de variables climáticas. El conocimiento previo en este capítulo del desempeño de los diversos modelos y las experiencias de los investigadores/entidades, permitirá una adecuada selección para la implementación del modelo de simulación objeto principal para el análisis de la producción y rendimiento en escenarios futuros de cambio climático.

II. MODELACIÓN DE SISTEMAS AGRÍCOLAS

Hacia la década de los años 50 aparecen los modelos de simulación de tipos descriptivos y matemáticos, en los años 60 aparece el concepto de sistemas dinámicos que incluyen la variable tiempo y que representaban el flujo de esos procesos y sus interacciones. En esta etapa W.G. Duncan de la Universidad de Kentucky y C.T. de Wit de la Universidad agrícola Wageningen, dos importantes precursores fueron quienes desarrollaron modelos como herramienta para explicaciones científicas, como por ejemplo sintetizar y mejorar la comprensión de procesos de intercepción de radiación y fotosíntesis, desarrollando modelos simples que consideraban únicamente la producción potencial relacionada con la radiación y la temperatura. En la década del 70 se formaliza aquel concepto de dinámica de sistemas y en los años 80 se refina mediante técnicas de computación la verificación, validación y evaluación de esos modelos. En esta última década aparecen los primeros modelos de simulación para los cultivos de maíz, soja, trigo y arroz, incluidos en el paquete DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) (Barrett, J. R. y Nearing, M. A. Citado por Guevara).

A partir de la década de los ochenta, se desarrollaron otra 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, Fríjol, Garbanzo, Tomate, Pasto), CROPSIM-Cassava (Yuca), CANEGRO (Caña de azúcar), OILCROP-SUN (Girasol), SUBSTOR (Yuca, Ñame, Piña, Papa), SOYGRO, GLYCIM (Soya), PNUTGRO (Maní), BEANGRO (Fríjol), 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)¹.

La aparición a mediados de los 90 de la tecnología informática permitió una mayor utilización de estos modelos para el estudio y resolución de problemas específicos como: desarrollo y

¹ 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.

crecimiento de los cultivos, evaluación de respuesta a la fertilización, estrategias de riego, situaciones de estrés, predicción de pérdidas por erosión, lixiviación de pesticidas, contaminación del ambiente, calentamiento global de la atmósfera, entre otros (Guevara).

En la última década según Tubiello y Ewert (2002), se han publicado más de 40 estudios de impacto climático en la agricultura empleando modelos de simulación. Estos autores concluyen que, en general, los modelos han ofrecido resultados bastante exactos, al compararlos con datos reales y señalan que entre los modelos más utilizados y convenientemente validados están los norteamericanos de DSSAT (Jones et al. 2003) y los desarrollados en la Universidad de Wageningen, Holanda (Van Ittersum et al. 2003). Recientemente ha venido teniendo reconocimiento el modelo AquaCrop desarrollado por la FAO.

Existen varios tipos de simulación de cultivos. La modelación científica ayuda a comprender el comportamiento del cultivo, su fisiología y su respuesta a los cambios ambientales, se podría decir que se incluye aquí la descripción de programas de simulación con base en modelación dinámica. La modelación ingenieril es más funcional, basada en una mezcla bien establecida de teoría y relaciones empíricas robustas para apoyar la toma de decisiones.

Según Candelaria Martínez et al. (2011) quienes analizaron los distintos enfoques de la aplicación de los modelos para el estudio y planificación agrícola, indican diversas clasificaciones en el mundo de la modelación, una de ellas está basada en las capacidades de representar la dinámica y control de los componentes e interacciones del sistema (Quinteros et al., 2006 citado por Candelaria (2011)). Según esta categorización los modelos son: 1) estáticos, cuando se representa un sistema en un solo instante de tiempo en particular, o bien para representar un sistema en donde el tiempo no es importante, por ejemplo, simulación Montecarlo; 2) dinámicos, representan sistemas en los que las variables son funciones del tiempo, permitiendo predecir su desarrollo en un periodo dado; este tipo de modelos es de gran importancia para representar procesos biológicos; 3) determinísticos, no consideran la variación estocástica, comportándose de manera probabilística, los datos de entrada y las relaciones existentes en el sistema son especificados al inicio, es decir, no influye el azar en los resultados; y 4) estocásticos, la modelación se realiza considerando que al menos una de las variables que definen el comportamiento del sistema se muestra aleatoria, es decir que predicen el valor previsto o una cantidad en términos de probabilidad de ocurrencia.

Existe también la modelación empírica que se basa en aproximaciones empíricas producto de la observación o experimentación y se pueden considerar como un conjunto de ecuaciones heurísticas (gr. Heurisko, hallar, experiencia); cada una de esas ecuaciones es usualmente la descripción estática de una relación entre el proceso considerado y las condiciones ambientales. Estos modelos representan un regreso al concepto de análisis de regresión, aunque en un nuevo nivel cualitativo; los modelos empíricos no son versátiles y pueden requerir mucho tiempo para identificar los parámetros de cada cultivo (Ramírez A. 2007). Para Ramírez (2007) estos modelos pueden tener menos capacidad predictiva porque predice cómo una variable afecta una respuesta y no por qué la afecta, no comprendiendo en su totalidad el sistema que se analiza.

Particularmente en Colombia se elaboró un trabajo por la Dirección Nacional de Planeación, DNP, sobre Modelaciones agroclimáticas para alimentar el modelo de equilibrio general (MEG) en el marco del “Estudio de Impactos Económicos del Cambio Climático en Colombia –EIECC”. En el

mencionado trabajo se utilizaron 8 modelos agroclimáticos de tipo empírico para los cultivos de algodón, arroz riego, maíz, papa, banano, café, caña azúcar y plátano. Boshell (2010) autor del estudio de DNP, aplica para cada cultivo un determinado modelo empírico para estimar la productividad y rendimiento haciendo una asociación de las variables climatológicas con los resultados.

La experiencia del uso de este tipo de modelación empírica llevo a encontrar las siguientes limitantes según el autor: 1) No considera factores como suelos, tecnología productiva, riego o drenaje, aspectos sanitarios, 2) Deficiencia en la calidad de los datos agrícolas y climáticos históricos (recolección, procesamiento y divulgación), 3) No considera de modo explícito el efecto de la “fertilización de CO₂” en los cultivos, que se está produciendo a raíz de los incrementos en las concentraciones globales de CO₂.

En Colombia las técnicas de simulación de crecimiento de los cultivos han sido utilizadas especialmente por los centros de investigación agrícola, haciendo uso de modelos existentes en el mundo, ya que en Colombia no se ha desarrollado un modelo de simulación propio. En Suramérica, países como Chile a través de AGRIMED, Argentina con INTA, Agromet en México y Brasil con EMBRAPA han desarrollado modelos de 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 de Desnitrificación - Descomposición (Denitrification - Decomposition / DNDC) es un modelo de simulación basado en los procesos de la bioquímica de carbono y nitrógeno 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 (N₂O), el óxido nítrico (NO), nitrógeno (N₂), amoníaco (NH₃), el metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂)².

EL 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 Saggar 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.

Descripción del Modelo DNDC

Este modelo tiene dos componentes, el primero incluye el clima del suelo, crecimiento del cultivo y descomposición de modelos, predicción de temperatura del suelo, humedad, pH,

² 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.

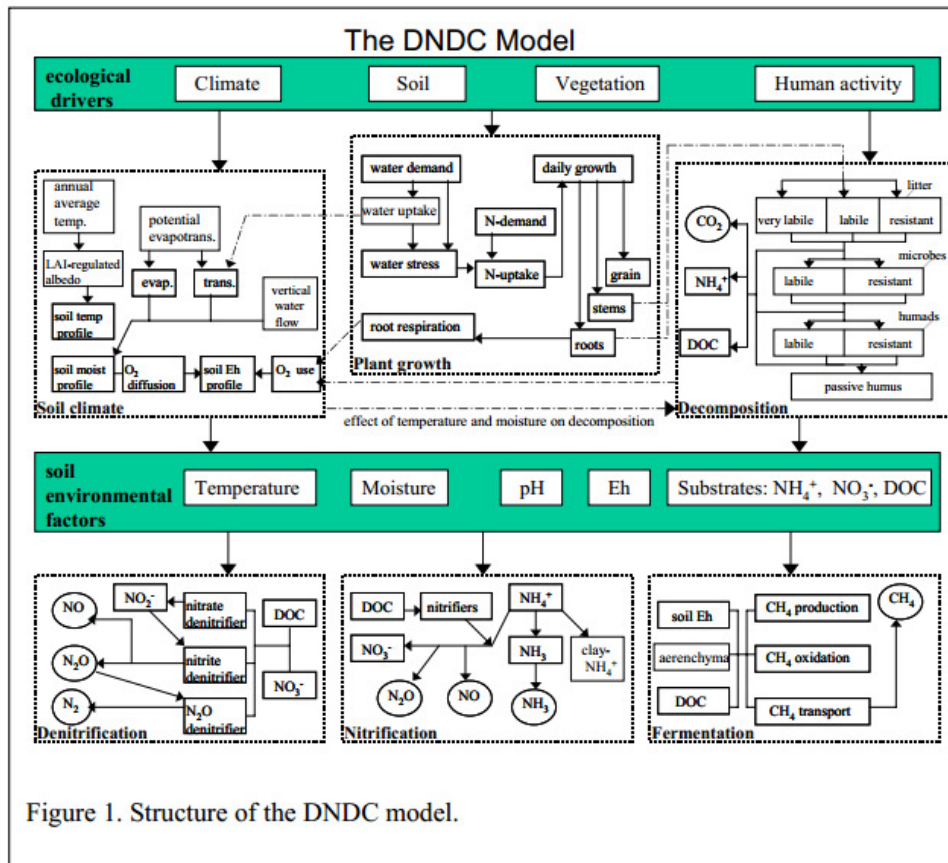
potencial de reducción(E_h)³ y perfiles de concentración de sustrato conducidos por conductores ecológicos (por ejemplo, clima, suelos, vegetación y la actividad antropogénica). El segundo componente, involucra la nitrificación, desnitrificación y submodelos de fermentación, predice emisiones de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), amoníaco (NH₃), óxido nítrico (NO), óxido nitroso (N₂O) y dinitrógeno (N₂) de los sistemas de planta-suelo. En este modelo se han utilizado leyes clásicas de la física, la química y biología, así como ecuaciones empíricas generadas a partir de los estudios de laboratorio, con el fin de parametrizar cada reacción geoquímica o bioquímica específica. El modelo completo forma un puente entre los ciclos biogeoquímicos de C y N y los principales motores ecológicos como se indica en la figura 1.

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

En el modelo DNDC, el carbono orgánico del suelo (SOC por sus siglas en inglés) se encuentra en cuatro grupos principales: residuos de la planta (es decir, basura), biomasa microbiana, humads (humus activos) y humus pasivos. Cada agrupación se compone de dos o tres sub-grupos con diferentes tasas de descomposición específicas. Tasa de descomposición diaria para cada subgrupo regulado por su tamaño, la tasa de descomposición específica, contenido de arcilla en el suelo, disponibilidad de N, temperatura del suelo y humedad del suelo. Cuando el carbono orgánico del suelo, SOC, se descompone en un grupo, el carbono descompuesto se pierde parcialmente en forma de CO₂ con el resto destinado a otros grupos SOC. El carbono orgánico disuelto (DOC por sus siglas en inglés) es producido como un intermediario durante la descomposición y puede ser inmediatamente consumido por los microbios del suelo. Durante los procesos de descomposición de SOC, el nitrógeno orgánico descompuesto parcialmente transfiere al grupo de materia orgánica próximo y es parcialmente mineralizado a amonio (NH₄⁺). La libre concentración de NH₄⁺ está en equilibrio con ambas, con la arcilla adsorbida NH₄⁺ y el amoníaco disuelto (NH₃). La volatilización de NH₃ a la atmósfera es controlada por la concentración de NH₃ en la fase líquida del suelo y sujeta a factores ambientales del suelo (por ejemplo, temperatura, humedad y pH). Cuando llueve el NO₃⁻ es lixiviado hacia las capas más profundas con el flujo de drenaje del suelo.

Un esquema cinético sencillo "Globo anaeróbico" en el modelo, predice el estado de aireación del suelo calculando el oxígeno o el contenido de otros oxidantes en el perfil del suelo. Basado en el potencial redox pronosticado, el suelo en cada capa es dividido en partes aeróbicas y anaeróbicas donde la nitrificación y la desnitrificación ocurren respectivamente. Cuando los globos anaeróbicos se incrementan, se destinarán más sustratos (por ejemplo, DOC, NH₄⁺, y óxidos de N) a las microzonas anaeróbicas para aumentar la desnitrificación.

³ El potencial redox es una medida (en voltios) de la afinidad de una sustancia por electrones en comparación con el hidrógeno (que se establece en 0). Las sustancias más fuertemente electronegativas que el hidrógeno (es decir, capaces de oxidar) tienen positivos potenciales de reducción. Sustancias menos electronegativas que el hidrógeno (es decir, capaces de reducir) tienen negativos potenciales redox.



Estructura del modelo DNDC. Fuente: DNDC

Cuando el globo anaeróbico se contrae la nitrificación se verá reforzada debido a la reasignación de los sustratos en las microzonas aeróbicas. Los gases NO y N_2O producidos en cualquiera nitrificación o desnitrificación están sujetos más a transformación durante su difusión a través de la matriz del suelo. A largo plazo (varios días a meses) la sumergimiento activará la fermentación, la cual produce sulfuro de hidrógeno (H_2S) y metano (CH_4), impulsados por la disminución del suelo Eh.

El crecimiento de las plantas desempeña un papel importante en la regulación del agua en el suelo y los regímenes de Nitrógeno, lo que podría afectar a más de una serie de procesos bioquímicos o geoquímicos presentes en el suelo. En DNDC se construyó un submodelo para simular el crecimiento de los cultivos. En DNDC se proporciona un grupo de parámetros que permite a los usuarios definir con precisión sus cultivos, incluyendo incremento de la biomasa, máxima cosecha, demandas de agua y N, y la capacidad de fijación de Nitrógeno. El crecimiento de los cultivos, se simulará orientado por la temperatura acumulada, el estrés del Nitrógeno, y el estrés hídrico diariamente. La fotosíntesis diaria modelada, la respiración, la asignación de Carbono, y la absorción de agua y N se han registrado para que los usuarios puedan comprobar los resultados modelados contra sus observaciones para asegurarse de que las plantas, que son el factor clave de la biogeoquímica del suelo, simulen correctamente.

Dado que todos los parámetros de cultivo están disponibles en la interfaz de entrada del usuario, los usuarios pueden modificar los parámetros en un modo rápido. La demanda del

cultivo para Nitrógeno se calcula basándose en óptimo crecimiento del cultivo diario y la relación de la planta C / N. La actual absorción de N por el cultivo puede verse limitada por la disponibilidad de nitrógeno o agua durante la estación de crecimiento. Después de la cosecha, toda la biomasa de raíces es dejada en el perfil del suelo, y una fracción definida por el usuario de los residuos de cosecha remanentes sobre el suelo permanecen como rastrojo en el campo hasta la siguiente labranza.

Parámetros de entrada

El modelo completo es impulsado por cuatro motores principales ecológicos, específicamente climáticos, suelo, vegetación y las prácticas agrícolas. Es intrínsecamente importante para un éxito de la simulación para obtener los datos de entrada adecuados y precisos acerca de los cuatro motores principales. Esta Guía del usuario proporciona información detallada para explicar cómo preparar los parámetros de entrada a través de la introducción de la interfaz, así como los estudios de caso.

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.

Más de 80 estudios se han realizado con el modelo DNDC en varios países de los cuales se pueden consultar en la página <http://www.dndc.sr.unh.edu>.

En Colombia solo se ha aplicado este modelo por E. Diaz, en su trabajo sobre “Modelación agrometeorológica de emisiones de Óxido Nitroso en Brachiaria humidicola bajo condiciones del Valle del Sinú” donde utiliza DNDC para calcular 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)⁴.

Ventajas

El modelo DNDC podría ser robusto en simulación de emisiones de gases de efecto invernadero especialmente el de N₂O sin embargo requiere alguna información detallada de características químicas del suelo que en laboratorios de Colombia aun no están disponibles para diversos tipos de cultivos.

Desventajas

Este modelo se ha aplicado solo para pasturas en el caso del trabajo de E. Diaz. , por lo que si se requiere aplicar en otros cultivos debe calibrarse. La calibración en Colombia se ve limitada por la ausencia de datos en campo y pocos experimentos de simulación en laboratorios y granjas experimentales.

⁴ 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

2. DSSAT (Decisión Support System for Agrotecnology Transfer)

DSSAT (Decisión Support System for Agrotecnology 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).

La liberación de DSSAT v4.5 incorpora cambios tanto en la estructura de los modelos de cultivos y la interfaz para los modelos y el análisis asociado y programas de utilidades. El paquete DSSAT incorpora modelos de 28 cultivos diferentes, con nuevas herramientas que facilitan la creación y gestión de experimental, el suelo y los archivos de datos meteorológicos. DSSAT v4.5 incluye mejoras en los programas de aplicación para la temporada, secuencia espacial y análisis de rotación de cultivos que evalúan los riesgos económicos y los impactos ambientales asociados con el riego, los fertilizantes y el manejo de nutrientes, la variabilidad del clima, el cambio climático, el secuestro de carbono en el suelo y el manejo de precisión.

Los modelos de cultivos requieren datos meteorológicos diarios, la superficie del suelo y la información del perfil, y manejo de cultivos detallado como entrada. Información genética de los cultivos se define en un archivo de especies de cultivos que lo provee DSSAT y la información del cultivo o variedad que debe ser proporcionada por el usuario. Las simulaciones son iniciadas o en la siembra o antes de la siembra a través de la simulación de un período de barbecho desnudo. Estas simulaciones se llevan a cabo diariamente y en algunos casos, horaria en función del proceso y el modelo de cultivo. Al final del día los balances de la planta y el agua del suelo, y de nitrógeno y carbono son actualizados, así como la etapa de desarrollo del cultivo vegetativo y el estado vegetativo del cultivo.

Funciones: (1) organizar y archivar bases de datos de clima, suelos, cultivares, 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).

Parámetros 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).

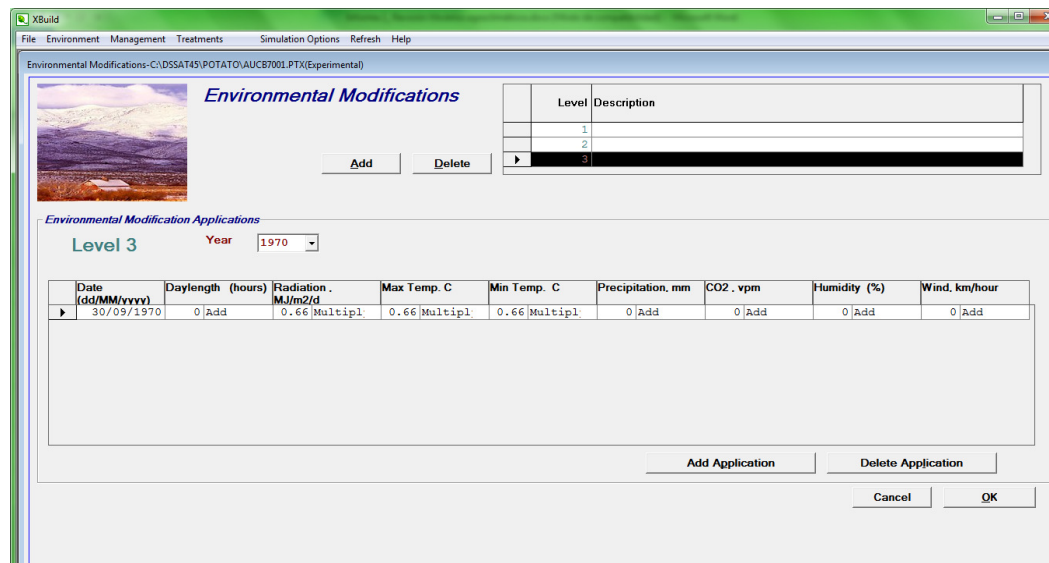
En la figura siguiente se observan los parámetros de entrada de información general que incluye información del usuario, tipo de análisis (Experimental, secuencia, espacial, estacional), información de mapeo y de cosecha.

Datos climáticos

El modelo DSSAT requerirá los siguientes parámetros climáticos además de la latitud y longitud de la estación climática como se ve en la siguiente figura de Environmental modifications.

- Valores diarios de radiación solar ($\text{MJ}/\text{m}^2\text{-día}$),
- Temperatura del aire máxima y mínima (C)
- Diario y lluvia total diaria (mm)
- Humedad (%)
- Viento (km/hora)
- CO_2 (vpm)
- Horas día

La duración de los registros del clima para la evaluación debe, como mínimo, cubrir el tiempo del experimento, se recomienda comenzar unas semanas antes de la siembra y continuar un par de semanas después de la cosecha con el fin de realizar un análisis tipo "what-if".



Datos del Suelo

Clasificación del suelo (SCS), pendiente de la superficie, el color, la permeabilidad y la clase de drenaje. Datos del perfil del suelo por horizontes del suelo son:

- Profundidad superior e inferior del horizonte (cm),
- Porcentaje de arena, limo y arcilla
- Densidad aparente⁵, barra de 1/3
- Carbono orgánico,
- pH en el agua,
- Saturación de aluminio
- Información de la raíz.

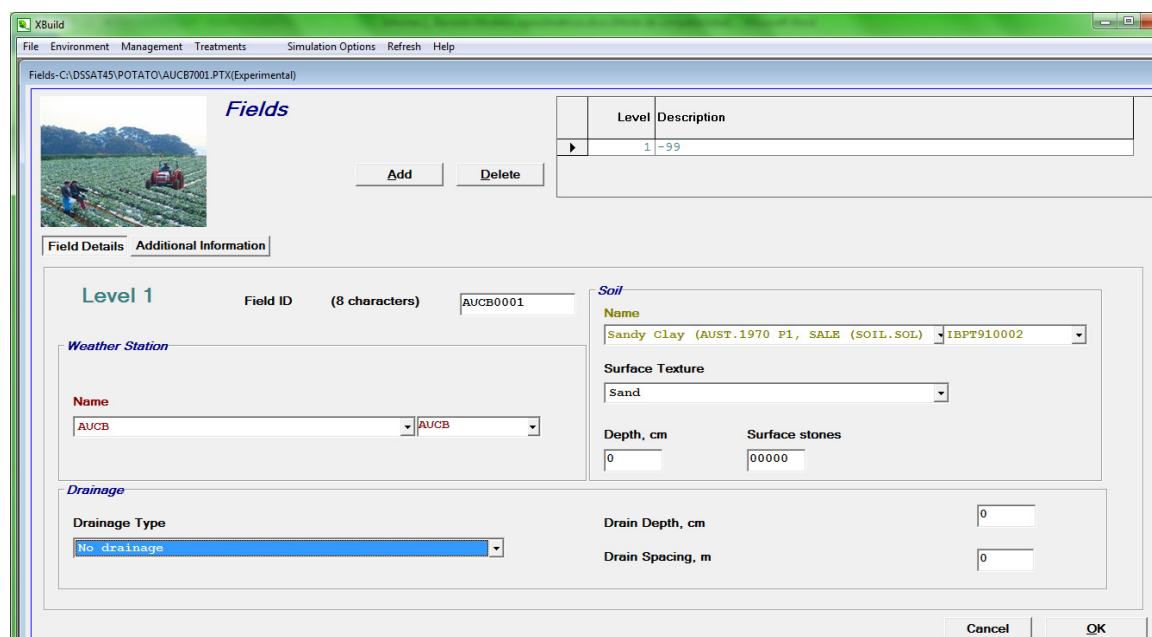
El modelo DSSAT tiene la opción de crear un nuevo perfil del suelo dependiendo de las características de una zona en particular. Estos perfiles de suelo requieren datos sobre las propiedades físicas y químicas, por ejemplo la clasificación del tipo de suelo, pendiente de inclinación del terreno, textura, color de la superficie del suelo, drenaje, número y profundidad de capas del perfil, contenido de nitrógeno total, carbón orgánico, nivel de pH en agua y en solución de cloruro de potasio, porcentaje de arcilla, arena y capacidad de intercambio catiónico, factor de crecimiento de la raíz, punto de marchitez permanente, punto de saturación y capacidad de campo.

Manejo de datos y Experimento

Gestión de datos incluye información sobre la fecha de siembra, fechas en las que las condiciones del suelo se midieron antes de la siembra, densidad de siembra, distancia

⁵ La densidad global ("bulk density" en inglés; a veces se denomina densidad aparente) es la masa por unidad de volumen de un material en su estado natural, incluyendo poros y todo tipo de espacios abiertos. Evidentemente, la densidad global de una sustancia, y más si es un suelo no compacto, es siempre menor que la real (de allí "global", "bulk", o "aparente") J. Antonio Vera, Catedrático de Estratigrafía de la Facultad de Geología de la Universidad de Granada. España. 2006.

entre líneas, profundidad de siembra, variedad de cultivo, tipo de drenaje, profundidades y espacio de drenaje, y las prácticas de fertilización. Estos datos son necesarios para la evaluación del modelo como lo muestra la figura.



Además de los datos del sitio, el suelo y el clima, los datos experimentales incluyen los datos de crecimiento del cultivo, el agua del suelo y medidas de fertilidad. Estos son los datos observados que son necesarios para la evaluación del modelo.

El modelo DSSAT requiere información para cada genotipo del cultivo de maíz y papa para calibrar el modelo, esto supone que se debe contar con la siguiente información. Para papa, coeficientes: G2: Tasa del área de expansión de la hoja, después de la iniciación del tubérculo (cm²/m² d); G3: Tasa de crecimiento potencial del tubérculo (g/m² d); PD: Índice que suprime el crecimiento del tubérculo durante el período que inmediatamente sigue a la inducción de tubérculo; P2: Iniciación de la sensibilidad a fotoperiodos largos; TC: Temperatura alta crítica para la iniciación del tubérculo (C)⁶.

Para el cultivo de Maíz: Coeficientes: P1: Tiempo térmico de emergencia de las plántulas hasta el final de la juvenil de la fase (expresado en días-grado por encima de una temperatura base de 8 ° C) durante el cual la planta no es sensible a los cambios del fotoperíodo; P2: Grado en el cual el desarrollo (expresado en días) se retrasa cada hora de incremento en el fotoperíodo por encima del más largo fotoperíodo en la que el desarrollo avanza a una velocidad máxima (se considera que 12,5 horas); P5: Tiempo térmico de emisión de estigmas a la madurez fisiológica (expresado en días-grado por encima de una temperatura base de 8 ° C); G2: Número máximo posible de granos por planta; G3:

⁶ 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.

Coefficiente de Velocidad de Llenado durante la etapa de llenado lineal del grano en condiciones óptimas (mg / día)⁷.

Contenido de los datos mínimos necesarios para la operación, calibración y evaluación del modelo CERES-Maíz (Hunt and Boote, 1998).

A - Para operar el modelo
1. Sitio
- Latitud y longitud, elevación, promedio de temperatura anual y promedio de la amplitud térmica anual.
- Pendiente y aspecto general del paisaje, drenaje, presencia de piedras en superficie.
2. Clima
- Radiación global diaria, temperatura máxima y mínima y precipitaciones.
3. Suelos
- Clasificación usando el sistema local y el sistema taxonómico del USDA-SCS a nivel de familia.
- Características básicas del perfil por cada capa de suelo u horizonte: determinaciones in situ curvas de retención hídrica (saturación, límite superior de drenaje (CC = Capacidad de Campo) y límite inferior (PM = Punto de Marchitez); densidad aparente, carbono orgánico; pH, factor de crecimiento de raíces, coeficiente de drenaje.
4. Análisis de suelos
- Mediciones en las capas superficiales del suelo de la densidad aparente, carbono orgánico, nitrógeno orgánico, pH, P y K.
5. Condiciones Iniciales
- Cultivo antecesor, raíces y cantidad de nódulos
- Agua, amonio y nitratos por capa de suelo.
6. Manejo
- Nombre del cultivar y tipo
- Fecha de siembra, profundidad y método, espaciamiento entre surcos y dirección, densidad de plantas
- Irrigación y manejo del riego, fechas, métodos de riego y cantidades o profundidades.
- Fertilización inorgánica.
- Residuos (fertilizante orgánico), material vegetal, profundidad de incorporación cantidad y concentración de nutrientes
- Aplicaciones de otros agroquímicos
- Labranza
- Esquema de Cosecha
B. Para la Calibración
Lo indicado anteriormente más:
7. Funcionamiento del cultivo:
- Fecha de emergencia
- Fecha de floración femenina
- Fecha de madurez fisiológica
- Área foliar y peso de la parte aérea de la planta en distintos momentos del ciclo.
- Rendimiento en grano expresado como materia seca

⁷ Méndez J. 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.

- Materia Seca total a cosecha o Índice de cosecha
- Peso unitario del grano en materia seca
- Número de granos por espiga o por planta
- Número de hojas producidas
- Porcentaje de nitrógeno en el grano
- Porcentaje de nitrógeno en el resto de la planta

Estos datos son necesarios tomando en cuenta los mismos cultivares y contemplando el mayor rango posible de condiciones ambientales. Dadas estas observaciones es necesario que desde los centros de investigación agrícola se generen datos estándares para entrada de los modelos agroclimáticos.

Estructura Modular del DSSAT

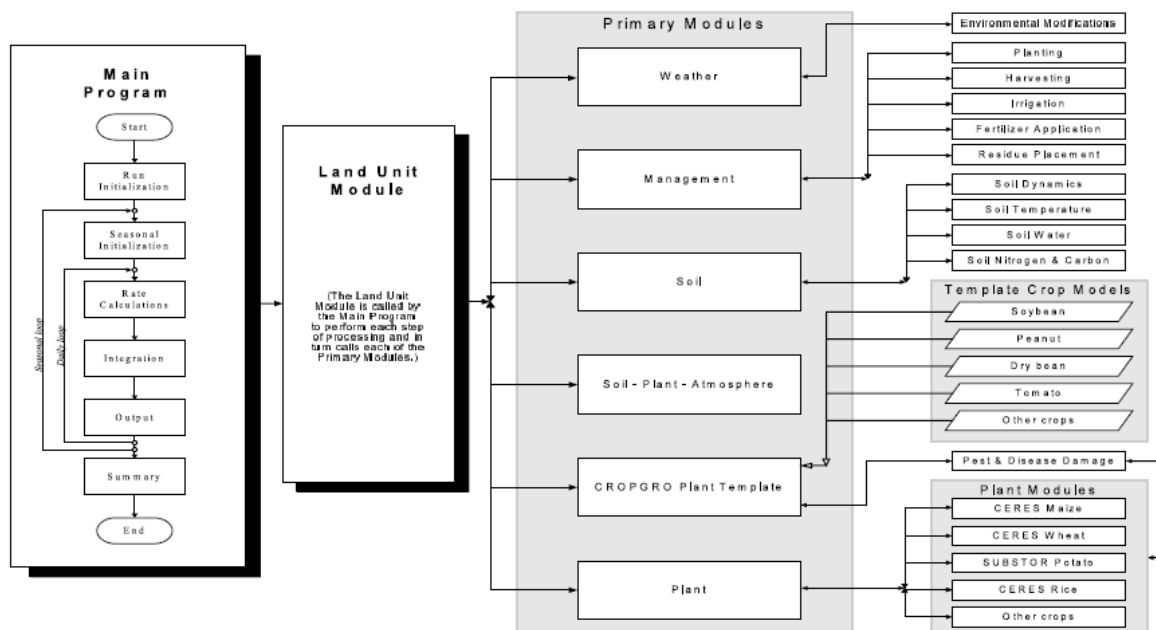
El DSSAT / CSM (Crop System Model por sus siglas en inglés) cuenta con un programa piloto principal, un módulo de unidad de tierra, y módulos para componentes primarios que aporte una unidad de tierra en un sistema de cultivo (Fig. 2). Los módulos principales son para el clima, el suelo, las plantas, interfaz de suelo-Planta- atmósfera, y los componentes de manejo. Estos componentes en conjunto describen los cambios en el tiempo del cultivo y del suelo que ocurren en una unidad de tierra simple en respuesta al agua y a las prácticas.

Cada módulo tiene seis fases, como se muestra en la figura. 2 (ejecutar la inicialización, inicialización estacional, cálculo de la tasa, la integración, salida y resumen de la salida). El programa principal controla cuando cada uno de estos pasos está activo y cuando cada uno módulo lleva a cabo la tarea que se requirió.

Hay distintos tipos de aplicaciones que se pueden ejecutar en DSSAT/CSM mediante el uso de diferentes modos para traer el módulo de unidad de tierra sobre una base diaria. El modo básico ofrece para el análisis de sensibilidad interactivo y comparación de los datos de campo simuladas vs. observada.

Un segundo modo de operación simula los cultivos sobre un número de años de clima utilizando las mismas condiciones iniciales del suelo. Este modo permite evaluar los efectos de la incertidumbre de las condiciones climáticas futuras en la toma de decisiones cuando todas las condiciones iniciales del suelo se conocen.

Un tercer modo opera los módulos del sistema de cultivo para simular la rotación de cultivos durante un número de años y las condiciones del suelo se inicializan sólo en el comienzo mismo de la simulación. Un cuarto modo opera el CSM para simular uno o más cultivos en un espacio (por ejemplo, para la agricultura de precisión, la gestión del uso del suelo y otras aplicaciones espaciales). En la figura siguiente se indican los módulos y submódulos que componen el modelo DSSAT.



Descripción de los componentes y estructura modular de DSSAT. Fuente: DSSAT⁸

Como se indica en la figura de la estructura de DSSAT el módulo de plantas contiene varios submódulos dependiendo del cultivo: Los módulos que simulan el crecimiento y rendimiento de las especies individuales. Cada uno es un módulo separado que simula la fenología, el crecimiento diario, demanda de nitrógeno y carbono de la planta, senescencia de material vegetal, etc.

CERES: Maíz, arroz, trigo, sorgo

IXIM: Maíz

SBUSTOR: Modulo de crecimiento de papa

AROID: Modulo de crecimiento de plantas de tubérculo

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

CANEGRO: Modulo de crecimiento para caña de azúcar.

CASUPRO: Modulo de crecimiento para caña de azúcar.

CROPGRO: Vegetales, legumbres, algodón.

Experiencias con DSSAT

DSSAT ha sido utilizado en varios estudios sobre efectos del cambio climático en los cultivos. M.A. Medany elaboró dos estudios uno en 2006 y otro en 2010⁹ usando DSSAT. En el primer trabajo usó este modelo para simular el rendimiento de papa en condiciones actuales con el fin de compararlos con datos medidos en campo en Egipto, como resultado

⁸ Jones, J.W., G. Hoogenboom, C.H. Porter, K.J. Boote, W.D. Batchelor, L.A. Hunt, P.W. Wilkens, U. Singh, A.J. Gijssman, and J.T. Ritchie. 2003. DSSAT Cropping System Model. European Journal of Agronomy 18 (2003) 235-265.

⁹ S.M. Attaher, M.A. Medany & A. El-Gindy, 2010. Feasibility of some adaptation measures of on farm irrigation in Egypt under water scarcity conditions. Agricultural Engineering Department, Faculty of Agriculture, Ain Shams University El Cairo, Egipto.

se encontró que no hubo diferencias significativas con los datos de campo. Para analizar el impacto del cambio climático se realizaron simulaciones en fechas de siembra diferentes, con varios niveles de irrigación utilizando escenarios de cambio climático para los años 2025, 2050, 2075 y 2100 y se realizaron comparaciones respecto de los rendimientos obtenidos para el año 2005, con el trabajo se determinaron los rendimientos e incrementos de los rendimientos, los niveles de irrigación y fechas de siembra en función de escenarios de cambio climático. En el segundo estudio analizó el cambio de los rendimientos de cultivos debido al cambio climático a través de DSSAT, versión. 4,0. Los modelos de simulación utilizados para los experimentos de cultivos estudiados fueron CERES-Maíz para la cosecha de maíz, CROPGRO para cultivo de tomate, patatas y SUBSTOR para la papa. Los datos de entrada utilizados en DSSAT fueron datos históricos del clima (promedio de 10 años) procedentes de 25 estaciones (EMA-CLAC-CAAE), y los datos de temperatura a escala reducida de A1 y B1 para escenarios 2025S, 2050 y 2100S (Attaher et al., 2006). Las implicaciones de los escenarios A1 y B1 del IPCC a las concentraciones de CO2 se utilizaron para estimar las concentraciones de los años 2050, 2025 y 2100.

De otra parte Abdrabbo (2010), utilizó el módulo SUBSTOR de DSSAT para simular procesos fisiológicos y el rendimiento del cultivo de papa ante escenarios de cambio climático. Para este fin tomó las salidas de dos modelos de circulación general (CSIRO y HadCM3), y el escenario de emisiones A1, para el año 2050 usando cuatro niveles de irrigación. El módulo SUBSTOR indicó disminuciones del rendimiento entre 11% y 13% en promedio respecto a las simulaciones de 2005 y diferencias en la respuesta de las dos variedades frente a los niveles de la irrigación.

CEPAL¹⁰ en su estudio sobre efectos del cambio climático en la agricultura, hizo uso del modelo de simulación DSSAT en Guatemala. Para el análisis de impacto del cambio climático en la producción de granos básicos se usó un modelo de simulación DSSAT-3 y la información generada por el IBSNAT (International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer, 1994). Las variables usadas para la construcción del modelo se agruparon en dos categorías como ya se mencionó, climáticas y del manejo del cultivo. Se tomó el 2030 y tres escenarios normal (ECCG_C), optimista (ECCG_HA, húmedo amplio; y pesimista (ECCG_SA, seco amplio) para el análisis de los escenarios para la vulnerabilidad de la producción de granos. Los impactos al cambio climático fueron derivados como las diferencias de la producción entre las proyecciones de las condiciones ambientales sin cambio climático (línea base) y las proyectadas en los escenarios de cambio climático.

Las diferencias de rendimientos en la producción simuladas de Guatemala según la línea base y las obtenidas por un cambio climático representaron las medidas de impacto. De los tres escenarios analizados se concluyó que la disminución en la producción en los granos básicos es más significativa en el escenario pesimista¹¹.

Particularmente en Colombia el modelo DSSAT ha tenido incipiente aplicación, solo han habido tres experiencias en su uso, la primera fue en el año 2000 con Olarte, quien realizó la validación del modelo SUBSTOR potato de la versión 3.5 de DSSAT, para las variedades

¹⁰ Mora J & Ramírez D. 2010. Efectos del cambio climático en la agricultura de Guatemala. Unidad de Desarrollo Agrícola de la Sede Subregional de la CEPAL en México.

¹¹ *Ibíd.*

de papa Tuquerreña y yema de huevo. En este trabajo se evaluaron las variables de crecimiento y desarrollo fisiológico en cada cultivar. La validación del módulo mostró un buen ajuste para las variables peso fresco de tubérculos, peso seco de tubérculos e índice de área foliar para las variedades mencionadas. Sin embargo, CORPOICA he elaborado cursos y ha aplicado el uso del DSSAT para su uso interno.

Forero y Garzón (2000), en Bogotá calibraron el módulo SUBSTOR de DSSAT para las variedades Diacol Capiro, Diacol Monserrate, Parda Pastusa e Ica Morita calculando y determinando los coeficientes genéticos G2, G3, P2 y PD de cada cultivo. La validación del modelo calibrado mostró diferencias mínimas entre los datos simulados y los observados en campo. La variable que mostró el mejor ajuste fue el rendimiento fresco, seguida del número de días hasta tuberización y hasta la madurez fisiológica, mientras que se observaron algunas diferencias en el IAF.

Respecto a análisis de rendimientos de cultivo frente a escenarios de cambio climático, el trabajo de Rojas E.(2011)¹² fue el primero en estudiar este tema. En su trabajo analizó el comportamiento de las condiciones climáticas en tres estaciones del sur occidente de la Sabana Bogotá a escalas intra e interanual. Mediante 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).

Ventajas de DSSAT

Según Méndez et al. (2012) el modelo DSSAT simula mejor las condiciones de requerimiento hídrico de la planta que AquaCrop para un experimento específico realizado para el cultivo de papa. El modelo AquaCrop inhabilita drásticamente el déficit hídrico, debido a que este modelo está en función del agua disponible y DSSAT está en función de la radiación y temperatura. De esta manera el modelo DSSAT es útil para hacer balance de nutrientes, y así generar un calendario de aplicación y dosis de fertilización, y para determinar zonas agroclimáticas a partir de los requerimientos de radiación y temperatura.

Para tener más información sobre comparaciones en el desempeño entre el modelo DSSAT y Aquacrop se puede remitir al documento de Méndez (2012)¹³.

¹² 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.

¹³ Méndez J. 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.

Desventajas de DSSAT

Una de las desventajas para la gran mayoría de los modelos de simulación agroclimatológica es que se deben ser construidos, calibrados y modelados para cada cultivo en particular en cada país, lo cual implica observaciones in Situ en granjas experimentales durante un periodo representativo. Dado que en Colombia es incipiente la información agronómica y edáfica, la fácil aplicación de los modelos se ve limitada.

De acuerdo al estudio de Rojas (2011), concluye que el modelo DSSAT no tiene en cuenta información química de suelos que es útil para el balance de nutrientes.

El modelo permite realizar los cálculos de simulación de rendimiento sin llenar los requerimientos de enmiendas o correcciones orgánica (concentración de Nitrogeno, Fosfor, Potasio, profundidad de incorporación, código del método de incorporación), irrigación y prácticas de manejo en general, lo cual puede influir en los resultados de salida de rendimientos. Es así que se traduce en una limitante la falta de información exacta para obtener mejores resultados.

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. APSIM es el producto de una asociación fuerte y duradera entre CSIRO, el Gobierno de Queensland y la Universidad de Queensland.

APSIM es un modelo de sistemas agrícolas que simula los efectos de las variables ambientales y las decisiones de gestión sobre la producción agrícola, los beneficios y las variables ambientales (por ejemplo, la erosión del suelo) APSIM incluye pastos, ganado, árboles y más de 30 cultivos.

Historia de APSIM

En 1990, la Unidad de Investigación de Producción Agrícola Systems (APSRU) fue formado conjuntamente por CSIRO y el Gobierno de Queensland (entonces Departamento de Industrias Primarias). Su misión era la de beneficiar a las industrias rurales y el medio ambiente a través de enfoques de sistemas innovadores para la investigación y el desarrollo. Situado en Toowoomba, Queensland, la unidad de investigación dirigida a utilizar su experiencia en la simulación por ordenador de los sistemas agrícolas para apoyar la investigación que podría mejorar los sistemas de producción de cultivos cómo se gestionan.

A través de discusiones con los agricultores, APSRU identificó la necesidad de herramientas que predijo con exactitud la producción de cultivos en relación con el clima,

el genotipo, el suelo, y al abordar la gestión a largo plazo de gestión de recursos. APSRU desarrolló APSIM en respuesta a esta necesidad.

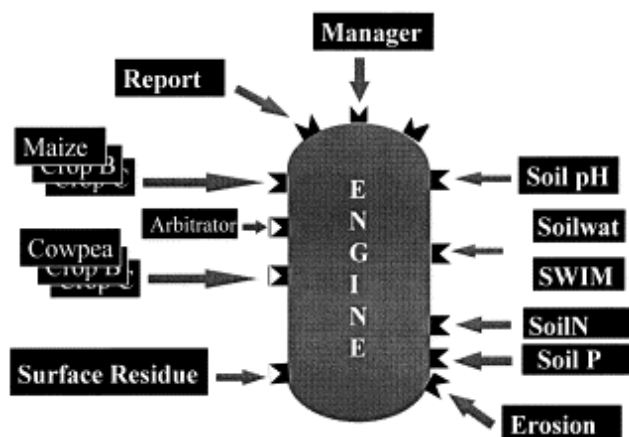
Este módulo incluye diversos rangos de cultivos, pasturas y árboles, procesos del suelo incluyendo balance hídrico, Transformaciones de Nitrógeno y de fósforo, pH del suelo, erosión y rango completo de controles de manejo. APSIM ha sido usado en un amplio rango de aplicaciones, incluyendo soporte para 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.

Estructura del modelo APSIM

Su esta estructura está compuesta por los conjuntos que se relacionan a continuación:

- Un conjunto de módulos biofísicos que simulan los procesos biológicos y físicos en los sistemas agrícolas
- Un conjunto de módulos de gestión que permiten al usuario especificar las normas de gestión previstos que caracterizan el escenario a simular y controlar que el comportamiento de la simulación
- Varios módulos para facilitar la entrada y salida de datos hacia y desde la simulación,
- Un motor de simulación que impulsa el proceso de simulación y controla todos los mensajes que pasan entre los módulos independientes.

La representación diagramática de la estructura del módulo de simulación APSIM con módulos individuales y de suelo, módulos de interfaz y motor de simulación se muestra en la siguiente figura:



Representación esquemática del marco de simulación APSIM.

Los módulos de stocks, planta, medio ambiente y de gestión de APSIM dan soporte a una amplia gama de cultivos, pastos y árboles, procesos del suelo, nitrógeno y transformaciones de fósforo, pH del suelo, la erosión y una amplia gama de controles de gestión.

Los módulos de la planta / animal y el medio ambiente simulan procesos físicos y biológicos en los sistemas agrícolas. APSIM es compatible con más de 30 cultivos (como el trigo, el sorgo, la cebada, caña de azúcar, vid, avena, algodón y arroz), pastos (como el pasto Rhodes), ganado (bovinos y ovinos), las especies de árboles (como Eucalyptus y Pinus radiata), malas hierbas, parásitos y roedores.

Los módulos de medio ambiente manejan variables tales como el clima y el tiempo, las características del suelo (balance de agua, nutrientes, pH, temperatura), residuos de cultivos y la erosión.

Los módulos de gestión permite manejar reglas para un escenario de gestión dado, incluyendo variables relacionadas con la siembra, la cosecha, barbecho, siembra, riego, uso de fertilizantes, manejo del pastoreo, la carga animal y mezcla de cultivos. En la siguiente figura se indican los módulos actuales que se utilizan dentro del modelo APSIM.

Current crop modules in APSIM and relevant references

APSIM module	Original model	References	APSIM module	Original model	References
Barley			Navybean		
Canola		Robertson et al. (1999)	Pasture		
Chickpea		Robertson et al. (2001c)	Peanut	QNUT	Robertson et al. 2001a
Cotton	OZCOT	Hearn and Da Rosa (1985)	Pigeonpea		Robertson et al. 2001a
Cowpea	APSIM-cowpea	Adiku et al. (1993)	Sorghum	QSORG AUSIM-Sorghum	Hammer and Muchow (1991, 1994), Carberry and Abrecht (1991) Robertson and Carberry (1998)
Hemp		Lisson et al. (2000a)	Soybean		Chapman et al. (1993)
Fababean			Sunflower	QSUN	
Forest		Huth et al. (2001)			
Lupin					
Maize	AUSIM-maize	Carberry and Abrecht (1991)	Wheat	Nwheat and L_Wheat	Keating et al. (2001), Meinke et al. (1998)
Lucerne		Robertson et al. (2001b), Probert et al. (1998a)	Stylo		
Millet		van Oosterom et al. (2001)	Sugarcane		Keating et al. (1999a)
Mucuna			Weed		
Mungbean		Robertson et al. (2001d)			

Actuales módulos de cultivos en APSIM y referencias relevantes. Fuente: B.A. Keating (2002).

Aplicación de APSIM

En Australia, APSIM es utilizada por investigadores y asesores en las agencias gubernamentales y universidades. Aunque no está diseñado para su uso por los agricultores, es el motor que impulsa a muchas herramientas de toma de decisiones que los agricultores de uso, tales como [®] Prophet para rendimiento.

Para un escenario de producción dado, APSIM puede estimar la rentabilidad, riesgo económico, el rendimiento, la producción animal y los efectos sobre el medio ambiente. Dadas las características de las especies y variedades de plantas, especies animales, razas y clases de edad, el agua y la fertilidad del suelo y la gestión, se puede simular, día a día:

- Crecimiento de las plantas (cultivos, pastos, árboles, malezas)
- Ganancia de peso vivo de animales, la reproducción, la producción de lana
- Los procesos del suelo (balance de agua, solutos, nitrógeno, fósforo, carbono, pH)
- Dinámica de la superficie de residuos (por ejemplo, tasa de descomposición de rastrojos) y la erosión
- Secano o sistemas de riego
- una gama de opciones de gestión (por ejemplo, fechas de siembra diferentes)
- Rotación de cultivos, barbecho y combinaciones de éstos
- Plagas y enfermedades
- Corto o efectos a largo plazo.

Predicción de rendimiento de los cultivos

CSIRO y el Grupo agrícola Birchip (BCG) están trabajando juntos para desarrollar y apoyar el módulo de Rendimiento Prophet[®], una herramienta basada en la web para soporte de decisiones para los productores de granos. Rendimiento Prophet[®] se basa en los sistemas agrícolas del modelo APSIM (Simulador de Sistemas de Producción Agrícola). Rendimiento Prophet[®] es un paquete de software basado en la web que ayuda a los productores de cereales para gestionar sus cultivos en respuesta a la variabilidad del clima y el riesgo climático, maximizando los beneficios y minimizando los riesgos.

Política de distribución

Distribución APSIM se gestiona a través de un sistema de licencia que proteja la integridad del producto, cumple con los requisitos legales de nuestra responsabilidad

Los usuarios pueden formar alianzas con los desarrolladores para desarrollar nuevas rutinas y módulos, pero esto ocurre de forma controlada con el control de versiones apropiada y las pruebas del sistema. Los requisitos de formación y apoyo para la aplicación exitosa en un complejo de R + D programa puede ser sustancial. Por esta razón, las licencias se expedirán únicamente cuando esté claro que estos requisitos de formación y apoyo pueden ser satisfechas. Una versión de demostración se puede descargar directamente desde el sitio web ayuda APSIM, y se puede utilizar para evaluar la capacidad del modelo sin la necesidad de establecer una licencia. La versión completamente flexible requiere una clave de usuario específica para la instalación y la licencia que especifica el uso previsto y los mecanismos de apoyo B.A. Keating (2002).

En el espíritu de desarrollo de software en conjunto con la comunidad, los usuarios autorizados (personas y organizaciones) tienen acceso al código fuente y puede presentar cambios de software y nuevos módulos para el panel de referencia para evaluar. El acceso al código fuente APSIM es a través del Marco Comunitario de Origen APSIM. Para mayor información sobre el modelo se puede acceder al link: <http://www.csiro.au/en/Organisation-Structure/Flagships/Sustainable-Agriculture-Flagship/APSIM.aspx>.

Desventajas

Teniendo en cuenta el procedimiento para acceder a la licencia y el compromiso de presentar mejoras en el software requeridos por la comunidad APSIM, es complicado implementar este modelo en el IDEAM. Por lo general los modelos desarrollados en países de primer mundo están soportados por la entrada continua de datos climáticos, agronómicos y edáficos para generar pronósticos con más asertividad, la consolidación de una red agrometeorológica es aún una tarea para las instituciones encargadas en Colombia.

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.

CropWat calcula ETo tomando la ecuación de la FAO Penman-Monteith¹⁴ partiendo de su ecuación original y de las ecuaciones de resistencia aerodinámica del cultivo:

$$ET_o = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)}$$

Donde,

ET _o	evapotranspiración de referencia (mm día ⁻¹)
R _n	radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m ⁻² día ⁻¹)
R _a	radiación extraterrestre (mm día ⁻¹)
G	flujo del calor de suelo (MJ m ⁻² día ⁻¹)
T	temperatura media del aire a 2 m de altura (°C)
u ₂	velocidad del viento a 2 m de altura (m s ⁻¹)
e _s	presión de vapor de saturación (kPa)
e _a	presión real de vapor (kPa)
e _s - e _a	déficit de presión de vapor (kPa)
Δ	pendiente de la curva de presión de vapor (kPa °C ⁻¹)
γ	constante psicrométrica (kPa °C ⁻¹)

¹⁴ FAO. 1990. Evapotranspiración del cultivo estudio FAO riego y drenaje No. 56. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los 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

Datos de Entrada

Las variables meteorológicas usadas fueron precipitación (mm), evaporación (mm), brillo solar (horas), vientos (m/s), temperatura media (C°).

En la siguiente figura se indica los datos de salida completos una vez ingresado datos de precipitación. Brillo solar, viento y temperatura.

MONTHLY ETO PENMAN-MONTEITH DATA (File: KURNOOL.pen)							
Country: Location 9529 Altitude: 281 m.				Station: KURNOOL Latitude: 15.80 °N Longitude: 78.06 °E			
Month	Min Temp °C	Max Temp °C	Humidity %	Wind m/s	Sunshine hours	Radiation MJ/m ² /day	ET _o mm/day
January	17.0	31.3	47	1.2	8.8	18.7	3.79
February	19.3	34.3	37	1.3	9.3	21.2	4.66
March	22.5	37.5	30	1.4	9.7	23.5	5.67
April	26.0	39.3	34	1.6	9.2	23.6	6.42
May	27.2	40.0	37	2.6	8.3	22.2	7.60
June	25.0	35.6	54	4.1	5.8	18.3	6.85
July	23.8	32.5	64	4.2	4.4	16.2	5.52
August	23.5	32.1	63	3.5	4.9	16.9	5.28
September	23.3	31.9	65	2.4	5.5	17.3	4.69
October	22.4	32.4	61	1.1	8.7	20.7	4.49
November	19.2	31.0	56	0.9	7.7	17.6	3.62
December	16.6	30.3	51	0.8	8.4	17.7	3.27
Average	22.1	34.0	50	2.1	7.5	19.5	5.15

Cropwat 8.0 Bèta

Para la información agronómica y edáfica se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros.

- K_c (Coeficiente del cultivo)
- Tipo de suelo

- Humedad total aprovechable
- Tasa máxima de infiltración
- Profundidad máxima de raíz
- Disponibilidad inicial de la humedad del suelo
- Altura de la planta
- Agotamiento crítico
- Reacción de rendimiento

Es importante tener información presente sobre el coeficiente del cultivo para cada una de las fases fenológicas y en que periodos se va a analizar la información. El ingreso de los datos agronómicos se indica en la figura siguiente.

DRY CROP DATA (File: KURN-SORGHUM-HYV.CRO)					
Crop Name: SORGHUM (Grain)		Planting date: 13/09		Harvest: 17/01	
Stage	initial	develop	mid	late	total
Length (days)	27	35	35	30	127
Kc Values	0.50	-->	1.15	0.60	
Rooting depth (m)	0.30	-->	1.00	1.00	
Critical depletion	0.50	-->	0.50	0.80	
Yield response f.	0.60	0.60	1.20	0.80	1.00
Cropheight (m)					

Cropwat 8.0 Bèta

Para calcular la evapotranspiración, los datos climáticos respectivos deben ser colectados de la más cercana y representativa estación meteorológica. En algunos países muchas instituciones hidrológicas y meteorológicas poseen información de estaciones que están dentro de la zona de irrigación que se debe considerar en los requerimientos de cálculo de CropWat en los casos de buscar como resultado la disponibilidad hídrica del cultivo. En algunos casos cuando la zona es grande se puede disponer de más de una estación pero frecuentemente no son estaciones apropiadas con suficientes datos climáticos para este caso se debe ser cuidadoso con los datos. En la figura siguiente se indican los datos de salida calculados por CropWat correspondientes a requerimientos hídricos del cultivo.

CROP WATER REQUIREMENTS							
ET ₀ station: KURNOOL Rain station: KURNOOL (KURN-86)				Crop: SORGHUM-HYV Planting date: 13/09			
Month	Decade	Stage	Kc coeff	ETc mm/day	ETc mm/dec	Eff rain mm/dec	Irr. Req. mm/dec
Sep	2	Init	0.50	2.34	18.7	0.0	18.7
Sep	3	Init	0.50	2.31	23.1	3.4	19.7
Oct	1	Deve	0.50	2.29	22.9	23.2	0.0
Oct	2	Deve	0.62	2.79	27.9	33.8	0.0
Oct	3	Deve	0.82	3.43	37.7	28.5	9.2
Nov	1	Deve	1.01	3.95	39.5	22.1	17.4
Nov	2	Mid	1.14	4.14	41.4	18.9	22.6
Nov	3	Mid	1.15	4.03	40.3	12.6	27.7
Dec	1	Mid	1.15	3.89	38.9	0.1	38.8
Dec	2	Late	1.14	3.74	37.4	0.0	37.4
Dec	3	Late	1.00	3.45	38.0	0.0	38.0
Jan	1	Late	0.81	2.93	29.3	0.0	29.3
Jan	2	Late	0.66	2.48	17.4	0.0	17.4
					412.5	142.5	276.3

Cropwat 8.0 Bèta

Para conocer las deficiencias hídricas del cultivo hay que determinar las necesidades de la planta y la cantidad de agua que pueden aportar las precipitaciones durante su ciclo de vida. La diferencia entre ambas es la deficiencia que debe ser cubierta con el riego. En el balance hídrico es importante tener en cuenta la precipitación efectiva, que es definida desde el punto de vista agrícola, como aquella parte de la lluvia que se almacena en el volumen de suelo a la profundidad radicular y es consumida por la planta en el proceso de evapotranspiración (Fernández 2009). Para contabilizar las pérdidas debido a la escorrentía o percolación se pueden seleccionar uno de los cuatro métodos suministrados por CropWat y obtener como resultado la lluvia efectiva.

En el documento de uso de CropWat en la India¹⁵ donde se muestra de manera práctica el uso de CropWat 8,0 para el diseño y la gestión de los sistemas de riego, teniendo en cuenta al usuario, con la ayuda de datos reales, a través de diferentes pasos necesarios para calcular la evapotranspiración, los requisitos de agua del cultivo, suministro de agua y sistema de programación de riego. Se propone almacenar los datos y patrones de los cultivos. Para ello se debió hacer una encuesta a cabo para el sistema de riego para evaluar el crecimiento de los cultivos de Secano bajo riego y debe incluir la siguiente información:

1. Cultivos y variedades de cultivos
2. Fecha del primer y último día de plantación
3. Fecha del primer y última día de recolección

La información adicional puede incluir:

4. Nivel de rendimiento
5. Prácticas indicativas de riego:
 - Los métodos riego en campo
 - Frecuencias e intervalo de riego
 - Profundidad de aplicación de riego

Desde las estaciones de investigación agrícola, la información más precisa puede ser:

6. Características del cultivo:
 - Duración de las etapas de crecimiento del cultivo
 - Factores de cultivo, la evapotranspiración relativa para hacer referencia a los cultivo evapotranspiración
 - Profundidad de las raíces
 - Los niveles de agotamiento disponible
 - Factores de respuesta de rendimiento

Ventajas de CropWat

¹⁵ Ejemplo utilizado para el Plan de regadíos de Rajolibanda en Andhra Pradesh, India.

Es una un modelo bastante amigable y fácil de usar, la practicidad de los cálculos permite obtener rápidamente balances hídricos, disponibilidad hídrica del cultivo para la toma de decisiones en la programación de riego.

Desventajas de CropWat

Es muy limitado pues solo calcula balances hídricos y disponibilidad de agua de los cultivos, aunque podría servir de referencia, para el objetivo del presente estudio no permite incluir otros parámetros como Gases de Efecto Invernadero para proyectas rendimientos en escenarios de cambio climático.

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 código del modelo está escrito en Pascal (versión DOS) y en C++ (Versión Windows 95), a través de una interfaz avanzada y amigable para el usuario el cual permite un fácil manejo de los archivos de entrada, verificación de los parámetros de entrada para errores y compatibilidad cruzada, permite crear simulaciones , ejecutar corridas simples y grupales, personalizar las salidas, producir textos y reportes gráficos, vincular con programas de hojas de cálculo y también seleccionar un lenguaje en especial para el texto de interfaz.

Objetivo de CropSyst

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 descomposición, erosión del suelo por el agua, y el manejo 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.

Módulos de CropSyst

CropSyst contiene dos módulos de Nitrógeno y de agua. El Submodulo de agua en el modelo incluye parámetros de precipitación, irrigación, escorrentía, intercepción, infiltración del agua, redistribución del agua en el perfil del suelo, transpiración del cultivo y evaporación. Los usuarios pueden seleccionar diferentes métodos para calcular la

redistribución del agua en el suelo y la evapotranspiración de referencia. La primera es manejada por una aproximación de cascada simple o por aproximación de diferencia finita para determinar el flujo de agua en el suelo. Además CropSyst ofrece tres opciones para calcular la ETo, los cuales son: el modelo de Penman-Monteith, el modelo de Priestley-Taylor y una simple implementación del modelo de Priestley Taylor el cual solo requiere temperatura del aire. La evapotranspiración del cultivo es determinado del coeficiente del cultivo en un dosel lleno y la superficie del terreno determinado por el índice de área foliar del dosel (Stockle, 1996).

El Submódulo de Nitrógeno en CropSyst incluye transformaciones de N, absorción de Amonio, fijación de N simbiótico, demanda de N del cultivo y absorción de N del cultivo. Se simulan las transformaciones de N de la mineralización neta, la nitrificación y desnitrificación. Los submódulos de Agua y Nitrógeno interactúan para generar un simulación de transporte de N dentro del suelo. Los submódulos químicos (como pesticidas y salinidad) que incluyen la absorción y deterioro de pesticidas, interactúan con el balance hídrico (Stockle, 1996).

Entradas del modelo CropSyst

Se necesitan cuatro archivos de entrada para correr CropSyst: Lugar, suelo, cultivo y manejo. La separación de los archivos permite vincular fácilmente simulaciones de CropSyst con el software GIS. Una simulación con archivos de control combina los archivos de entrada requerido para producir una corrida de simulación específica. Adicionalmente el archivo de control determina el comienzo y final del día para la simulación, define la rotación de cultivos para su simulación y establece valores de todos los parámetros que requieren inicialización (Stockle, 1996). En la tabla siguiente se relacionan los parámetros de entrada que requiere CropSyst.

Archivos de lugar	Incluyen información de longitud, latitud, nombre y código del archivo de clima, parámetros de intensidad de lluvia (para predicción de erosión), parámetros de clima glacial (para lugares donde el suelo puede congelarse) y parámetros locales para generar radiación solar diaria y valores de déficit de presión de vapor.
Archivos de suelo	Incluyen superficie del suelo, capacidad de intercambio catiónico y pH, requeridos para volatilización de amonio, parámetros para la aproximación del número de curvas (cálculo de escorrentía), textura del suelo (para cálculo de erosión y cinco parámetros específicos para la capa de suelos: espesor de la capa, capacidad de campo, punto permanente de marchitez, densidad aparente y coeficiente Bypass. El último es un parámetro para agregar dispersión para transportar los solutos, particularmente cuando se usa la aproximación de la cascada para la redistribución del agua en el suelo.
Archivos del cultivo	Este archivo permite seleccionar los parámetros para diferentes cultivos y está estructurado en las siguientes secciones: Fenología (requerimientos de tiempo térmico para alcanzar estados de crecimiento específico modelado por el fotoperiodo y la vernalización), morfología (Máximo IAF, profundidad de la raíz, área de

	<p>la hoja específica y otros parámetros que definen las características del dosel y la raíz), crecimiento (transpiración-eficiencia normalizada por la presión de vapor diaria VPD, eficiencia del uso de la luz y parámetros de respuesta al estrés entre otros), Residuos (parámetros de descomposición y residuos del cultivo), parámetros de Nitrógeno (demanda de N del cultivo y absorción de la raíz), Índice de cosecha (índice de cosecha sin estrés y parámetros de sensibilidad al estrés) y tolerancia de salinidad.</p>
Archivos de manejo	<p>Estos archivos incluyen eventos de manejo programado y automático. Los eventos automáticos (como irrigación y fertilización de N) generalmente se especifican para suministrar un manejo óptimo para el máximo crecimiento, aunque la irrigación puede ser también establecida para el déficit de irrigación. Estos eventos pueden ser programados usando la fecha actual o la fecha relacionada al año de siembra, o sincronizando con los eventos fenológicos, por ejemplo números de día después de la floración.</p> <p>Los eventos programados incluyen la irrigación (fecha de aplicación, contenido de salinidad o químicos), fertilización de N (fecha de aplicación, total, fuente orgánica/inorgánica, modo de aplicación: inyectado, incorporado, broadcast), operaciones de labranza (primarias y secundarias) y manejo de residuos (quemados, pastura, cortes).</p>

Experiencias con CropSyst

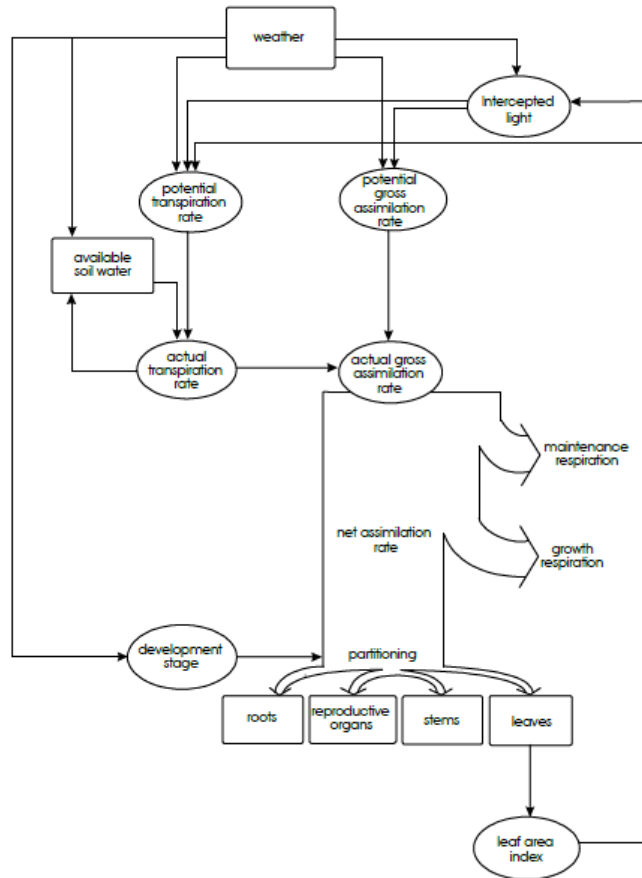
Los impactos de los escenarios de cambio climático en los sistemas agrícolas ha sido estudiado a través de CropSyst, donde se genera el clima basado en modelos de la circulación global en la concentración de CO₂ actual y en niveles incrementados. Ejemplos de este tipo de aplicación han sido reportados por Tubiello et al. (2000) para el norte, centro y sur de Italia y por Bindi et al. (1999) para el sur de España, sur de Francia, Norte de Italia y Grecia. De otra parte, la respuesta al cambio climático también fue evaluada para la caña de azúcar en varios sistemas agrícolas implementados en seis sitios del centro y norte de Italia (Donatelli et al. 2002). Un estudio llevado a cabo en el área agrícola irrigada intensivamente del estado central de Washington para evaluar las estrategias con el fin de usar pronósticos de clima a corto plazo en una región donde las fluctuaciones del clima afectan la agricultura y la compleja gestión del agua.

6. WOFOST

WOFOST¹⁶ 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.

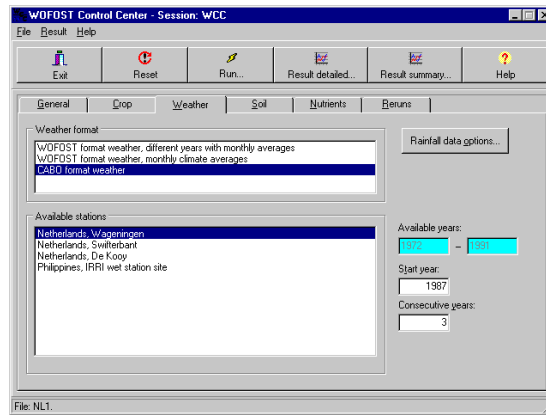
El crecimiento potencial y de agua disponible es simulado dinámicamente, con un tiempo de un día. La producción es calculada estadísticamente con base a las características de suelo y la disponibilidad hídrica.

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).



¹⁶ 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

WOFOST 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 en el principal proceso. Los módulos de WOFOST corresponden a cultivo, clima, suelo y nutrientes, como se ve en la figura siguiente.



La versión 6.0 del modelo WOFOST 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 WOFOST muchos modelos han sido elaborados, es el caso de SWACROP2 un modelo formado por la unión del módulo de cultivo de WOFOST 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 WOFOST 4.1. En los años 90's WOFOST 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 WOFOST. 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.** En la figura siguiente se observan los resultados de la producción potencia del cultivo en kg/ha.

```

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

WEATHER-> name: Netherlands, Wageningen
           file: ..\meteo\cabowe\ntl1 start year: 1987
RAIN -> belonging to weather station
CROP -> name: Winter wheat 101, N-U.K., Denmark
           file: ..\cropd\wvh101.cab
SOIL -> name: ECI-coarse
           file: ..\soild\ec1.new
START -> fixed emergence date IDEM = 1

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

POTENTIAL CROP PRODUCTION
=====
DAY IDSEM DVS TSUM WLV WST WSO TAGP LAI TRA GASS MRES DMI
           degrd 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. 0.18 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. 2758. 4391. 0. 7170. 5.84 1.08 220.1 69.7 104.3
169 168 1.00 1004. 2774. 7274. 532. 10780. 5.88 2.77 495.6 84.0 291.7
201 200 1.56 1538. 2916. 6846. 7446. 17695. 4.91 2.23 357.0 147.5 148.6
229 228 2.00 1957. 112. 3888. 8894. 19143. 0.24 0.27 10.1 10.1 0.0

SUMMARY:
HALT ANIH IWRT IWLW IWSO TAGP HINDEX TRANSP IRC GASST MREST
229 168 1231. 2974. 7274. 8894. 19143. 0.46 25.0 131. 39129. 9786.

```

Limitaciones de WOFOST

Una limitante de WOFOST 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.

Hay que subrayar que WOFOST es un modelo, por lo tanto, una simplificación de la realidad. El usuario siempre tiene que tener cuidado al sacar conclusiones de los resultados de la simulación. Tenga en cuenta que la calidad de los resultados del modelo no puede superar la calidad de los datos de entrada. Es un modelo más que aclara las consecuencias de las opiniones de los usuarios y de datos (Driessen, 1986b). Por lo tanto, la selección cuidadosa de los datos de entrada es de suma importancia. Como regla general, no se debe simular el crecimiento del cultivo sin experimentación. La experimentación es necesaria para obtener los parámetros específicos y para calibrar y verificar los resultados del modelo.

En el proceso de validación, el crecimiento del cultivo como se observa en la realidad puede ser comparado con los resultados de la simulación. Esto proporciona un panorama de la adecuación de las predicciones de WOFOST. Cuando las diferencias se producen, puede ser necesario adaptar los valores de los parámetros (en modelos de calibración). Entonces, el nuevo modelo debe ser revisado, frente a un conjunto independiente de observaciones.

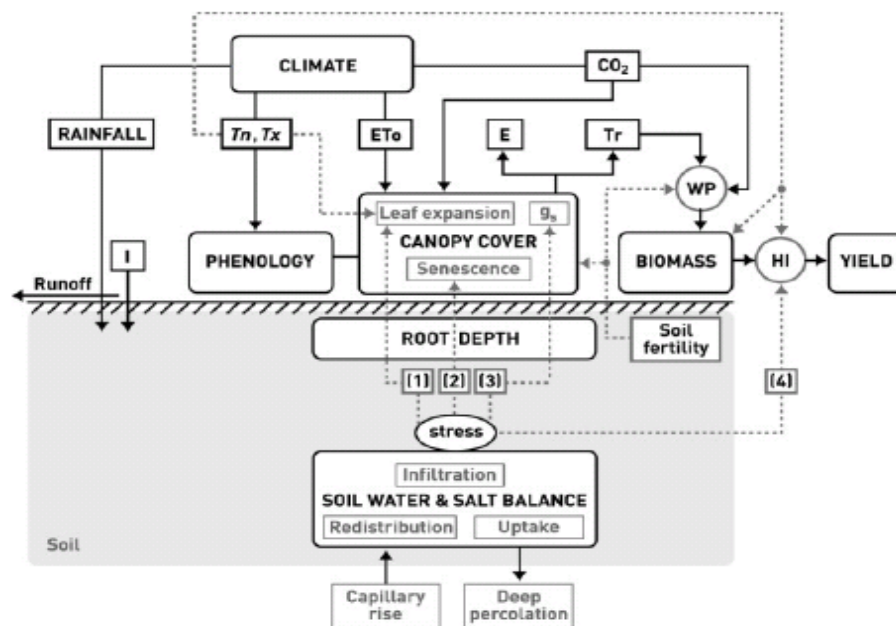
Un problema a este respecto es que hay un enorme número de parámetros, mientras que sólo unos pocos se pueden validar en un momento. Es preciso darse cuenta que a pesar de que la calibración puede mejorar los resultados del modelo para un propósito específico, se puede disminuir su aplicabilidad general.

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.







Datos de entrada de AquaCrop

AquaCrop requiere de datos de entrada para cuatro módulos¹⁷. 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

¹⁷ Dirk RAES, Pasquale STEDUTO, Theodore C. HSIAO, and Elias FERERES. 2011. Reference Manual. FAO cropwater productivity model to simulate yield response to water. Italia.

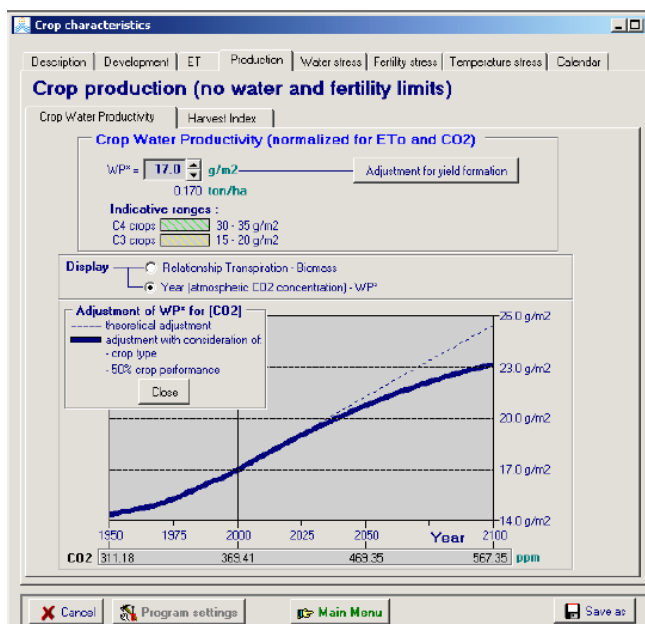
módulo de manejo necesita información sobre irrigación y campo y por último, el módulo de suelos requiere datos de variables hidrofísicas. A continuación se indican más a fondo los datos y parámetros requeridos en cada uno de los módulos.

Módulo de clima: datos meteorológicos 	
<ul style="list-style-type: none"> • Precipitación. • Temperatura máxima y mínima. • Evapotranspiración de referencia (ET_o) Y/O • radiación solar, • humedad relativa máxima y mínima • velocidad media del viento. 	
Módulo del cultivo 	
Siembra	
<ul style="list-style-type: none"> • Fecha de siembra o trasplante. • Densidad de siembra del cultivo (plantas/hectárea) 	
Crecimiento y Fenología	
<ul style="list-style-type: none"> • Nombre de la especie y la variedad. • Fechas de % de desarrollo de la cubierta vegetal (<i>canopy cover</i>) en las distintas etapas de crecimiento (emergencia, floración, madurez fisiológica, etc.) en días. • Duración del ciclo del cultivo en días. • Fecha de cosecha. • Cubierta vegetal máxima (en %) alcanzada por el cultivo. • Biomasa seca (en Kg m⁻², a lo largo del ciclo de cultivo). • Rendimiento final. • Cubierta vegetal (en %) a lo largo del ciclo del cultivo incluyendo el valor inicial CCo, después de la germinación y el valor final CCx. Idealmente, las medidas de cubierta vegetal deben tomarse semanalmente midiendo la penetración de la Radiación Fotosintéticamente Activa (RFA) usando un sensor lineal cuántico; si esto no es posible se pueden usar estimaciones de la superficie cubierta del suelo con fotos de los cultivos y con programas como Image J, GIMP 2.0, Sigmascan Pro, o estimaciones visuales). También se puede usar el índice de área foliar (IAF). • Índice de cosecha (IC). 	
Descripción del sistema radicular	
<ul style="list-style-type: none"> • Profundidad máxima de la raíz. • Obstáculos para la penetración de la raíz en el suelo 	

Descripción del suelo	
	<ul style="list-style-type: none"> • Profundidades de los diferentes horizontes del suelo (generalmente de 1 a 3 horizontes, máximo 5).
	<ul style="list-style-type: none"> • Textura del suelo en cada horizonte (arcillosa, franca, arenosa en %)
	<ul style="list-style-type: none"> • Capacidad de campo en cada horizonte del suelo (en % volumétrico, o mm m^{-1})
	<ul style="list-style-type: none"> • Punto de marchitamiento permanente en cada horizonte del suelo (en % volumétrico, o mm m^{-1})
	<ul style="list-style-type: none"> • Contenido inicial del agua en el suelo según la profundidad (en % volumétrico, o mm m^{-1})
Otras Parámetros	
	<ul style="list-style-type: none"> • Coordenadas geográficas de la parcela experimental (latitud, longitud y altitud)
	<ul style="list-style-type: none"> • Fechas, tipo y cantidad de fertilizantes aplicados (en Kg ha^{-1}).
	<ul style="list-style-type: none"> • Descripción del método o sistema de riego (ejemplo: aspersión, mini-aspersión, surcos, goteo, etc.)
	<ul style="list-style-type: none"> • Fechas y cantidad de agua aplicada en cada riego (en $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ o mm).
	<ul style="list-style-type: none"> • Porcentaje de la superficie del suelo mojada al final de cada riego (%) y porcentaje de la superficie del suelo humedecida expuesta al sol a mediodía (%).
	<ul style="list-style-type: none"> • E_t (E_t real), en mm, y descripción del método usado para calcular la E_t (Balance del agua en el suelo, métodos micro-meteorológicos – Eddy covariance, el método Bowen, etc.)

Media Anual del CO₂ Atmosférico

AquaCrop considera 369.47 partes por millón por volumen como referencia. Es un promedio de CO₂ atmosférico para el año 2000 medido en el Observatorio de Mauna Loa en Hawaii. Otras concentraciones de CO₂ alterarían la expansión del dosel y la productividad del cultivo. En la figura de abajo se observa la salida del resultado Productividad del agua ajustada a la concentración de CO₂.



Productividad del agua ajustada a la concentración de CO2 considerando el tipo y desempeño del cultivo.

Experiencias con AquaCrop en Colombia

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 DSSAT¹⁸.

Aplicaciones de AquaCrop

El Modelo AquaCrop puede ser usado como herramienta de planificación o para la asistencia en la toma de decisiones para agricultura de riego o de lluvia¹⁹. Este modelo es útil particularmente en los siguientes aspectos.

- Para el desarrollo de estrategias de irrigación bajo condiciones de déficit hídrico.

¹⁸ (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.

¹⁹ Dirk RAES, Pasquale STEDUTO, 2011, FAO.

- Para estudiar el efecto del rendimiento del cultivo en un lugar, el tipo de suelo, la fecha de siembra.
- Para estudiar el efecto del rendimiento del cultivo de varias técnicas de manejo de tierras.
- Para comparar la disponibilidad contra los rendimientos actuales en un campo, granja o una región, identificar las restricciones que limitan la producción del cultivo y la productividad del agua.
- Para predecir impacto del cambio climático en la producción de un cultivo.
- Para escenarios de simulación y propósitos de planificación de los economistas, administradores y gerentes del sector hídrico.

Ventajas de AquaCrop

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 requerida²⁰.

Según Méndez quien utilizó el modelo para los cultivos de papa y maíz, el modelo AquaCrop es útil para definir fechas de siembra, dar un manejo racional y eficiente del agua, diseñar calendarios de siembra y de riego óptimos para el cultivo en cada zona²¹.

El modelo AquaCrop es sumamente sensible al agua que ingresa al perfil del suelo, dado que esta se convierte en transpiración y luego por el parámetro de productividad de agua (WP*) se convierte en biomasa., el vacío de información de precipitación diaria puede disminuir considerablemente la biomasa y rendimientos esperados²².

8. MODELO ET0 CALCULATOR

²⁰ (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.

²¹ Méndez J. 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.

²² Méndez J. 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.

ETO 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 (ET_o) de acuerdo con las normas de la FAO. ET_o 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 agronómicas²³.

El software evalúa ET_o 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 ET_o.

Entrada de datos

El programa puede manejar datos climáticos diarios, decadales y mensuales. Los datos se pueden administrar en una amplia variedad de unidades y los datos específicos en los parámetros climáticos comúnmente utilizados pueden ser procesados. Para este modelo datos de temperatura del aire, velocidad del viento, humedad de aire, brillo solar y radiación son requeridos para correr el modelo.

²³ Ibíd.

Fundamentalmente Eto es un complemento del modelo de simulación de AquaCrop.

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 exitosa²⁴.

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.

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 crecimiento²⁵.

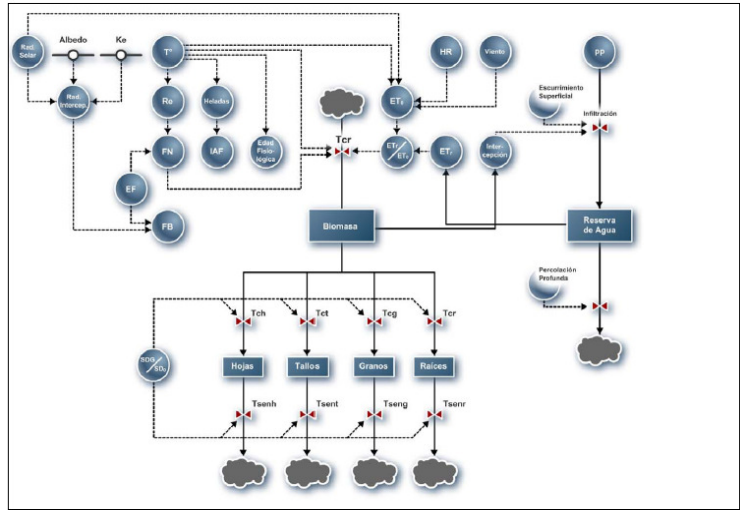
Variables de salida del modelo

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:

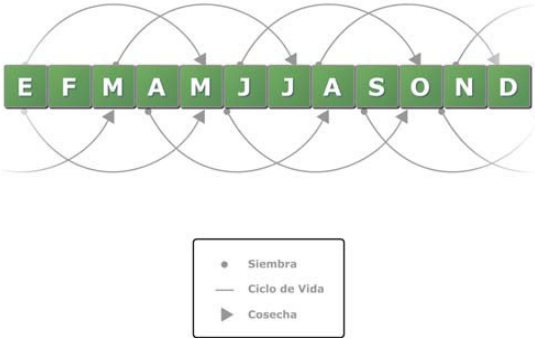
²⁴ Santibáñez. F. 2013. Comunicación personal por correo electrónico. AGRIMED, Chile.

²⁵ AGRIMED, 2008. "Impactos productivos en el sector silvoagropecuario de Chile frente a escenarios de Cambio Climático" Centro AGRIMED, Universidad de Chile. Chile



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 intercepción 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 suelo²⁶.

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, 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 ciclo²⁷.



²⁶ AGRIMED, 2008. "Impactos productivos en el sector silvoagropecuario de Chile frente a escenarios de Cambio Climático" Centro AGRIMED, Universidad de Chile. Chile
²⁷ *Ibíd.*

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 (DWD²⁸ 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 agrometeorológicas con de temperatura, evaporación y la humedad del suelo.

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

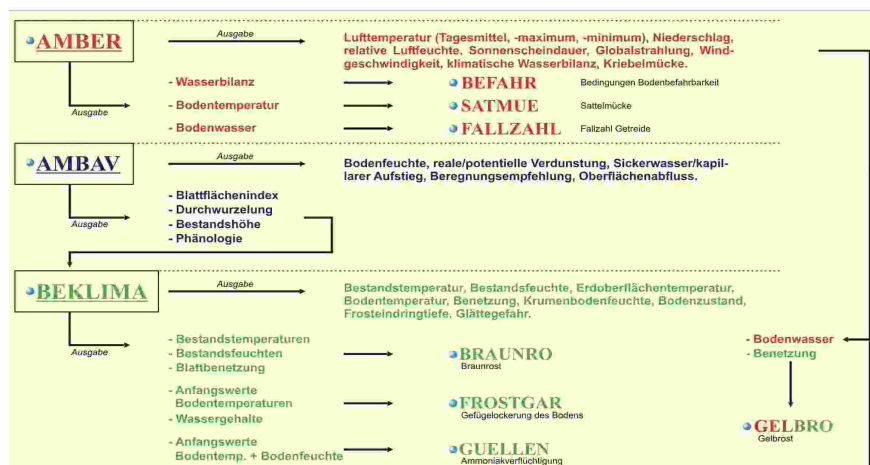
Los datos de salida

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

²⁸ DWD – Deutscher Wetterdienst – Servicio Meteorológico Alemán. 2012.

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

El modelo unidimensional suelo-vegetación-atmósfera AMBETI / BEKLIMA fue desarrollado con fines agrometeorológicos (Braden, 1995) en el Centro de Investigación agrometeorológico de Braunschweig es a la vez usado para fines de investigación y para el uso de rutina dentro de las funciones de agrometeorológica y asesoramiento.

El desarrollo de AMBETI / BEKLIMA comenzó en el año 1982. La información sobre los modelos existentes SVAT era escasa entonces y así el desarrollo del modelo se inició con sólo unos pocos ejemplos. Goudriaan (1977) se inspiró en el diseño de un "órdenes sucesivas del modelo de dispersión" para el cálculo de reflexión y la dispersión de la radiación en el dosel de las plantas. Un modelo correspondiente, similar a Myneni et al. (1987), se desarrolló y ejecutó para radiación directa y difusa y radiación visible, infrarrojo cercano e infrarrojo, respectivamente. Estos resultados se utilizaron para calibrar las funciones para reflexión y transmisión que se expandieron de acuerdo con Goudriaan (1977) y que se aplicó en AMBETI (Braden, 1995).

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. Otra función del modelo BEKLIMA es el cálculo de la temperatura del suelo y el contenido de agua.

Datos de entrada (resolución hora)

- Temperatura del aire
- RH

- Precipitación
- Velocidad del viento
- Radiación Global
- La radiación térmica

Los datos de salida

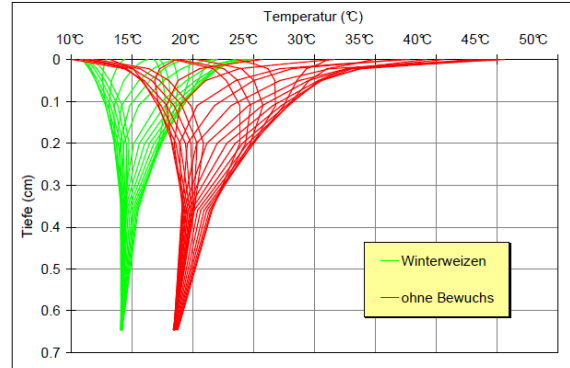
- Estado de clima (temperatura del aire, humedad relativa)
- Temperatura de la hoja, humectación de hoja
- Temperaturas en la superficie de la tierra
- La transpiración, evaporación del suelo
- Profundidad de la nieve
- Las temperaturas del suelo en varias capas
- Suelo contenido de agua en el suelo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



Desventajas de AMBER Y BEKLIMA

Estos modelos son elaborados para condiciones de sistemas agrícolas de latitudes altas, de allí que deberían modificarse gran parte de los scripts para una apropiada adaptación a las condiciones agrícolas de Colombia. La base de datos climáticos agronómicos y edáficos que soporta estos modelos tiene series largas y continuas por lo que la calidad de datos es óptima para cualquier tipo de corrida.

Para Alemania es una ventaja tener una plataforma de datos con una red de estaciones agrometeorológicas, investigación y observación en granjas experimentales para poder realizar validación y calibración en el desempeño de los modelos. De igual forma los

modelos está vinculados con una plataforma de pronóstico a corto plazo con procesos automatizados que toma la información de la base de datos para el análisis de lo observado y toma los modelos de simulación del tiempo para generar predicción. En nuestro caso la implementación de los mencionados modelos no estarían acordes con nuestra débil plataforma tecnológica.

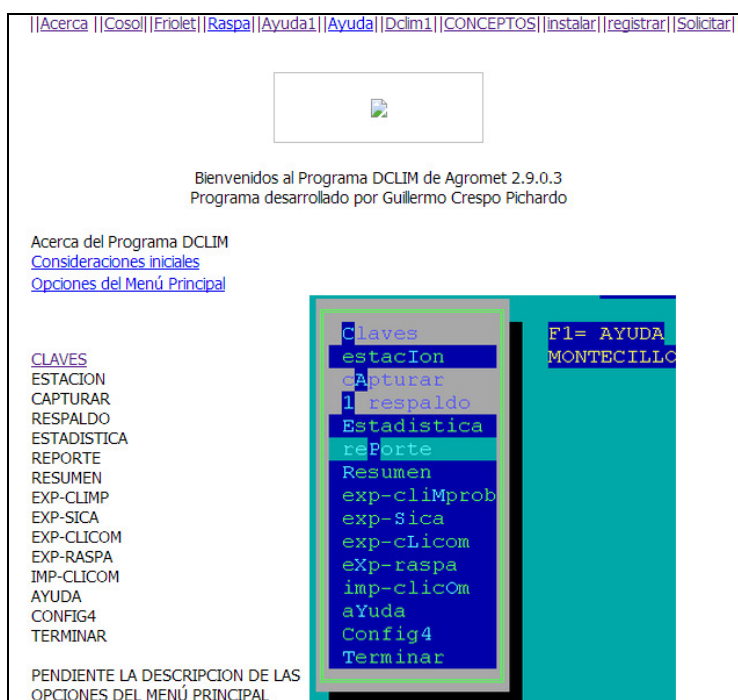
12. AGROMET 2.9.0.3

Agromet 2.9.0.3 es un modelo agroclimático desarrollado por Crespo G. en México. Este modelo incluye: Estimación de rendimientos potenciales de cultivos, Cálculo de constantes solares como: hora y puesta del sol, duración del día, Radiación teórica extraterrestre, radiación fotosintéticamente activa, Cálculo de calendario de riego de cultivos, Cálculo del Índice de Satisfacción de las necesidades hídricas de cultivos, Cálculo de horas frío, Unidades frío (UF), Estimación de datos climáticos faltantes, y Modelos para estimar temperaturas y Humedad relativa horarias.

El autor ha desarrollado una página con los soportes conceptuales de los parámetros que se usan para obtener los resultados ya mencionados. La única literatura sobre la aplicación de Agromet se encuentra en la página:

<http://www.cm.colpos.mx/meteoro/progde/agm/agma29r.htm>

La interfaz del modelo corresponde a un ambiente de DOS como se ve en la figura de abajo. Tiene varios módulos o programas como Cosol, Friolet y Raspa que a continuación se describirán.



Calculo de la radiación teórica extraterrestre

En su página el autor explica las formulas para el calculo de la constante solar, declinación, hora de salida del sol, hora de puesta del sol, duración astronómica de la insolación (n), y radiación teórica extraterrestre. Este calculo se hace a través del programa COSOL.

Programa de computo "COSOL".

Las rutinas de computo han desarrollado en turbo pascal V. 6.0 y está planteado mediante este programa realizar el calculo de dichas variables de radiación solar, para diferentes latitudes y periodos considerados. Presenta además la opción de seleccionar las variables que se desean calcular y salida de resultados a pantalla, impresora y disco. Esta diseñado de tal forma de hacer los cálculos eficientes y fáciles de utilizar para usuarios no muy familiarizados con el uso de computadores ya que ofrece una interfase amigable con el usuario.

Entrada de datos

Se presenta una ventana en donde se solicitan los siguientes datos

Estación: nombre de la estación

Periodo (1-30):

Datos mensuales calculados por promedios mensuales o por días representativos ¿(P/D)?

Periodo inicial:

Periodo final:

Latitud: 00° 00' 00"

Estación se refiere al nombre de la estación climática para identificar los datos.

Periodo se refiere a calcular las constantes solares en periodos variables que pueden ser desde datos diarios (1) hasta periodos mensuales (30). Para el caso de se especifique periodos de 30 se consideran dos opciones; a) calcular los promedios mensuales utilizando el dato promedio utilizando el numero de días para cada mes, b) calcular los datos mensuales utilizando los días representativos para cada mes de acuerdo a la siguiente tabla:

N = Fotoperiodo (hora)

Ia = Radiación teórica extraterrestre (cal/cm²/día)

I = Constante solar (cal/cm²/min)

Ac = Radiación fotosinteticamente activa para un día Despejado, (cal/cm²/día)

bc = Fotosíntesis bruta (velocidad de producción de biomasa bruta) para cultivos cerrados en días despejados (kg/ha/día)

ac, bc, bo = Para una fotosíntesis máxima de 20 kg de CH₂O/ha/hora

EJEMPLO DE CALCULO DE COSOL

LEON, GTO.			Latitud	21.12	°			
mes	dmes	dj	N	la	l	Ac	bc	
4	30	120	12.495	908.174	1.954	377.292	446.896	
5	31	151	13.009	946.177	1.925	394.896	462.532	
6	30	181	13.263	954.419	1.908	398.714	465.923	
7	31	212	13.144	947.025	1.907	395.289	462.881	
8	31	243	12.700	917.630	1.924	381.672	450.786	
9	30	273	12.103	850.867	1.953	350.745	423.316	

FRIOLET / GDD

FRIOLET es un programa de computo para el calculo de las unidades frío (UF). FRIOLET considera en el cálculo de las UF 3 métodos. Pueden almacenarse las temperaturas horarias, (se consideran 4 métodos), y las UF para usos futuros u otras aplicaciones.

Se evaluó el ajuste de cinco modelos empíricos para estimar temperaturas horarias a partir de la máxima y mínima diaria, durante dos períodos invernales consecutivos, e tres localidades de México. El modelo seno-seno-exponencial (Eckersten, 1986) presentó el mejor ajuste en las tres localidades estudiadas; el modelo seno doble (De wit et. al., 1978) obtuvo el segundo mejor ajuste en Calera, Zac. y Canatlán Dgo., mientras que en Montecillos, Méx. El segundo mejor ajuste lo obtuvo el modelo seno-logarítmico (Linvill, 1990). Con estos modelos de estimación de temperaturas horarias se determino la acumulación de Unidades Frío (UF) a través de tres modelos: Utah (Richardson et. al 1974), Vega (1990), y Linvill (1990), que se compararon con la cantidad de UF obtenida a partir de temperaturas horarias observadas (Crespor G. ____).

Siacer: sistema para la adaptabilidad de cultivos y estimación de rendimiento potenciales

A la fecha se han desarrollado e implementado metodologías para conocer el potencial agroclimático de un lugar, mediante las cuales, se establecen las zonas con mejores condiciones climáticas, de acuerdo a los requerimientos agroclimáticos de los cultivos. En este programa se utilizaron las metodologías para evaluar la adaptabilidad y conjuntar los datos necesarios de los cultivos para la estimación del rendimiento potencial. El programa se desarrollo bajo el sistema operativo MS-dos versión 3.0, y el lenguaje de programación turbo pascal versión 6.0. El programa presenta las siguientes características.

Rutinas de estimación de la radiación global y evapotranspiración potencial.

Un archivo de datos de cultivos que contiene humedad aprovechable en mm, textura del suelo. Densidad aparente, capacidad de campo

Archivo de datos de la estación climática.

EJEMPLO DE CALCULO DE ISNH- Indic de necesidad hídricas de cultivo.

CALCULOS PARA EL AÑO =	1989	
CALCULO DEL INDICE DE LAS NECESIDADES HIDRICAS DE CULTIVOS (ISNH) PARA :		
ESTACION =	LEON (PREPARATORIA LEON. GUANAJUATO)	
CULTIVO =	MAIZ	
Fecha de siembra:	Mes	4 Día 1
DURACION DEL CICLO =		Dj = 180 Días
PROFUNDIDAD RADICULAR MAXIMA =		1.50 m
HUMEDAD APROVECHABLE DEL SUELO =		268.80 mm/m
HUMEDAD INICIAL DEL SUELO =		45.0 % de HA
total de nh =		879.54
HUMEDAD APROVECHABLE * PROFUNDIDAD RADICULAR =		403.20 mm

Ejemplo de salida de datos para hallar parámetros de índice de necesidad hídricas de los cultivos en México.

Dj	Pe	Eto	Kc	nh	bh	rs	exceso	deficit	ISNH
	7.40	259.80	0.41	106.66	-99.26	82.18	0.00	0.00	100.00
120	26.50	262.40	0.75	197.67	-	0.00	0.00	89.00	89.88
151	91.00	205.70	0.96	197.47	171.17	0.00	0.00	106.47	77.78
181	93.30	184.00	0.97	178.17	106.47	0.00	0.00	84.87	68.13
212	7.50	171.30	0.76	130.95	-84.87	0.00	0.00	33.45	64.32
243	81.48	149.15	0.46	68.61	12.87	12.87	0.00	0.00	64.32
271									
ISNH EFECTIVO EN EL CICLO DEL CULTIVO =									64.32

Dj = Día juliano, Pe = Precipitación Efectiva (mm), Eto = Evapotranspiración (mm)

Kc = coeficiente del cultivo, nh = necesidades hídricas (mm)

bh = balance hídrico (mm), rs = reserva de humedad en el suelo (mm)

excesos (mm), deficits (mm)

ISNH = Índice de satisfacción de las necesidades hídricas del cultivo (%=

Ventajas de Agromet 2.9

Es un programa versátil en cuanto al manejo de datos tanto climáticos como de cultivos, ya que puede alimentar con datos muy generales (datos normales de las estaciones climáticas, y datos del cultivo en general), así como datos específicos (datos de un año en particular a un nivel de probabilidad de la estación climática y datos específicos de alguna variedad de cultivo).

Presenta una interfase usuario-programa fácil y entendible mediante ventanas desplegables y menús de selección que pueden ser operados mediante las teclas de movimiento del cursor como lo son flecha-abajo, flecha-arriba, flecha-derecha, flecha-izquierda, avance de página, retroceso de página, inicio y fin, o mediante una tecla correspondiente a un carácter resaltada por un color. Presenta además una rutina para su presentación, que permite la

selección del color que mejor se adapte a las necesidades del usuario y del equipo donde sea operado el sistema.

Presenta rutinas de protección para evitar el ingreso de datos fuera de rango. Esto es de gran utilidad para usuarios no expertos en el tema pero que tengan la necesidad de conocer estos valores.

III. CONCLUSIONES

La evaluación del modelo convencionalmente se hace a través de la comparación de las salidas de simulación con los datos registrados del mundo real. El éxito del desempeño del modelo recae en que lo observado y lo simulado tenga una estrecha relación. Y esa es una de las limitantes en nuestro país, ya que se dispone de poca información en campo o en granjas experimentales sobre parámetros agronómicos o edáficos para hacer la calibración.

Es necesario calibrar los modelos AquaCrop y DSSAT para materiales del cultivo de Maíz y Papa, con información de calidad de la fenología del cultivo, seguimiento del desarrollo del cultivo, manejo agronómico, planes de fertilización y riego, información de las variables meteorológicas como precipitación, temperatura máxima y mínima, humedad relativa, radiación solar o brillo solar, evapotranspiración de referencia (ET_o) y velocidad del viento

Los modelos empíricos tienen mayor desventaja que los dinámicos ya que no consideran parámetros de entrada datos de escenarios de cambio climático por lo que debe usarse otro tipo de modelación adicional, cuando se quieren hacer análisis de rendimientos de cultivos en el futuro.

Los modelos AquaCrop, Eto y DSSAT son los modelos más sólidos y los que ya se han utilizado y calibrado en Colombia, por esta razón puede recomendarse la implementación de su uso en el IDEAM, especialmente por el tema de modelación de rendimientos en escenarios de cambio climáticos, ya que incluyen un modulo de concentración de CO₂.

Los modelos AGROMET 2.9 y SIMPROC se pueden implementar en un futuro en el IDEAM. Se han solicitado los permisos de uso en México y Chile respectivamente, por lo que se pueden utilizar en un par de meses inicialmente con el proceso de calibración.

IV. INVENTARIO DE DATOS

Con el fin de poder alimentar el modelo agroclimático próximamente seleccionado, se procedió a realizar un inventario de datos climáticos, agronómicos y meteorológicos teniendo en cuenta las variables y parámetros que los modelos anteriormente analizados exigen para sus corridas.

En base a la información que dispone el grupo de Agroclimatología del IDEAM, se generó una especie de matriz para saber con qué información se puede contar de manera inmediata para implementar el modelo a elegir.

El grupo de agrometeorología facilito la información de producción y rendimiento en el anuario estadístico hasta el 2009 de CCI. Al respecto está solicitando la información formalmente al CCI de los últimos años incluyendo el 2012.

La información de escenarios climáticos hasta el año 2012 ya fue suministrada por el grupo de Modelamiento y clima.

La información de base cartográfica del IGAC podrá ser consultada a través de conexión a la Geodatabase corporativa del IDEAM en ArcGis para lo cual se está solicitando usuario y clave para su acceso.

La información agronómica y edáfica fue definida en la tabla que se adjunta, la selección de los parámetros se hizo en base a los requerimientos de cada modelo específicamente. Cabe resaltar la información extraída de varias investigaciones en las que ya se implementaron algunos modelos agroclimáticos en Colombia.

V. 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.

Bandi, M. 2008. Instrumentos para el monitoreo del impacto ambiental sobre la producción agrícola. Modelos para cultivos.

Branden H. 2011. Sensitivity of the agrometeorological model AMBETI /BEKLIMA to modified meteorological boundary conditions. Deutscher Wetterdienst (DWD), Zentrum für Agrarmeteorologische Forshung, Braunschweig.

CANDELARIA MARTINEZ, Bernardino et al. Aplicación de modelos de simulación en el estudio y planificación de la agricultura, una revisión. Trop. subtrop. agroecosyt [online]. 2011, vol.14, n.3 [citado 2013-04-16], pp. 999-1010. Disponible en: <http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S187004622011000300004&lng=es&nrm=iso>. ISSN 1870-0462.

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.

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.

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.

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.

Guevara E. La simulación del desarrollo, crecimiento y rendimiento en maíz INTA EEA Pergamino, Argentina.

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.

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

Jones, J.W., Hoogenboom, G., C.H. Porter, K.J. Boote, Batchelor, W.D., Hunt, L.A., Wilkens, P.W., Singh, U., Gijsman, A.J. y J.T. Ritchie. 2003. The DSSAT cropping system model. Eur. J. Agron.

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

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.

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

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.

Ruiz, M. E. 2005. Aliados de la agricultura. Periódico Granma Internacional. Año 11, no. 279. Citado por Hernández & Soto en revista Cultivos Tropicales V. 30 n.1. La Habana ene.-mar. 2009.

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.

S.M. Attaher, M.A. Medany & A. El-Gindy, 2010. Feasibility of some adaptation measures of on farm irrigation in Egypt under water scarcity conditions. Agricultural Engineering Department, Faculty of Agriculture, Ain Shams University El Cairo, Egipto.

Stockle C. ____ The CropSyst Model: A Brief description. Biological Systems Engineering Dept. Washington State University

Tubiello, F.N. y F. Ewert. 2002. Simulating the effects of elevated CO2 on crops: approaches and applications for climate change. European J. Agron.

Van Ittersum, M.K., Leffelaar, P.A., van Keulen, H., Kropff, M.J., Bastiaans, L. y J. Goudriaan. 2003. On approaches and applications of the Wageningen crop models. Eur. J. Agron.