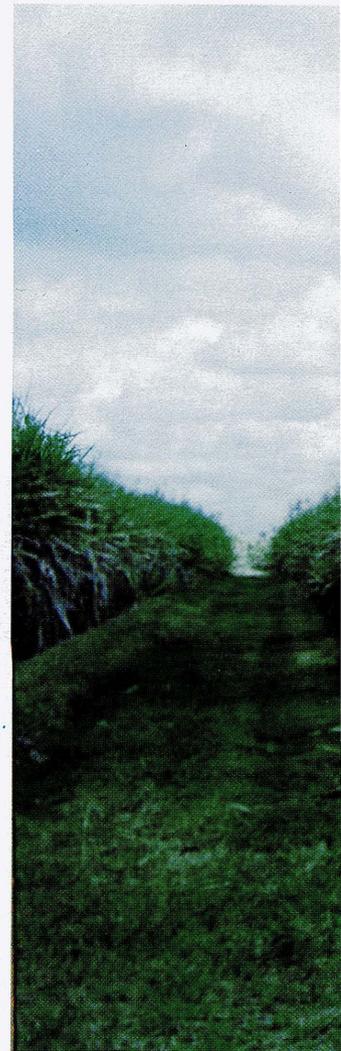


LA MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DEL CRECIMIENTO DE LOS CULTIVOS

Un manejo para optimizar la investigación y las decisiones en la administración de fincas



Por: **Jaime Arcila Pulgarín**
Investigador principal I. Disciplina Fisiológica Vegetal. Centro Nacional de Investigaciones del Café «Pedro Uribe Mejía». Cenicafé. Chinchiná, Caldas, Colombia



Desde la revolución verde a finales de la década de los años 60, no se tenía en el campo agrícola, la disponibilidad de nuevas tecnologías cuyo impacto tiende a marcar profundamente el futuro de la práctica de la agricultura. Estas tecnologías son la ingeniería genética y la agrónica.

La ingeniería genética permite manipular artificialmente la constitución genética de las plantas y otros seres vivos y está permitiendo diseñar nuevos organismos con características deseables que no era posible obtener a través de los métodos convencionales de mejoramiento. La agrónica, es decir, la informática aplicada a la agricultura, está proporcionando herramientas que permiten una mejor comprensión y control de los sistemas de producción agrícola y es el tema que se enfatizará en este artículo.

Debido a que en los diferentes cultivos cada ciclo de cosecha es particular en cuanto a la distribución de las lluvias, regímenes de temperatura, radiación solar, variedad, prácticas culturales y características de los suelos, entre otros factores, la



Cortesia de Gloria J. Puerta. Cenicafé

respuesta del sistema de producción agrícola va a depender de un número tan grande de variables que la mente humana es incapaz de procesar.

Durante la última década y debido principalmente a la disponibilidad de microcomputadores, programas de cómputo y de un conocimiento comprensivo de cómo responden las plantas a las variables de clima y de suelo, ha sido posible desarrollar modelos dinámicos para simular el crecimiento

y la producción de muchos cultivos. Estos modelos permiten estudiar e integrar tanto los aspectos simples como los complejos de las interacciones entre la planta y su ambiente y además proporcionar, a las personas encargadas del manejo del sistema, un marco teórico de referencia que los asista en el proceso de toma de decisiones.

Estos modelos vienen siendo además aplicados por los investigadores para estudiar varios problemas relacionados con los sistemas

de producción como por ejemplo, el manejo del riego, plagas y enfermedades, programación de cosechas, planificación del uso de la tierra, secuencia de cultivos y pronósticos de cosecha. En su estado más avanzado, estas aplicaciones se han denominado como «Agricultura de Precisión».

En este artículo se hace un análisis del estado actual de la modelación de cultivos, sus aplicaciones y su papel en la “Agricultura de Precisión”.



▲ REGISTRO DE DATOS EN LA ESTACIÓN CLIMATOLÓGICA. Cortesía: Cenicafé

MODELOS Y SIMULACIÓN

Un modelo es una representación matemática de un sistema y moderación es el proceso de desarrollar dicha representación. La simulación son los procesos necesarios para que el modelo opere y produzca una imitación del mundo real^(4,6).

La simulación de la producción de un cultivo se puede definir como el desarrollo y la utilización de modelos del cultivo para calcular su crecimiento, desarrollo y producción⁽¹¹⁾.

TIPOS DE MODELOS

Los modelos se pueden clasificar como *empíricos* cuando sirven solamente para describir o *mecanísticos*, si se intenta describir con cierto grado de comprensión. Los modelos *estáticos* no contienen la variable tiempo, mientras que los modelos *dinámicos* si la llevan explícita. Los modelos *determinísticos* hacen predicciones definidas de cantidades, por ejemplo peso de la cosecha, sin asociarle ninguna distribución probabilística; los modelos *estocásticos* contienen algunos elementos de azar o distribuciones de probabilidad y pueden predecir no sólo el valor esperado sino también su varianza⁽³⁾.

Convencionalmente se han considerado los modelos de cultivos como una mezcla entre los mecanísticos, en los cuales todos los procesos cuantificados tienen un fundamento físico o fisiológico y los empíricos, que consisten en funciones ajustadas a medi-

ciones de campo o laboratorio y que se escogen generalmente en forma arbitraria. Tanto los procesos del suelo, por ejemplo el flujo del agua a través del suelo, como los procesos de la planta, por ejemplo la fotosíntesis y la distribución de asimilados, pueden incluir componentes empíricos o mecanísticos para su moderación⁽¹¹⁾.

ESTRUCTURA DE LOS MODELOS DE SIMULACIÓN DE CULTIVOS

Los sistemas de cultivo presentan un alto grado de complejidad. En el campo, el cultivo se ve afectado por factores tales como clima, características físicas y químicas del suelo, plagas, enfermedades, arvenses y por las interacciones entre estos factores. A través de modelos se ha intentado describir este comportamiento pero esto es sólo una aproximación del mundo real que se intenta simular.

Para simular se requieren varias condiciones: Problemas que puedan ser objeto de simulación, computadores y programas de computación, modeladores expertos, programas de computador con la estructura de los modelos, parámetros del modelo y datos sobre el ambiente físico, biológico y de clima⁽¹¹⁾.

Jones et al.⁽⁶⁾ sugieren el siguiente procedimiento para simular un sistema de producción agrícola:

Establecer un Objetivo Claro. Definir muy bien el problema y la información que se pretende derivar con la simulación. Este es un aspecto clave para el éxito de la modelación.

Definir el Sistema. Identificar cuáles son sus componentes, los límites del sistema, las entradas y las salidas. A medida que se avanza en el desarrollo del modelo, puede ser necesario redefinir el sistema.

Revisión Amplia de la Información Disponible para poder evaluar la posibilidad de cumplir el objetivo propuesto y entrar a definir un modelo conceptual.

Desarrollo del Modelo. En esta fase se utilizan diagramas para representar los componentes del sistema y sus interrelaciones. Se desarrolla además la representación matemática del sistema, las funciones específicas y las relaciones entre los componentes del modelo.

Un modelo se compone de los siguientes aspectos: 1) una *estructura* que es por ejemplo, el conjunto de ecuaciones que indican cuantitativamente y en algunos casos cualitativamente, como se relacionan las variables y los procesos y 2) *parámetros*, que son los valores numéricos en las ecuaciones. Las condiciones para correr el modelo son impuestas por los datos ambientales. En forma ideal, la estructura representa un grupo de cultivos o suelos en un rango de ambientes. El conjunto de parámetros incluidos en las ecuaciones estructurales hace que el modelo responda al ambiente, a una variedad o a un tipo de suelo, en una forma específica.

Implantación en Computador. Consiste en traducir el modelo a un código de computador para poder simular el comportamiento del sistema real. Los diagramas de flujo son de gran utilidad para traducir el modelo a códigos de computador y para documentar las relaciones entre el modelo y los códigos.

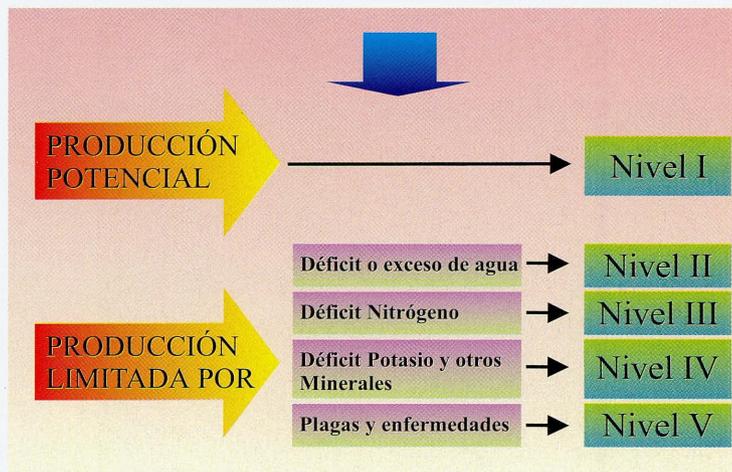
Verificación, Calibración y Validación. Son tres procesos independientes. La *verificación* consiste en evaluar la precisión con que los códigos de cómputo representan el modelo. La *calibración* se refiere a la cuantificación de los parámetros en el modelo utilizando observaciones del sistema y salidas de las simulaciones; en esta fase, la estructura del modelo permanece intacta y los parámetros se ajustan para que describan más exactamente el comportamiento del sistema en sitios específicos. La *validación* es el proceso de comparar los resultados de la si-

mulación con datos del sistema real que no han sido utilizados previamente en la calibración o en la estimación de los parámetros de cualquiera de los procesos incluidos en el modelo ⁽¹⁾.

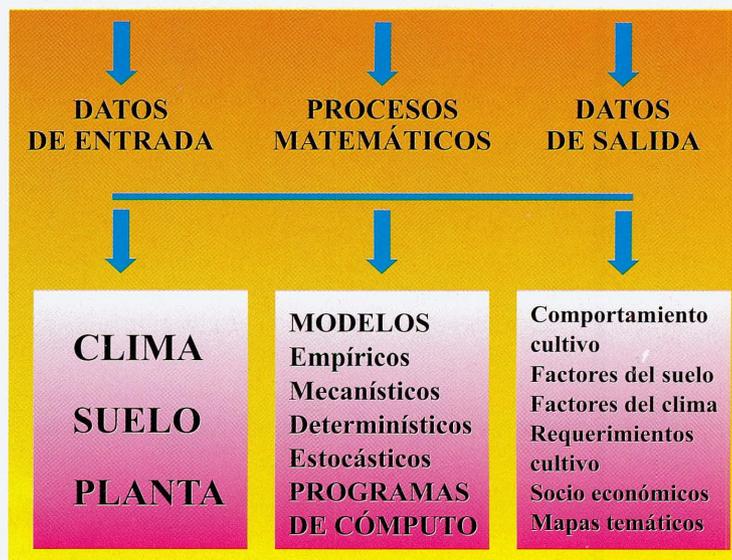
Análisis de Sensibilidad. Consiste en la evaluación del modelo con relación a diferentes valores de los parámetros. Se hace este análisis para verificar que tanto cambia una salida al variar un parámetro.

Aplicación del Modelo. Se relaciona con su uso para manejar el sistema. En este punto se considera que el modelo es completo y que ya puede ser usado por personas que no intervinieron en su desarrollo.

NIVELES DE PRODUCCIÓN CONSIDERADOS EN LA SIMULACIÓN



SIMULACIÓN DEL CRECIMIENTO



DEBIDO A QUE EN LOS DIFERENTES CULTIVOS CADA CICLO DE COSECHA ES PARTICULAR EN CUANTO A LA DISTRIBUCIÓN DE LAS LLUVIAS, RÉGIMENES DE TEMPERATURA, RADIACIÓN SOLAR, VARIEDAD, PRÁCTICAS CULTURALES Y CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS, ENTRE OTROS FACTORES, LA RESPUESTA DEL SISTEMA DE PRODUCCIÓN AGRÍCOLA VA A DEPENDER DE UN NÚMERO TAN GRANDE DE VARIABLES QUE LA MENTE HUMANA ES INCAPAZ DE PROCESAR.



Cortesía: María Cristina Cardona. Cenicafé

NIVELES DE LA PRODUCCIÓN A TENER EN CUENTA EN LA MODELACIÓN DE UN CULTIVO

Aunque la moderación se puede llevar a cabo en cada uno de los niveles jerárquicos de la organización de una planta (por ejemplo, desde célula hasta la planta entera), en la producción agrícola, lo que más interesa, es simular el crecimiento, la producción y la respuesta del cultivo a las diferentes alternativas de manejo.

En la moderación de la producción de un cultivo generalmente se consideran 4 niveles⁽⁴⁾:

Producción Potencial (nivel 1). En este nivel de producción, el crecimiento del cultivo depende solamente de las variables climáticas temperatura y ra-

diación solar. El agua y los nutrimentos están disponibles cuando la planta los necesita y por consiguiente, los procesos del suelo y el funcionamiento de la raíz, se pueden excluir de este nivel de modelación. Tampoco se consideran plagas, enfermedades y la presencia de arvenses. Los procesos claves para la simulación de este nivel de producción son los siguientes: fotosíntesis, respiración, redistribución de asimilados entre los diversos órganos, crecimiento del área foliar y los estados fonológicos del cultivo.

Producción Potencial Limitada por agua (nivel 2). En este nivel el modelo incluye un balance de agua en el suelo y los efectos de la disponibilidad de agua sobre el crecimiento y la producción potencial del cultivo.

Producción Potencial Limitada por Nitrógeno (nivel 3). En este nivel el modelo incluye la disponibilidad de nitrógeno en el suelo y los efectos de la fertilización con nitrógeno sobre el crecimiento y la producción del cultivo. Este nivel también incluye las interacciones del nitrógeno con el agua y los elementos del clima.

Producción Potencial Limitada por otros Factores de Estrés (nivel 4). En este nivel el modelo incluye la disponibilidad de otros nutrimentos así como las limitaciones por plagas, enfermedades y arvenses, sobre el crecimiento y la producción del cultivo.

Aunque este enfoque de los niveles de producción es artificial, ha resultado útil en la construcción de los modelos de cultivos, porque permite iniciar la modelación con los procesos básicos y luego continuar incluyendo secuencialmente los otros factores limitantes y que a su vez van aumentando la complejidad del modelo.

Según Jones y Ritchie⁽⁷⁾, una relación matemática generalizada que representa un modelo dinámico del crecimiento de un cultivo es como la siguiente:

$$\vec{X}_{t+1} = \vec{X}_t + f(\vec{X}_t, \vec{W}_t, U_t, t)$$

En donde:

\vec{X}_t = Vector de variables que representa el estado del cultivo y del suelo en el día t.

\vec{X}_{t+1} = Vector del estado de estas variables en el día t+1.

\vec{W}_t = Vector de las condiciones de clima que ocurrieron en el día t.

\vec{U}_t = Vector de las acciones de control tomadas en el día t (por ejemplo, cantidad de riego)

f = Las relaciones físicas y biológicas que describen las tasas de cambio de todas las variables de estado del modelo.

Como en muchos cultivos la cosecha se hace el último día de su ciclo, en el día t, la producción, Y_t , se determina integrando la ecuación anterior sobre t días y se puede expresar en función de las variables de estado, en el día t, de la siguiente manera:

$$Y_t = Y(\vec{X}_t)$$

DATOS DE ENTRADA QUE SE REQUIEREN PARA REALIZAR LA SIMULACIÓN

El grupo del IBSNAT⁽⁵⁾ ha sugerido un conjunto mínimo de datos necesarios para correr sus modelos así:

Clima (datos diarios): Radiación solar, precipitación, temperaturas máxima y mínima, longitud del día, radiación fotosintéticamente activa.

Parámetros del Suelo: Albedo, coeficiente de drenaje, número de curva de escorrentía, características por capa de suelo en cuanto a contenido volumétrico de agua a saturación, límites superior e inferior del contenido volumétrico de agua, factor de distribución de raíces, conductividad hidráulica a saturación.

Manejo del Cultivo: Fecha de siembra, densidad de siembra, variedad, riego, fertilización, tipo de suelo, localización geográfica.

RESULTADOS QUE SE OBTIENEN EN LA SIMULACIÓN

Mediante el modelo de simulación es posible conocer la respuesta del cultivo a variaciones ambientales y prácticas culturales. El modelo responde a los valores totales diarios de radiación solar, temperaturas máximas y mínimas, lluvia o riego. También responde a los manejos culturales como la fertilización nitrogenada, densidad de siembra, entre otros.

Dependiendo del objetivo, la estructura y la complejidad del modelo, se obtienen diferentes tipos de salidas. Estas incluyen información sobre variables del cultivo y del suelo a nivel diario, o resúmenes por períodos o de

todo el ciclo del cultivo, balance hídrico, características del suelo y factores de manejo. Este resumen puede incluir por ejemplo: producción, biomasa aérea, evapotranspiración acumulada, riego acumulado, número de riegos, fertilizante acumulado. Acerca del cultivo se puede obtener información sobre fenología, peso seco de hojas, tallos, frutos y raíces, índice de área foliar, número de frutos, contenidos de nitrógeno de cada órgano; también se pueden obtener gráficas de lo simulado y lo obtenido experimentalmente, que permiten evaluar el modelo, Jones y Ritchie⁽⁷⁾.

Si el modelo de simulación se une a sistemas expertos, puede producir recomendaciones para manejo del



▲ ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE DATOS. Cortesía: Diana C. Sepúlveda. Cenicafé

riego, de la fertilización, tasa y frecuencia de aplicación de agroquímicos y muchas otras:

Si el modelo se complementa con algunos programas especializados se pueden utilizar como^(1,13):

1) *Herramienta de Investigación:* Para Integración de conocimiento interdisciplinario, documentación de experimentos, como ayuda al mejoramiento genético, análisis del impacto del clima en la brechά de producción, impacto sobre la productividad, del clima, plagas y enfermedades, costos de producción, precios.

2) *Manejo de Sistemas de Cultivo:* Ayuda al manejo cultural, en el manejo del riego, toma de decisiones, en agricultura de prescripción, en manejo de riesgos me-

dian­te el análisis de la variabilidad de la producción entre años, simulación de experimentos bajo diferentes escenarios de manejo, o climáticos.

3) *Herramienta para Análisis de Políticas y Estrategias*: Decisiones estratégicas sobre épocas de siembra, selección de variedades o cultivares, inversión en riego, pronósticos de cosecha, escogencia de las mejores opciones de manejo sin riesgo ambiental y evaluación de efectos climáticos.

APLICACIÓN ACTUAL Y POTENCIAL DE LOS MODELOS DE CULTIVOS

En la actualidad se encuentran disponibles modelos de simulación para un grupo numeroso de cultivos: ALSIM (Alfalfa), GOSSYM (algodón), CERES (cebada, maíz, trigo, arroz, sorgo, millo), pasto, AUSCANE (caña de azúcar), girasol, POTATOE, (papa), SUBSTOR (yuca, ñame), piña, SOYGRO, GLYCIM (soya), PNUTGRO (mané), BEANGRO (fríjol) ^(14,16). La mayoría de estos sistemas son una mezcla de modelos empíricos y mecánicos ⁽¹⁷⁾.

El modelo SUCROS fue desarrollado en Holanda como un sistema simple y universal para modelar el crecimiento de los cultivos ⁽¹⁸⁾.

Para la aplicación de estos modelos, además de un buen diseño, es necesario un complemento muy eficiente con programas computacionales que permitan su in-

tegración en un sistema de soporte de decisiones para que el usuario pueda utilizarlo en forma fácil, con unos requerimientos mínimos de tiempo y bajo costo y que al mismo tiempo le proporcione respuestas simples y que satisfagan sus necesidades.

Algunos modelos como el GOSSYM del algodón han sido conectados con sistemas expertos como el COMAX (Crop Management Expert) para conformar un sistema de soporte de decisiones para el manejo del cultivo y que se conoce como GOSSYM/COMAX, ⁽⁸⁾. Recientemente a este sistema se le incorporó una aplicación para decisiones en el manejo de insecticidas, denominada GOSSYM/COMAX/WHIMS ⁽¹³⁾.

Los modelos GOSSYM (algodón) y GLYCIM (soya) han sido evaluados a nivel de fincas comerciales como ayuda para la toma de decisiones de manejo del cultivo ⁽¹³⁾.

Otro sistema de gran interés es el desarrollado por IBSNAT ⁽⁵⁾ denominado DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer). Combina modelos de simulación para cerca de 20 cultivos, bases de datos de suelos, clima y cultivos y programas para evaluación de estrategias, integrados en una interfase para uso en microcomputadores.

La tendencia actual es hacia el desarrollo de modelos muy versátiles, de fácil manejo, que le permitan al usuario un rango amplio de aplicaciones, sin necesidad de modificar la estructura del modelo.

LIMITACIONES DE LOS MODELOS

El arte de modelar consiste en simplificar al máximo posible y en seleccionar sólo aquellas partes de la realidad que son esenciales para la situación que se estudia. Ningún modelo es capaz de resolver todas las situaciones y en consecuencia, el diseño, la escala y el grado de complejidad deben estar de acuerdo con la aplicación que se pretenda dar al modelo y también con la cantidad de información y tiempo disponibles para su construcción y evaluación ^(1,9,10).

Los modelos completamente empíricos (por ejemplo una regresión múltiple), se pueden usar para resumir datos pasados y aún para interpolaciones dentro del rango de los datos, pero son inadecuados para realizar extrapolaciones de tipo predictivo por fuera del rango de los datos; tampoco permiten obtener explicaciones sobre la causa o efecto de un resultado experimental. Estos mo-



▲ SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE PLÁTANO. Cortesía: Gloria I. Puerta, Cenicafé

delos pueden llegar a tener tal simplicidad, que se hace necesario calibrarlos para cada nueva situación.

Los modelos mecánicos permiten un mayor grado de comprensión de los fenómenos porque se basan en procesos fisiológicos y físicos y consideran la causa y efecto al nivel de proceso. Sin embargo, la complejidad de estos modelos puede llegar a tal punto de que se vuelve muy difícil su comprensión, uso y aplicación; además requieren una mayor cantidad de información. Su eficacia también depende en grado sumo de la precisión con que se haya modelado cada proceso. De acuerdo con Whisler ⁽¹⁶⁾, los modelos de simulación deben tener un alto grado de mecanicidad y comprensión para que permitan interpretar los resultados de la investigación. Actualmente, la mayoría de los modelos de cultivos, son una mezcla de empirismo y mecanicismo.

Otra de las limitaciones más frecuentes en la modelación es la disponibilidad, calidad y precisión de los datos de entrada. Esto implica además altos costos para su obtención, una alta variabilidad espacial y temporal y la necesidad de equipos de alta calidad para su medición ⁽¹¹⁾.

TENDENCIAS EN LA MODELACIÓN DE LOS CULTIVOS: AGRICULTURA DE PRECISIÓN

Los desarrollos en el campo de la informática agrícola permiten visualizar aplicaciones futuras de gran interés, en el campo de la simulación del crecimiento y manejo de los cultivos ⁽¹³⁾ y que se relacionan con los desarrollos que se mencionan a continuación:

Simulación Orientada a Objetos: Tradicionalmente los modelos de cultivos han sido escritos utilizando los lenguajes de programación tradicionales como el Fortran, Pascal o lenguajes para simulación por computador como el CSMP. De acuerdo con esta estructura, aún los modelos más comprensivos consisten de varios miles de líneas de códigos de computador y son de difícil comprensión aún para los expertos en el tema.

Con base en la programación orientada a objetos, los modelos se pueden escribir en forma de módulos que corresponden directamente a objetos encontrados en la naturaleza, lo cual permite reconocer fácilmente los componentes del sistema. Cada módulo u objeto debe contener todos los códigos y datos necesarios para describir lo más completamente posible ese objeto y debe ser capaz de operar en forma independiente, por lo cual, no es necesario tener conocimiento del funcionamiento de los

otros componentes. Los módulos se comunican entre sí mediante interfases muy específicas. La simulación orientada a objetos permitirá separar procesos y órganos objetos, que son dependientes de la especie de planta, de aquellos que son independientes.

Sistemas de Soporte de Decisiones: Son sistemas de cómputo interactivos que permiten a los responsables de la toma de decisiones, utilizar datos y modelos, para resolver problemas que no tienen una estructura definida. Actualmente existen diferentes sistemas que permiten mejorar las decisiones de manejo de los cultivos como el GOSSYM/COMAX ⁽⁸⁾ o examinar interacciones complejas entre varias prácticas agrícolas y condiciones de clima y suelo, para dar soluciones apropiadas a problemas de un sitio específico como lo hace el DSSAT ⁽⁵⁾.

Sistemas de Posicionamiento Geográfico: Son un sistema de 24 satélites que suministran al usuario entre 5 y 8 señales de posición visibles desde cualquier punto de la tierra. Mediante el uso de un sensor que recibe estas señales, se puede computar la posición geográfica (latitud, longitud y altitud) de un sitio en forma muy precisa.

Sistemas de Información Geográfica: Son un conjunto de programas que permiten la codificación de información ligada a coordenadas espaciales y su presentación en mapas. De esta forma es posible asociar por ejemplo diferentes tipos de información específica sobre un cultivo, en un sitio particular o tener representaciones en mapas, de la variabilidad espacial de diferentes características de los lotes de la unidad agrícola.

En esta forma los usuarios podrán simular el crecimiento de su cultivo para un sitio específico, identificar su posición en el campo, consultar su sistema soporte de decisiones y desarrollar “grabaciones de control” para usar con microcomputadores conectados a los equipos con los cuales efectuar ciertas labores y dosificar automáticamente la aplicación de agroquímicos, por ejemplo.

Maquinaria Inteligente: Los diferentes equipos motorizados que se utilizan en labores agrícolas (tractores, cosechadoras, aviones etc.), si se dotan con microcomputadores, sensores de posición geográfica, programas de información geográfica y una «grabación de control, se convierten en «equipos inteligentes»

Manejo Específico de Sitio: Con los equipos inteligentes y los sistemas de soporte de decisiones, los agricultores podrán ejercer un control de su finca metro por metro y aplicar solamente lo necesario y en el momento oportuno.

De esta forma, la integración de los modelos de cultivos con sistemas expertos, sensores de posición geográfica

fica, sistemas de información geográfica y equipos inteligentes están volviendo realidad una nueva tendencia en el campo agrícola denominada como Agricultura de Precisión.

LA MODELACIÓN DE CULTIVOS EN COLOMBIA

Las técnicas de moderación y simulación del crecimiento de los cultivos y sus respuestas al manejo no han sido utilizadas ampliamente en Colombia⁽²⁾, por lo cual, es de gran interés su implantación tanto a nivel universitario como de las instituciones encargadas de la investigación en cultivos, con el objeto de que se mejore tanto la investigación como el proceso de toma de decisiones en todos los niveles del sector agropecuario. La investigación se beneficiará al tener la posibilidad de simular experimentos y tratamientos para un buen número de cultivos y de esta manera poder escoger en forma preliminar aquellos que muestren la tendencia a una mayor probabilidad de éxito, ahorrando además tiempo y recursos. Por último, las empresas agrícolas se beneficiarán al poder simular situaciones de riesgo y opciones de manejo y así mejorar la eficiencia de la administración de las fincas al tomar decisiones mejor fundamentadas.

Para progresar en este sentido es necesario proporcionar herramientas y entrenamiento en las técnicas de moderación en las universidades e instituciones de investigación, calibrar y validar los modelos para las condiciones locales, desarrollar modelos para los cultivos de interés en el país y desarrollar aplicaciones a nivel de la empresa agrícola.

Recientemente se destaca el esfuerzo que realiza un grupo interdisciplinario de investigadores de la Universidad del Valle y el Centro Nacional de Investigaciones de Café «Pedro Uribe Mejía» -CENICAFE, quienes apoyados en los diferentes trabajos realizados sobre el cultivo del café, durante más de 50 años de investigación y para integrar estos conocimientos y generar otras investigaciones, están desarrollando un «*Modelo de Simulación del Crecimiento y Desarrollo de la Planta de Café*»⁽¹²⁾, de acuerdo con la filosofía de moderación aplicada al manejo de los cultivos, descrita en este artículo.

Los objetivos de este trabajo son: Pronosticar crecimiento, desarrollo y producción del cultivo del café, planear y simular experimentos. Para tal fin, se seleccionó una estructura que simulara el crecimiento vegetativo y reproductivo y la producción potencial, por épocas y regiones, con suficiente confiabilidad, teniendo como estrategia en su construcción, lo propuesto por la escuela

Holandesa, caracterizando la producción y el crecimiento del cultivo con la producción de materia seca, con adecuadas cantidades de nutrientes y agua en el suelo durante el periodo de crecimiento. Con estos supuestos, la tasa de crecimiento es determinada por las condiciones de clima, en particular, la radiación absorbida, considerando los procesos de asimilación de CO₂, respiración de mantenimiento y crecimiento, distribución de los asimilados y desarrollo de área foliar.

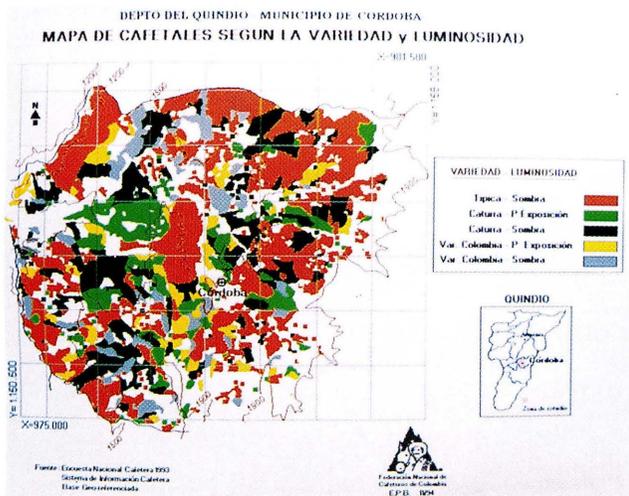
El modelo que describe el sistema en su conjunto, según lo planteado anteriormente, se caracteriza por ser lógico, estocástico, dinámico, recursivo y para fenómenos que ocurren en períodos relativamente extensos, por tratarse de un cultivo perenne, como lo es el café. La metodología para obtener dicho modelo, se sustentó en las etapas de conceptualización, diseño, implantación, programación, evaluación y validación.

Hasta el momento se tiene una primera versión del modelo y su evaluación presenta resultados muy promisorios, confrontado con lo observado en este cultivo, según calificación de los expertos.

CONCLUSIONES

La moderación de cultivos no puede considerarse en la actualidad como una utopía. Los desarrollos de la última década demuestran en forma conclusiva su creciente importancia. La moderación del crecimiento de los cultivos es una herramienta de gran valor para la investigación, para la tecnología de manejo de los cultivos y para orientar la toma de decisiones. La moderación puede permitir el descubrimiento de vacíos en la comprensión de los procesos y estimular así nuevos trabajos teóricos y experimentales. Los modelos pueden proveer un marco de referencia para la interpretación de los resultados de experimentos de campo en diferentes ambientes. También se pueden utilizar para explorar con las debidas precauciones, formas de mejorar las prácticas de manejo o minimizar los riesgos. La integración de los modelos de cultivos con sistemas expertos, sensores de ubicación geográfica, sistemas de información geográfica y equipos inteligentes están volviendo realidad una nueva tendencia en el campo agrícola denominada Agricultura de Precisión.

Es muy poco lo que se ha realizado en Colombia en moderación de cultivos y se necesita el apoyo a los centros de investigación agrícola y las universidades, para promover la estructuración y aplicación de esta tecnología. &



MAPAS TEMÁTICOS. PODRÍA UBICARSE CUANDO EL TEXTO HACE REFERENCIA AL CAFÉ.
 Cortesía: Diana C. Sepúlveda. Cenicafé

BIBLIOGRAFÍA

- Boote, K.J.; Jones, J.W.; Pickering, N.B. 1996. Potential uses and limitations of crop models. *Agron. J.* 88: 704-716.
- Cantor, F.; Cure, J.R.; Orozco, de A. M. 1995. Simulación del crecimiento y desarrollo de *Gypsophila paniculata* var. Perfecta, incluyendo el efecto de Vernalización. In: Reunión de la Red de la Sociedad Internacional de Biometría para Centro América, El Caribe, Colombia y Venezuela, 4. Santa Marta, Colombia. Junio 11 -15, 1995. Resúmenes de Comunicaciones.
- France, J.; Thornley, J.H.M. 1984. *Mathematical Models in Agriculture. A Quantitative Approach to Problems in Agriculture and Related Sciences.* London, Butterworths. 335 p.
- Goudriaan, J.; van Laar, H.H. 1994. *Current Issues in Production Ecology. Modelling Potential Growth Processes. Text Book With Exercises.* London, Kluwer Academic Publishers. 238 p. 5.
- International Benchmark sites Network for Agrotechnology Transfer. 1993. *The IBSNAT Decade.* Honolulu, Hawaii, Department of Agronomy and Soil Science, College of Tropical Agriculture and Human Resources, University of Hawaii. 178 p.
- Jones, J.W.; Mishoe, J.W.; Boote. K. J. 1987. *Introduction to simulation and modeling.* Taipei, ASPAC Food and Fertilizer Technology Center (Technical Bulletin N° 100). p.1 -19.
- Jones, J.W.; Ritchie, J.T. 1990. *Crop Growth Models.* In: Hoffman, G.J.; Howell, T.A.; Solomon, K.H. Eds. *Management of Farm Irrigation Systems,* St. Joseph, MI. ASAE. p. 63-89.
- Mckinion, J.M.; Baker, D.N.; Whisler, F.D.; Lambert, J.R. 1989. Application of the GOSSYM / COMAX system to cotton crop management. *Agric. Sys.* 31: 55-65. .
- Monteith, J. L. 1996. The quest for balance in crop modelling. *Agron. J.* 88:695
- Passioura. J. B. 1996. Simulation modele: Science, snake oil, education, or engineering?. *Agron.J.* 88: 690-694.
- Penning de Vries, F.W.T. and Spitters, C.J.T. 1991. The potential for improvement in crop yield simulation. In: Muchow, R. S.; Bellamy, J.A. Eds. *Climatic Risk in Crop Production: Models and Management for Semiarid Tropics and Subtropics.* Wallingford, CAB. p. 123-140.
- Quiroga, Z.F.; Orozco G.,L.; Arcila P.,J.; Riaño H.,N.M.; Jaramillo R.,A.; Montoya, R., E.C. 1995. Simulación matemática de la producción potencial del cultivo del café. In: Reunión de la Red de la Sociedad Internacional de Biometría para Centro América, El Caribe, Colombia y Venezuela, 4. Santa Marta, Colombia. Junio 11-15, 1995. Resúmenes de Comunicaciones.
- Reddy, K.J.; Hodges, H.E.; Mckinion, J.M. 1997. *Crop Modeling and Applications: A Cotton Example.* *Adv. Agron.* 59:225-290.
- Ritchie, T., J. 1991. Specifications for the ideal model for predicting crop yields. In: Muchow, R. S. Bellamy, J.A. Eds. *Climatic Risk in Crop Production: Models and Management for Semiarid Tropics and Subtropics.* Wallingford, CAB. p.97-122.
- Spitters, C.J.T.; van Keulen, H.; van Kraalingen. D.W.G. 1989. A simple and universal crop growth simulator: SUCROS 87. In: Rabbinge, R.; Ward, S.A.; van Laar, H.H. *Simulation and Systems Management in Crop Production.* Wageningen, PUDOC. p.147-181.
- Whisler, F.D.; Acock, B.; Baker, D.N.; Fye, R.E.; Hodges, H.F.; Lambert, J.R.; Lemon, H.E.; Mckinnion, J.M.; Reddy, V.R. 1986. *Crop Simulation Models in agronomic Systems.* *Adv. Agron.* 40: 142-208.