

---

## MODELIZACIÓN Y EXPERIMENTACIÓN EN AGRONOMÍA

*Ignacio Castro  
Jean-Marie Hétiér*

### INTRODUCCIÓN

Al inicio del desarrollo de la informática científica, la modelización apareció como una opción facultativa que venía añadirse a los métodos tradicionales de la agronomía experimental cuyos postulados de causalidad lineal parecían inmutables.

Desde el punto de vista de la historia agronómica, el desarrollo de la modelización constituye una etapa comparable al desarrollo de la inteligencia colectiva. Como lo dice Legay (1996), en su reflexión recapitulativa sobre la historia de la modelización, el fenómeno de la inteligencia colectiva es muy conocido en algunas especies animales como las hormigas o las abejas. Las abejas son "estúpidas" cuando se toman individualmente. Pero, si se toman a todas las abejas de una colmena, se observa que la suma de las individualidades consigue la aparición de una forma de inteligencia colectiva que les permite encontrar el camino más corto hacia los alimentos hacia afuera o hacia la colmena de vuelta.

El experimentador agronómico tradicional, a menudo solitario, se limitaba en general a optimizar todos los factores de rendimiento conocidos, excepto uno cuya influencia sobre la producción vegetal se quería poner de relieve. El tipo de información así obtenida dejaba prosperar, una representación aditiva de los factores de producción, minimizando las interacciones y otros aspectos de la complejidad de los sistemas suelo-planta.

En la producción agrícola, el resultado práctico de una representación aditiva de los factores de producción vegetal, constituye la base de una argumentación comercial que acompaña "paquetes tecnológicos" de valor supuestamente universal, que se venden, casi tal cual, a los productores del mundo entero.

Además, los métodos de la agronomía tradicional basados en el aislamiento de los factores, con el fin de detectar su influencia respectiva sobre el resultado final, se realizan al mismo tiempo que la compartimentación disciplinaria de la investigación científica.

Por el contrario, el desarrollo de la modelización corresponde mejor a un tipo de investigaciones multidisciplinarias y, por lo tanto, colectiva. La simulación por modelos matemáticos se basa en la tradición intelectual de los ciclos bio-geoquímicos brevemente evocada en el Capítulo 1 del presente Referencial. Esta tradición representa un progreso histórico en el sentido que los sistemas de ecuaciones pueden tomar en cuenta los flujos de nutrientes en el sistema suelo-planta, sus interacciones y su simultaneidad. Por ello, los modelos de simulación constituyen una representación más explícita y adecuada de la compleja realidad del sistema suelo-planta que las representaciones intuitivas y empíricas de los agrónomos y agricultores tradicionales.

Durante estos últimos treinta años, la experimentación agronómica tradicional casi desapareció a falta de recursos financieros y de personal científico y técnico adecuado. Esto conduce

el discurso oficial a elogiar los méritos de la modelización que permitiría prescindir de experimentaciones largas, costosas y, muy a menudo, inútiles. En realidad, este discurso oficial sirve sobre todo para disimular el hecho de que no quieren financiar los múltiples progresos quedando por hacer en modelización.

En efecto, estos progresos indispensables no se pueden realizar sin basarse en distintas actividades experimentales, incluyendo experiencias de larga duración, las cuales deben todavía desarrollarse en todos los países y para todos tipos de cultivos. Se sabe desde el inicio que, para elaborar modelos válidos, es necesario establecer valores numéricos correctos para los parámetros relativos a la planta (duración de las fases de desarrollo, velocidad de crecimiento de las partes aéreas y de las raíces), o relativas al suelo (parámetros hídricos o alimenticios, toxicidad, etc.).

El desarrollo de investigaciones, asociando estrechamente la modelización y la experimentación agronómica, supone una clara conciencia de la necesidad de asociar estas actividades de manera coherente en el espacio y en el tiempo para a la vez:

- abastecer la investigación
- apoyar la enseñanza
- racionalizar la producción agrícola.

El presente capítulo reúne tres ejemplos de investigaciones experimentales parciales y limitadas pero que pueden contribuir a modificar modelos existentes, para mejorar su poder predictivo y explicativo.

Primero recordaremos principios generales en el uso de modelos matemáticos en la investigación: conceptos, tipos de modelos, criterios útiles en la selección de los mismos.

Luego veremos ejemplos de tentativas de aplicación del modelo CERES Maíz realizadas en el norte de Venezuela evocando las correcciones necesarias para poder aplicarlo localmente después de una re-calibración para adaptarlo a las condiciones locales del ciclo del agua y del nitrógeno.

A continuación, seguiremos examinando otros ejemplos de trabajos preliminares dedicados, primeramente, a entender y mejorar la gestión eficiente de los fertilizantes nitrogenados por los cultivos del maíz y del arroz, en suelos llaneros del occidente del país con la finalidad de aplicar mejor los modelos CERES-Maíz y CERES Arroz.

Para terminar, veremos el caso de un modelo sencillo (Modelo MOMOS) destinado a mejorar la gestión de las reservas orgánicas de suelos andinos y eventualmente de su fertilización.

Al finalizar esta revisión esperamos convencer al lector de la necesidad de estimular este tipo de investigación relacionando estrechamente modelización y experimentación para:

- inducir un renacimiento de la investigación agronómica,
- mejorar la formación profesional de los actores del agro venezolano,
- fortalecer una producción agrícola duradera en Venezuela y encontrar así el camino más corto hacia la independencia alimentaria.

## **Los modelos matemáticos y la investigación en agronomía**

Un modelo sería la representación de las relaciones entre algunas cantidades o cualidades definidas en el sistema suelo-planta generalmente en términos matemáticos o físicos (Jeffers, 1982) que pueden agruparse según un esquema básico de modelización o de procedimiento (Figura 5.1).

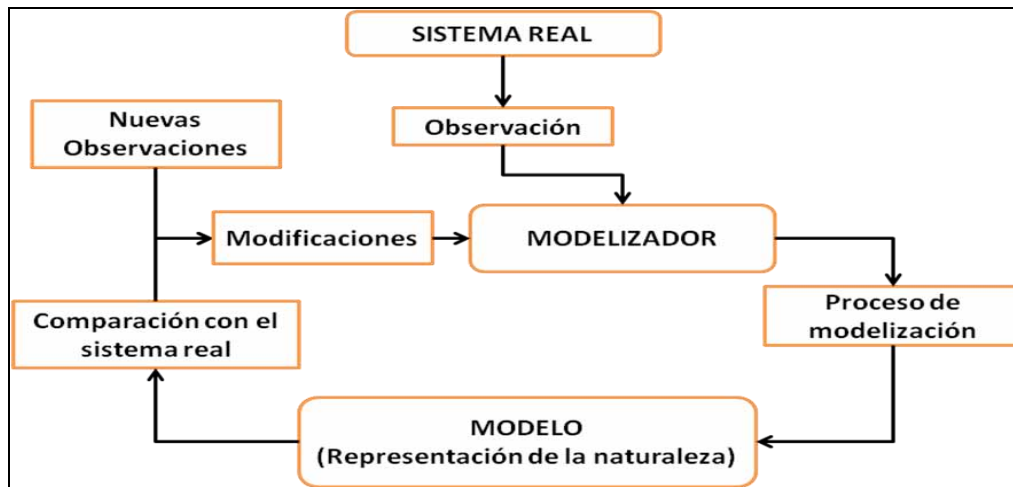


Figura 5.1. Esquema básico de la modelización.

En la mayoría de los casos, la simulación de los procesos asumidos por el modelo, se realiza mediante la configuración de un conjunto de ecuaciones relativamente simples, pero asociadas de manera adecuada para que el resultado de esta asociación simule satisfactoriamente el resultado de los fenómenos complejos implicados (De Coursey, 1985). Estos sistemas de ecuaciones y proposiciones lógicas intentan representar las relaciones entre **variables** (propiedades mensurables del sistema cuyas magnitudes varían en función del tiempo) y **parámetros** (cantidades temporalmente invariables que caracterizan al sistema). Estos modelos de simulación de funcionamiento del sistema suelo-solución-planta han sido usados extensivamente desde fines de los años 60 del siglo pasado.

Durante este mismo período, las computadoras se han vuelto progresivamente instrumentos de uso común, facilitando el empleo de modelos de complejidad creciente destinados primero a la predicción global del resultado de los fenómenos físicos, químicos, biológicos implicados en el funcionamiento complejo de los sistemas suelo-planta.

A continuación consideramos indispensables unos breves comentarios, destinados a los lectores que no están familiarizados con la modelización de los sistemas suelo-planta.

El modelo recibe informaciones por medio de ficheros de entrada. Estas informaciones son tratadas por el programa, y los resultados comunicados al usuario por ficheros de salida. Se comparan entonces los valores simulados a las obtenidas por las mediciones experimentales. En caso de desacuerdo, el programa se modifica para mejorar los resultados de la simulación. Es lo que se llama la **calibración** del modelo (Figura 5.2). Es también necesario comprobar que la mejora aportada no es fortuita. Para eso, se utiliza el programa modificado con otros datos independientes de los primeros. Esta última fase se suele llamar **validación** (Figura 5.2).

### Tipos de modelos

Los modelos matemáticos utilizados en agronomía pueden ser categorizados en dos clases: los modelos solamente predictivos o "**empíricos**" y los modelos causales o "**mecanísticos**".

Los modelos empíricos son reducidos a una expresión matemática simple que transforma un grupo de variables de "entrada" en una "salida" de resultados, sin tratar ni siquiera de describir el

proceso bajo estudio. Los modelos de regresión y muchos modelos estadísticos son buenos ejemplos de modelos predictivos empíricos.

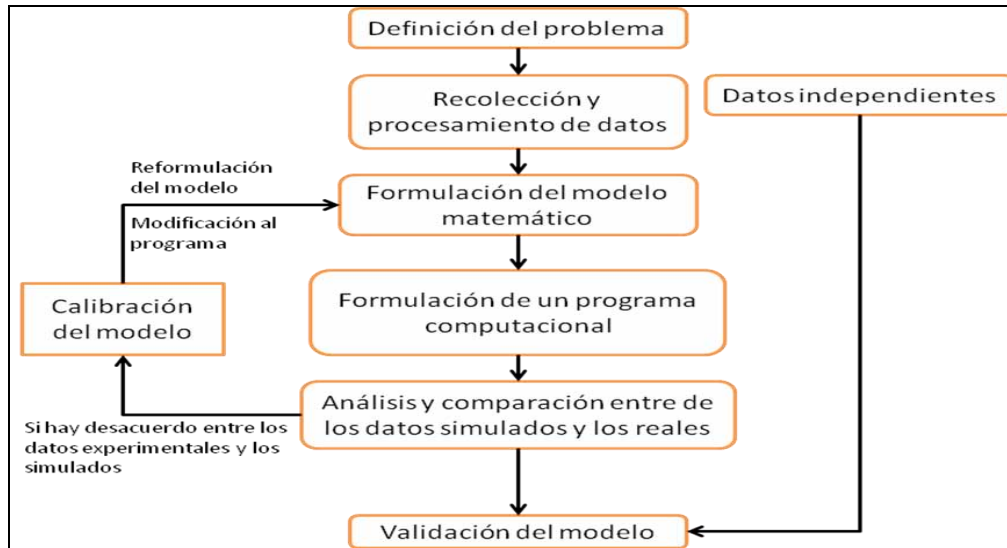


Figura 5.2. Esquema Básico del modelo matemático.

Los modelos empíricos son generalmente sencillos, requieren menos datos que los causales y resultan, por lo tanto, menos costosos tanto en su elaboración como en su utilización. Pero tienen la desventaja de no poder ser mejorados, ni extendidos más allá de las condiciones en las cuales fueron elaborados. Por ello, pueden ser fácilmente aplicados en forma incorrecta y además, conducir a muchos usuarios sin capacidad crítica, a muchas confusiones en la interpretación de los procesos bajo estudio.

Los modelos causales o “mecánicos” tienen el propósito de describir de una manera más exacta y verificable posible, los procesos físicos, químicos y biológicos implicados en la relación suelo-planta a partir de los datos de entrada disponibles. Este tipo de modelos pueden ser usados para predecir respuestas de procedimientos de fertilización, evaluar el efecto de cambio ambiental, coordinar y estructurar investigación, siendo sus principales desventajas el de requerir mayores volúmenes de datos y extensas actividades preliminares para su calibración y validación.

### Limitaciones para el desarrollo y uso de modelos

Actualmente, existen numerosos modelos aplicables en la investigación agronómica, lo que implica que planificadores, investigadores u otros profesionales que hacen uso de ellos, deben estar al tanto de las mayores limitaciones para su uso y desarrollo. En este sentido, Independientemente del tipo de modelos considerado, estos varían en su grado de complejidad. Así, pueden contemplarse desde formulaciones extremadamente simples hasta otras en las que intervienen una gran variedad de parámetros y variables cuyas interacciones son de carácter no lineal (Ibáñez *et al.*, 1995).

Al hacerse compleja la estructura de un modelo, aumenta el tiempo empleado en su diseño, construcción y comprensión, así como los costos de implementación. Se estima, comúnmente en el caso de un modelo representativo de las relaciones suelo-planta para cultivos comunes implicando la gestión de los suelos, que se emplea hasta 10 más tiempo, en las etapas de calibración, validación,

evaluación y verificación, que en el desarrollo inicial del modelo. Otra dificultad es que muchos modelos son provistos de valores deficientes para algunos parámetros, cuando el usuario no tiene la información necesaria. En este caso, sus valores se calculan mediante las denominadas funciones de transferencia, o escogiendo variables indirectas (también llamadas subrogadas) relacionadas con las que se deberían estimar. La razón debe buscarse en el hecho de que, a pesar de que existan métodos para su determinación, estos pueden llegar a ser caros o complicados (Ibáñez et al., 1995). Ello puede conducir a errores significativos en la respuesta simulada por el modelo inicial, lo que conduce a muchos usuarios a compensar estos errores sistemáticos por otros errores compensatorios en las etapas de calibración y validación.

La primera consecuencia de esta complejidad de la modelización mecánica es que, en los primeros pasos, se trata muy a menudo de llegar a un compromiso entre la disponibilidad de datos, los costos y el tiempo requeridos para la construcción y la calibración del modelo y las restricciones experimentales para la determinación de ciertas variables. De allí, por ejemplo en el caso de estos modelos mecánicos que agrupan datos producidos por especialistas de varias disciplinas tales como hidrología, edafología, química, microbiología, fisiología vegetal, es casi imposible para una sola persona y, muchas veces, para el personal de una estación experimental especializada, desarrollar modelos de este tipo. Actualmente, se ha progresado en la materia, la relación entre el tiempo empleado en la adquisición de datos y el gastado en la construcción del modelo se ha reducido significativamente.

Pero, mientras en sus inicios, la tarea de modelización se centraba preferentemente en la obtención de datos experimentales, la sofisticación de los productos computacionales actuales ha invertido esta tendencia. Según Anderson y Sambles (1988), este hecho resulta más que preocupante desde diferentes puntos de vista. Tomando un ejemplo bien alejado de la agronomía, aún no se ha cuantificado todavía el número de especies biológicas que existen en el Planeta. Pero, en lugar de formar a más taxónomos que las identifiquen, se destina más tiempo y recursos económicos a la elaboración de modelos que intenten predecir las que pudieran teóricamente existir.

Finalmente, los modelos son empleados más a menudo para la predicción de un amplio espectro de circunstancias ambientales y agronómicas que para solucionar problemas de la producción actual (Anderson y Sambles, 1988). Ello se hace, más o menos a ciegas, sin tomar las precauciones suficientes para asegurar la confiabilidad de los modelos empleados.

En vista de las dificultades señaladas en el proceso de modelización, una vez desarrollados los modelos, debe haber una adecuada escogencia de los procedimientos de **calibración**. En un primer lugar, definiéndose bien las condiciones iniciales. Luego, se debe validar el mismo modelo, pero en lugares y condiciones diferentes, para asegurarse de la calidad de las predicciones y del producto final. El modelo solamente se pondrá a disposición de los usuarios luego de su correcta y confirmada **validación**.

Aunque no profundizaremos en este tema, es obvio que existen áreas de investigación en donde la modelización ha progresado más que en otras. En el ámbito de la geomorfología, las disciplinas que hacen un mayor uso de la modelización son la hidrología y la geomorfología fluvial; mientras que en edafología y en agroclimatología, los modelos se usan para la evaluación de la degradación por erosión y contaminación de suelos. Pero esta herramienta científica ha dado sus mayores y espectaculares logros en el área climatológica, al lograr predecir en muchos de los casos los cambios en el comportamiento del sistema climático.

### Criterios útiles en la selección de modelos

Varios criterios pueden ser de utilidad al momento de seleccionar el modelo más apropiado para la resolución de determinados problemas, en ellos están implícitas las respuestas dadas por los usuarios a las siguientes preguntas:

- ¿Qué datos son necesarios para manejar el modelo? o alternativamente,
- ¿Qué datos están disponibles?
- ¿Cuál es la escala espacial del problema (granja, campo experimental, distrito, cuenca).
- ¿Qué escala de tiempo es más importante: un simple evento, valores semanales, mensuales o anuales?
- ¿Qué objetivos específicos son los más importantes en la evaluación del problema?
- ¿Son necesarios valores absolutos con rango de probabilidad de una dada magnitud?
- ¿Son de mayor importancia las comparaciones relativas entre alternativas?

El primer punto es de primordial importancia, ya que el modelo ideal puede estar a disposición, pero si el usuario no tiene los recursos para recaudar los datos requeridos, el modelo resulta de poca ayuda. Aclarar los puntos siguientes necesita una reflexión colectiva del grupo implicado en la decisión de usar el modelo elegido con relación a los objetivos de investigación o de ayuda a la decisión, en materia de gestión de suelos cultivados a corto, mediano o largo plazo.

### Ventajas del uso de modelos en la investigación

Entre las numerosas ventajas del uso de modelos de apoyo en la investigación agronómica se deben señalar las siguientes:

1. Los modelos son eficientes una vez que estos cuentan con una buena base de datos experimentales que respalden su funcionamiento. Una vez consolidados con base en las calibraciones y validaciones, pasan a ser herramientas eficientes y de bajo costo, pudiéndose así extrapolar mucho de sus interpretaciones y usos a distintos escenarios y manejos. Frente a ellos, los experimentos de campo tradicionales requieren, comúnmente, de más tiempo y dinero, y sus resultados suelen ser de aplicación local limitada, siendo muy difícil su interpretación y extrapolar a otras condiciones.
2. Los modelos son útiles en la determinación de efectos a largo plazo. Cientos de años pueden ser simulados prácticamente usando información climática generada por modelos climáticos asociados. Este ha sido el caso de los estudios relacionados a los modelos climáticos, en donde se han logrado obtener proyecciones simuladas de cambios seculares.
3. Un ilimitado número de estrategias de manejo pueden ser consideradas. Los experimentos de campo pueden solamente considerar unas pocas estrategias de manejo (usualmente aquellas que son populares basados en el diseño del experimento). Este ilimitado número de estrategias vienen dadas también por la libertad que se dan los modelizadores de complementar información experimental con datos provenientes de otros experimentos, o de la literatura especializada, o través de la generación directa por los mismos modelos.
4. El desarrollo de modelos viene a ser un ejercicio de aprendizaje que incrementa el conocimiento acerca de los procesos involucrados en el fenómeno bajo estudio. La modelización debería convertirse en la primera fase a implementar antes de recurrir directamente a la resolución de una o varias hipótesis por medio de los experimentos de

campo. La resolución de problemas debería estar orientada a generar, en primer lugar, modelos conceptuales para después proseguir con la conformación de los modelos mecanísticos, ya basados en la experimentación.

### Componentes típicos de los modelos para la investigación agronómica

Los modelos más utilizados en la investigación agronómica, incluyen en general los tres primeros de los siguientes componentes:

- Hidrología
- Ciclos de nutrientes
- Crecimiento y desarrollo de los cultivos
- Labranza
- Consumo animal en hierbas y pastos.

**El componente hidrológico** debe ser capaz de simular evapotranspiración, percolación, escorrentía superficial y flujo sub-superficial. También debe describir apropiadamente la distribución del agua en el suelo a través de la zona de enraizamiento para establecer, con una precisión suficiente, los ciclos de nutrientes y la predicción de escorrentía. Adicionalmente, el modelo debe incluir y mantener al día su balance hídrico.

**Los componentes del crecimiento y desarrollo de la planta** deben estar disponibles para simular correctamente el ciclo del carbono en los cultivos más importantes. Estos modelos deben simular correctamente las fases de desarrollo de la planta (fotosíntesis, respiración, traslado interno, pérdidas por senescencia y exudación), el rendimiento de los cultivos y la producción de residuos de cosecha. Tales datos varían para cada variedad de la misma especie y por lo tanto deben ser objeto de renovados esfuerzos de calibración y validación.

En general, el **componente ciclos de nutrientes** se limita a los elementos nitrógeno y, a veces, fósforo, en sus formas solubles y adsorbidas. Los componentes necesarios del balance del nitrógeno incluyen pérdidas por lavado, escurrimiento, residuos de cosecha, volatilización, desnitrificación, inmovilización, mineralización, nitrificación, absorción por las plantas, aportes por la lluvia y fertilizantes. El balance del fósforo debe incluir pérdidas por escurrimiento, residuos de cosecha, absorción por la planta, fertilización, disponibilidad para el cultivo. Procesos que afectan el transporte de nutrientes tales como: la fijación-liberación del fósforo o del potasio, también, deberían ser simulados.

**El componente labranza**, si existe, debe ser capaz de simular los efectos del laboreo sobre las propiedades del suelo que afectan la hidrología, erosión-sedimentación y crecimiento de las biomásas del suelo y, por supuesto, de los cultivos. Dicho componente debe describir, apropiadamente, la distribución de fertilizantes y residuos de cosecha que son mezclados con la capa arable del suelo.

Asimismo, en el caso de **la simulación de cobertura herbácea destinada al pastoreo**, el modelo debe simular el consumo de hierbas y pastos por los animales. Este componente debe ser capaz de predecir: el efecto del pastoreo sobre el desarrollo de las plantas, la evapotranspiración, el escurrimiento, la erosión y los ciclos de nutrientes para poder predecir los efectos del pastoreo a mediano y largo plazo.

### Requerimientos comunes de los modelos para la investigación sobre agro-ecosistemas

Los componentes individuales de los modelos deben ser completamente compatibles y capaces de aceptar datos de otros componentes o bien transmitir datos de salida a los otros componentes. En

la época de generalización del uso de modelos se estableció una lista de los requerimientos ideales que, en su totalidad, deberían cumplir los modelos (USDA/SEA-AR, 1981).

En esta lista, hemos seleccionado los requisitos siguientes como los más importantes y realistas en las condiciones actuales. Así, los modelos deben:

1. Simular los procesos involucrados en forma continua, de una manera simultánea, realística y usando un período de tiempo diario
2. Ser estructurados como para permitir un reemplazo de componentes, sin mayores dificultades, cuando el desarrollo de algoritmos mejorados así lo requiera
3. Basarse en parámetros físicos y usar datos fácilmente disponibles. Esto elimina aquellos modelos que requieren calibración de parámetros de entrada que no fueron previamente y adecuadamente procesados en la zona considerada
4. Ser computacionalmente eficientes como para permitir la simulación de varias estrategias de manejo; a veces, incluyendo el punto de vista económico
5. Tener la habilidad de "decidir" las estrategias de manejo más convenientes a implementar, en la medida en que las condiciones del suelo cambian por efecto del manejo de la tierra
6. Ser capaces de simular largos períodos. Esto requiere de un sub-modelo generador de datos climáticos; pues valores medidos a largo plazo para las variables involucradas tales como precipitación temperatura y radiación solar son, generalmente, no disponibles.

A continuación, vamos a examinar ejemplos de algunos modelos y trabajos dedicados al área de la modelización en Venezuela. En este sentido, es importante dar una breve descripción inicial acerca del modelo que ha sido más utilizado en el país (CERES-Maíz) y sus aportes.

#### Primer ejemplo: El modelo CERES-Maíz

EL CERES-Maíz o en inglés **CERES-MAIZE (Crop Environment Resource Synthesis)** es un modelo híbrido que tiene partes claramente mecánicas y partes más empíricas. Ha sido diseñado para simular el crecimiento del maíz, en conjunto con las dinámicas del agua del suelo y la temperatura, así como de las dinámicas del nitrógeno a escala de campo para una temporada de crecimiento. Igualmente es usado para evaluar las prácticas de fertilización nitrogenada sobre la toma de nitrógeno por parte del cultivo, así como también las pérdidas del mismo por escurrimiento, volatilización, desnitrificación, lixiviación en el suelo. Entre sus capacidades está la de evaluar los potenciales efectos de las precipitaciones y la eficiencia del cultivo en el uso del agua.

El CERES-Maíz fue introducido por primera vez por Jones y Kiniry (1986); con los años, ha sido mejorado e incluido como un módulo en el paquete de software DSSAT-CSM (Apoyo a las Decisiones del Sistema de Transferencia de Agrotecnología Modelo de Simulación de Cultivos Ritchie *et al.*, 1998; Jones *et al.*, 1998; Hoogenboom *et al.*, 2003).

Este modelo simula el crecimiento de maíz sobre una base diaria, en respuesta al clima, el suelo y las condiciones ambientales, los tipos de fertilizantes, y otras estrategias de gestión sobre el suelo. En él, se simula el desarrollo fenológico de la planta, la acumulación y la partición de biomasa, y el rendimiento final en el cultivo. El CERES-Maíz ha sido ampliamente utilizado para investigar diversos aspectos del crecimiento del maíz, incluyendo el cálculo de área foliar (Bert *et al.*, 2007), la expansión de la hoja y la senescencia (Lizaso *et al.*, 2003a.), la asimilación de la hoja, la captura de luz (Lizaso *et al.*, 2003b.), número de granos (Ritchie *et al.*, 1998; Lizaso *et al.*, 2007), y ensilado.

El modelo CERES-Maíz puede así proporcionar una evaluación del sistema para apoyar las decisiones en los sistemas de producción donde se supone la existencia de un riesgo (Jagtap *et al.*,



1999). Su utilización ha sido amplia en varios entornos agrícolas y en varias localidades en los Estados Unidos y en otras regiones de cultivo en todo el mundo (Jones *et al.*, 2003).

Desde que el CERES-Maíz fue lanzado, en 1986, se realizó una serie de investigaciones destinadas a mejorar la simulación de crecimiento del maíz y la predicción del potencial de rendimiento bajo diversas condiciones ambientales, tanto en el cinturón maicero de EE.UU. como en muchos otros países, incluyendo: Brasil (Liu *et al.*, 2006), China, Nigeria (Jagtap *et al.*, 1999), Argentina (Bert *et al.*, 2007), España (Mantovani *et al.*, 1995), Tailandia (Asadi y Clemente, 2003) y Australia (Carberry *et al.*, 1989, 1991).

El original CERES-Maíz (de las Américas) fue un modelo sin sub-rutinas de ofertas de nitrógeno en condiciones donde se suponía que no era el elemento limitativo (Jones y Kiniry, 1986). Carberry *et al.* (1989) compararon el desempeño de este original CERES-Maíz (de las Américas) con una versión revisada que mejora la precisión en varios aspectos del modelo de simulación, incluyendo la fenología, el crecimiento y la senescencia foliar, la producción de la asimilación, el crecimiento del grano, y el balance hídrico del suelo. Esta versión revisada de CERES-Maíz ha demostrado ser un buen simulador del crecimiento del maíz bajo distintas condiciones de campo (Carberry *et al.*, 1989; Carberry, 1991).

#### *Inicio de la modelización agronómica en Venezuela y la aplicación del modelo CERES-Maíz.*

En Venezuela, la introducción de la modelización agronómica se remonta a los años 1970, década en la cual destaca el trabajo pionero del Dr. Aldo Norero, tanto en capacitación como en investigación, documentación y asistencia técnica, desde su Cátedra de Agrofísica en el Postgrado “Desarrollo de Recursos de Aguas y Tierras” (CIDIAT-ULA). Para ese entonces, Norero (1973, 1974, 1976, 1977) señalaba la potencialidad de los modelos de simulación del crecimiento y desarrollo de los cultivos para explicar y, especialmente, estimar el comportamiento de diferentes cultivos en determinados ambientes edafoclimáticos. Destacando, además, que a través de la modelización “puede desarrollarse el análisis y evaluación de estrategias de producción de cultivos, que permite estimar los requerimientos de insumos tecnológicos, para decidir entre varias alternativas ecológica y económicamente viables”. En este sentido, Norero (1983) añade que los modelos forman parte de un esquema de diseño agronómico orientado a la utilización de los recursos edáficos, climáticos, hídricos y fitotécnicos de la agricultura.

Con particular referencia al modelo CERES-Maíz, siguiendo en este contexto de revisión histórica, es pertinente destacar que los primeros intentos relacionados con la introducción, adaptación y validación de este modelo a distintas zonas productoras de maíz en el país se ubican a mediados de los años ochenta, y se vinculan al Dr. Juan Comerma investigador del entonces FONAIAP, Maracay, hoy denominado INIA. Ello requirió la conformación inicial de un personal adiestrado en la comprensión de los procesos de modelización y procesamiento de datos experimentales. En esta dirección, para poder adaptar estas nuevas herramientas al contexto de las necesidades del agro venezolano en las décadas del 80 y del 90, fue necesario, inicialmente, la introducción de la computación y del procesamiento de datos. A nivel académico e institucional, estas inversiones impulsaron convenios de investigación con entidades nacionales e internacionales, lo que generó la necesidad de crear grupos de trabajo interdisciplinarios, en los que se conjugaban nuevas y distintas visiones a cerca de la forma de hacer investigación, con un enfoque mucho más amplio y sistemático de los procesos agronómicos, biológicos y climáticos. Comerma *et al.* (1985) indicaban que el modelo CERES-Maíz, una vez validado en forma global para diferentes zonas de Venezuela, sería diseñado para proveer a los usuarios una estimación del rendimiento del cultivo y las diferentes partes del

modelo estarían relacionadas con los factores que se consideran más determinantes en el rendimiento final. Esto incluyó:

Desarrollo fenológico relacionado con caracteres genéticos de la planta, el clima y otros factores ambientales.

- Crecimiento de hojas, tallos y raíces.
- Acumulación y partición de biomasa.
- Balance de agua en el suelo e influencia del déficit hídrico sobre el crecimiento y desarrollo del cultivo.
- Balance de nitrógeno en el suelo e influencia del déficit de nitrógeno sobre el crecimiento y desarrollo del cultivo.
- Balance de otros macronutrientes relacionados, así como el control de plagas, malezas y enfermedades.

### Breve Descripción de CERES-Maíz

Antes de recordar algunos de los resultados obtenidos y para poder entenderlos y criticarlos, es preciso describir brevemente la estructura y algunos rasgos esenciales del modelo utilizado.

### Estructura del modelo

CERES-Maíz está formado por tres sub-modelos ampliamente independientes:

- El modelo planta
- El balance hídrico
- El balance nitrógeno

Las operaciones de calibración de CERES-Maíz se realizan en el orden siguiente:

- La fenología
- El área foliar (LAI)
- El peso de cada órgano

### Las fases fenológicas

Para la fenología, CERES-Maíz considera seis etapas fenológicas:

- La duración de todas las fases se mide en grados-días con base 8°C (lo que significa que se resta 8°C de la temperatura medida dado que se supone una fotosíntesis nula por debajo de 8°C. Luego se multiplica el número de grados centígrados por encima de 8°C por el número de días para llegar al total de grados-días correspondiente a cada fase).
- Las tres primeras etapas son fases vegetativas, la planta "trabaja" para producir hojas durante sesenta días aproximadamente (Figura 5.3). La segunda fase depende en particular de la sensibilidad de la planta al ritmo foto-periódico y a la longitud del día.
- La fase IV es una fase de transición. Las hojas ya no crecen, el tallo sigue desarrollándose y los granos aparecen. La fase V es una fase reproductiva donde se fertiliza el óvulo y se constituyen reservas para la futura semilla. El "motor" del funcionamiento de esta fase es la necesidad de llenar el grano.

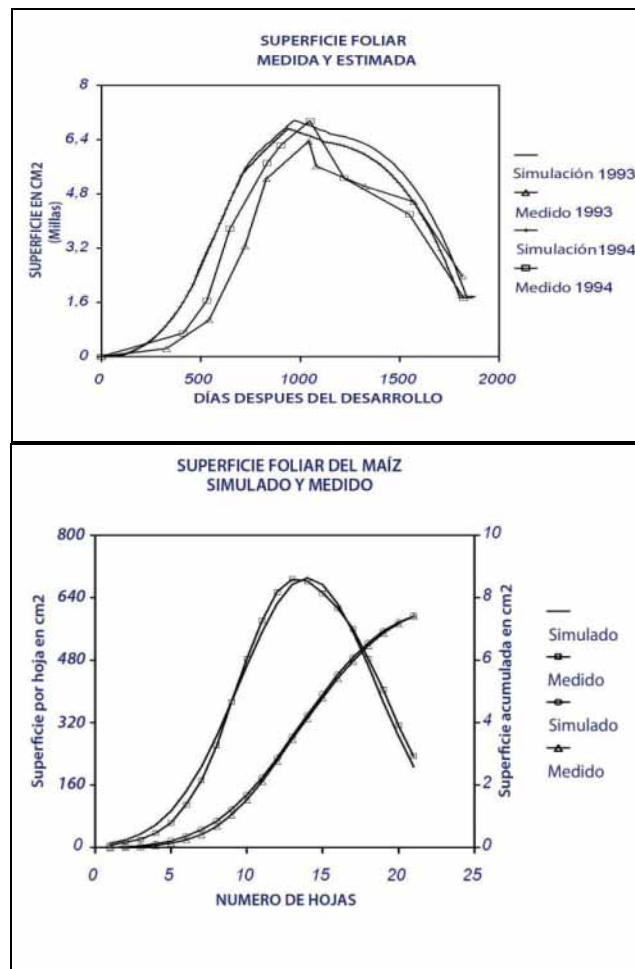


Figura 5.3. Medición y simulación del Área foliar.

- Cada día, después de leer los datos meteorológicos, el programa pone al día la fenología en la rutina PHENOL. En caso de cambio de fase fenológica, PHENOL llama otra rutina (FASE 1), con el fin de efectuar las inicializaciones o cálculos necesarios. En el Cuadro 5.1 se da (entre paréntesis) un orden de magnitud del número de grados-días ( $^{\circ}$ d) correspondientes a las tres últimas fases, lo que representa los dos últimos meses del cultivo de maíz.

Cuadro 5.1. Resumen de las fases fisiológicas del desarrollo del maíz según el modelo CERES

N° de Fase	
I	Del levantamiento al final de la fase juvenil (P1)
II	Del final de la fase juvenil a la iniciación de la flor
III	Del iniciación de la flor masculina hasta la floración femenina
IV(1000°d)	De la floración femenina al principio de relleno del grano (P5)
V(1800°d)	Relleno del grano (G3)
VI (2500°d)	Del final del relleno del grano a la madurez fisiológica (G5)

## Ejemplos de la simulación por el Modelo CERES original y modificado

### *Simulación del peso del tallo y del grano*

Se realiza esta simulación durante toda la duración de la fase V, período de relleno del grano. Para un híbrido dado, el número de granos potenciales se considera como una constante y no como una variable. Al principio de fase fenológica, CERES Maíz determina el número real de granos por planta en función de un valor potencial y de las condiciones del momento (tensión hídrica, densidad de plantas, etc.). A continuación, conociendo la velocidad de relleno del grano, el programa define la demanda diaria en síntesis de azúcares y proteínas. Si ésta no está satisfecha, las partes vegetativas completan, en la medida de lo posible, por desplazamientos internos, esta demanda. Cuando esto no es posible, se simula una pérdida de producción.

### *Comparación entre simulación y valores medidos*

La Figura 5.4 permite comparar las simulaciones del peso del tallo y del grano con las medidas efectuadas en las parcelas experimentales. La forma de la curva de simulación parece satisfactoria, pero el valor del peso sistemáticamente sobreestimado. La observación había puesto de manifiesto que un gran número de plantas no llevaba espigas. Este fenómeno, denunciado por los productores, se debería a la mala calidad de las semillas certificadas utilizadas.

Se pudo determinar que alrededor del 20% de las plantas estaban sin espigas o con espigas prácticamente sin granos. Para tener en cuenta este fenómeno, se reanudó la simulación reduciendo el número potencial de granos de cerca de 20%. Los resultados, se muestra esta vez una simulación prácticamente perfecta.

Por otra parte, en estas condiciones óptimas, los rendimientos obtenidos con esta variedad y en estas condiciones tropicales, siempre han permanecido dos a tres veces inferiores a los rendimientos generalmente obtenidos en Europa. Esta diferencia se asigna en general a la duración de día más corta en clima tropical y puede, ciertamente, explicar una diferencia de 20 a 30%, pero siguen siendo otros factores, ciertamente consustanciales a la planta, los que explican una diferencia de dos o trescientos por ciento.

La simple observación de la planta durante el día permite sugerir que durante los cuatro o cinco horas más calientes del día, la temperatura supere probablemente el límite térmico a partir del cual no solamente disminuye mucho la actividad fotosintética, pero además, se produce el cierre de las estomas que frena la asimilación de nutrimentos.

Como se pudo ver que las simulaciones de superficie foliar y peso de las hojas son correctas, sería necesario revisar cómo actúa la temperatura máxima admisible para la actividad fotosintética y la asimilación del agua y los nutrimentos. Se podrá entonces analizar mejor la naturaleza de los fenómenos que limitan sistemáticamente los rendimientos del maíz cultivados en condiciones tropicales de baja altitud como es el caso general en Venezuela.

En todo caso, por una u otra razón, sólo permanecería en el día seis horas de plena actividad contra las quince horas en el momento del solsticio de verano en Europa lo que bastaría a explicar la diferencia de productividad observada entre cultivos de maíz en países de clima templado o tropical.

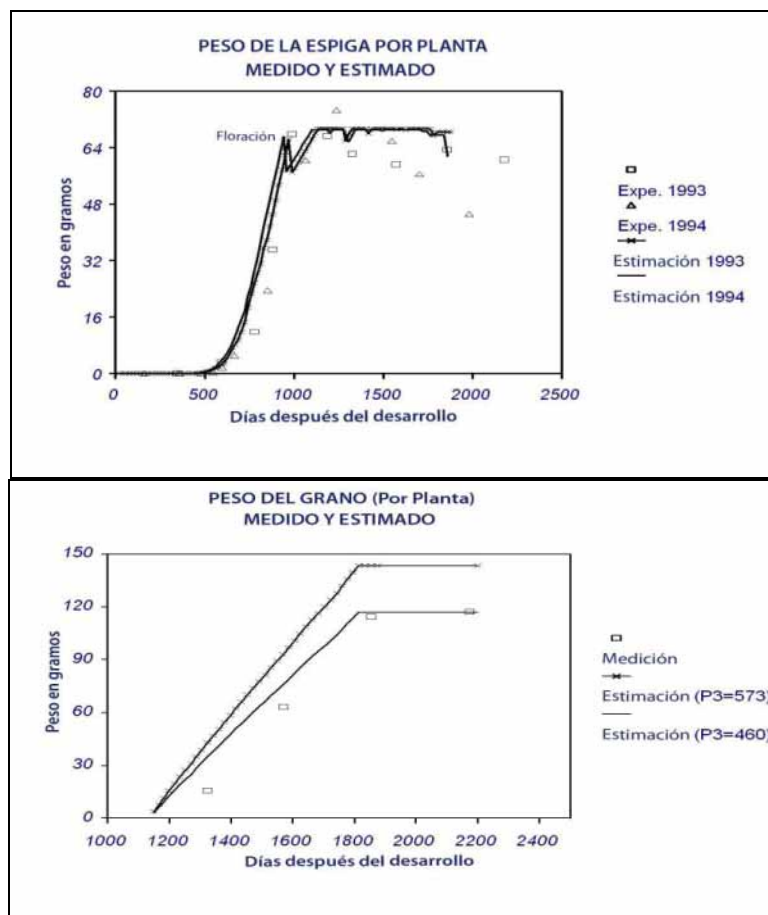


Figura 5.4. Simulación del peso del tallo y del grano medido y simulado.

### Los balances hídricos y nitrogenados

#### *El balance hídrico*

CERES Maíz es un modelo compartimental mecanicista que funciona al paso de tiempo del día, y toma en cuenta tanto la alimentación hídrica de la planta como su nutrición nitrogenada. A partir de los datos climáticos locales y del nivel de desarrollo de la planta, el modelo calcula la demanda de agua (llamada evapotranspiración potencial o ETP) y la fotosíntesis potencial de la planta. Las reservas en agua del suelo y el nivel de desarrollo radicular, definen la oferta en agua. A partir de la demanda y la oferta, el modelo calcula el consumo real en agua de la planta (evapotranspiración real ETR). Si la oferta es inferior a la demanda ( $ETR < ETP$ ), hay estrés hídrico y se calculan algunos coeficientes de estrés hídrico.

#### *El balance nitrogenado*

Para el nitrógeno, el esquema es prácticamente idéntico. El metabolismo de la planta y la fotosíntesis potencial permiten calcular la demanda en nitrógeno. Las reservas en nitrógeno del suelo y el nivel de desarrollo radicular, definen la oferta en nitrógeno. A partir de los niveles de demanda y

oferta, el modelo calcula el consumo real en nitrógeno de la planta. Si la oferta es inferior a la demanda, hay déficit, y se calculan algunos coeficientes de estrés en nitrógeno. A partir de los coeficientes de estrés y la fotosíntesis potencial, el modelo calcula la fotosíntesis real. Los constituyentes nitrogenados se distribuyen entonces en la planta y las reservas del suelo en nitrógeno son actualizadas.

- A partir de los datos básicos (índice foliar o LAI, peso de los distintos órganos, concentración en nitrógeno de la planta, etc.), la rutina NFACTO calcula los coeficientes de estrés de nitrógeno.
- Tomando en cuenta de los factores de estrés, del LAI y de los datos climáticos, el programa calcula la fotosíntesis u "oferta."
- Calcula, a continuación, la demanda que varía con la fase fenológica." Durante las fases I, II y III, lo que representa cincuenta a sesenta días según las condiciones locales, estas demandas son reguladas por el aumento de superficie foliar, él mismo siendo modulado por el aumento del número de hojas.
- Durante la fase V, la demanda es función del número de granos.
- Si la oferta es inferior a la demanda, ésta se reajusta y/o se usan las reservas (por translocación del nitrógeno ya absorbido). Si la oferta es excedente, se distribuye el suplemento de nitrógeno arbitrariamente entre los distintos órganos de la planta.
- "Durante el período de relleno del grano, éste se sirve en nitrógeno en el resto de la planta".
- "GROSUB llama el rutina NUPTAKE que calcula la demanda en nitrógeno después de haber evaluado la oferta. Esta es aproximadamente de 2 kg por hectárea por día en el momento de la demanda máxima entre el trigésimo y el sexagésimo día después de siembra.
- Las reservas en nitrógeno se actualizan cada día así como los datos básicos.

#### Deficiencias del modelo CERES en la simulación del nitrógeno

El problema que pareció prioritario al inicio de la investigación, era que el modelo CERES-Maíz ignora completamente la volatilización del amonio y sobrestima probablemente la desnitrificación. Como el principal abono nitrogenado utilizado en Venezuela es la urea, cuyas pérdidas por volatilización varían entre el tercero y la mitad de los aportes, era indispensable proceder a una revisión cuidadosa del modelo de este punto de vista.

Dicha revisión fue acoplada con experimentaciones de balance de uso del fertilizante. Ello puede ahora servir de ejemplo para contribuir al desarrollo conjunto de la modelización y la experimentación agronómica en un campo de primera importancia agroecológica y económica. En el Apéndice del presente capítulo se encontrará un resumen de los principales resultados obtenidos en Barinas, en materia de eficiencia de la fertilización nitrogenada del maíz con urea.

#### Papel de la planta en el ciclo del nitrógeno

CERES-Maíz considera que las actividades de las raíces en una capa de suelo son proporcionales a la longitud total en esta capa, calculada a partir de la biomasa radicular muestreada y de un diámetro promedio.

Por defecto, el modelo considera, para el consumo de nitrógeno, una afinidad igual para las dos fuentes de nitrógeno mineral nítrico o amoniacal. Además, el modelo supone la presencia permanente en el suelo de un mínimo de 1,5 kg de N nítrico por ha y de 0,75 Kg de N amoniacal para

no paralizar el funcionamiento de la biomasa microbiana. Como el consumo diario del maíz prácticamente nunca sobrepasa 1kg a N por hectárea y por día, (excepto durante el segundo mes en que puede alcanzar 2 kg N ha<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup>), el estrés nitrogenado no puede desencadenarse casi nunca

### *Conclusión sobre la presentación del modelo CERES-Maíz*

Estos aspectos, más arriba ya mencionados, son suficientes para mostrar cómo el modelizador considera el sistema suelo-planta en su conjunto y su complejidad. La relectura cuidadosa del modelo, su calibración y su validación en las condiciones locales, obligan al experimentador a planear sus experiencias en un contexto coherente, y a superar las barreras disciplinarias tradicionales. Estas barreras poseen sus justificaciones académicas, pero, en la práctica diaria de la investigación o de la producción, es necesario aprender a superarlas. Las experimentaciones necesarias para la calibración y la validación se organizan *in situ* o en laboratorio para responder a cuestiones que el modelo deja sin respuesta o con respuestas inadecuadas.

## **Ejemplos de resultados obtenidos con el modelo Ceres-Maíz en Venezuela**

### *Ensayos en Maracay*

#### *Introducción*

En la aplicación del modelo CERES en Venezuela, el balance de agua fue uno de los aspectos más estudiado. El mismo era capaz de generar una salida detallada del balance hídrico, utilizando los parámetros relativos al suelo, clima, caracteres del sistema o experimento real y de éste modo se puede evaluar el posible efecto sobre los rendimientos causado por una limitada disponibilidad de agua en la planta. Para ello, haciendo un monitoreo en el tiempo de la cantidad de agua disponible en el suelo durante el desarrollo del cultivo y midiendo las condiciones de humedad inicial en el suelo, así como las cantidades de agua añadidas por precipitación o por riego, es posible comparar los valores simulados por el modelo con los valores reales. De este caso, surgió el trabajo desarrollado por Delgado (1988), en su tesis de maestría, quien estudió la validación del balance de agua y nitrógeno, la producción de biomasa, la concentración de nitrógeno en el tejido, la producción de grano (rendimiento) del Modelo CERES-MAIZ, en cuatro parcelas cultivadas con maíz (híbridos Obregón y FM-6) en suelos de la Estación Experimental del CENIAP-Maracay.

#### *Mediciones realizadas*

El seguimiento del contenido de humedad, determinando los contenidos de N-NO<sub>3</sub> y N-NH<sub>4</sub>, durante el ciclo del cultivo, se realizó desde la siembra hasta la cosecha, a intervalos variables y en una base de estrato por estrato. Por otra parte, se realizó la medición de producción de biomasa en los estadios de desarrollo V6 y R1, que corresponden al momento donde el 50% de las plantas presentan el cuello de la 6ta hoja visible, y cuando el 50% de las plantas presentan barbas visibles respectivamente. En esta fase se hace necesario determinar la concentración de nitrógeno en el tejido de los estadios indicados. Al finalizar el cultivo se trata de medir la producción de residuos luego de la cosecha y finalmente la producción de grano (rendimiento ponderal) y la concentración de nitrógeno en los mismos (Delgado, 1988).

### *Comparaciones entre mediciones y simulaciones por CERES-Maíz*

Para realizar las corridas del modelo, para cada parcela, se le suministró la información necesaria para ello en las mismas condiciones en las cuales se desarrolló el ensayo. Los datos climáticos obtenidos de la Estación Meteorológica ubicada en la Estación Experimental del CENIAP-Maracay y los parámetros de humedad del suelo (límite superior de drenaje, límite inferior de disponibilidad de agua, coeficiente de drenaje y saturación) junto con otros datos necesarios para correr el modelo se midieron en cada parcela en particular y otros se estimaron en función de algunas características del suelo.

Para la evaluación de la concordancia entre los valores de variables observados y simulados empleó el método gráfico propuesto por Cady (1981), en el cual se emplean los modelos de regresión obtenidos entre valores observados y simulados, y se realiza prueba de hipótesis del valor de los parámetros, y de variables de manera conjunta.

La comparación entre las predicciones del modelo y las observaciones realizadas con respecto al balance de agua, indicaron una elevada concordancia entre ambos cuando se consideró todo el perfil en tres de las cuatro parcelas evaluadas y por horizontes en aquellas parcelas que están ubicadas más cerca del sitio donde se estimaron los parámetros de humedad. Los casos de discordancia entre mediciones y estimaciones del modelo se debieron probablemente a la variabilidad espacial de las características del suelo, como la textura, que definen propiedades de retención y transporte de humedad y que se detectaron entre las parcelas evaluadas.

Con respecto a la dinámica del N-NO<sub>3</sub> se observaron notables diferencias cuando se consideró el perfil en su totalidad. En ese caso, se observó que ocurrían desviaciones muy apreciables en los muestreos que se efectuaron luego de la aplicación de la urea en el re-abono y ello tenía que ver con la forma de colocación de la misma (Delgado, 1988).

Con respecto a la dinámica del N-NH<sub>4</sub>, se encontraron notables desviaciones independientemente que se considerara el perfil en su totalidad o por horizontes. Las desviaciones mayores se presentaron, primero, luego de la aplicación de la urea en el re-abono, como se mencionó anteriormente en la dinámica del N-NO<sub>3</sub>. Luego de un incremento de la humedad del suelo, se alcanzaron valores de contenidos de N-NH<sub>4</sub> observados iguales o superiores a lo que indicaba el modelo, posiblemente por una inhibición de las bacterias nitrificantes. En este último caso, Delgado (1988) evidenció el hecho de que el modelo no parece considerar adecuadamente la tasa de mineralización de la materia orgánica y/o algunos factores que la afectan como los cambios de humedad, especialmente en el caso de valores altos de humedad del suelo.

Por otra parte, con respecto a la producción de biomasa vegetal, su concentración de nitrógeno, la producción de grano, etc., Delgado (1988) encontró que hubo subestimaciones por parte del Modelo CERES-Maíz, aunque los rendimientos y cantidad de nitrógeno extraído en el grano, observados y simulados, no presentaron diferencias estadísticamente significativas.

Es probable que la inadecuada estimación por el modelo, de las variables mencionadas anteriormente, sea debida a la mala estimación de los balances de nitrógeno por parte del modelo. Ello se nota, en particular, mediante los índices de estrés elevados durante los diferentes estadios de desarrollo del cultivo, que afectan las salidas más arriba indicadas. Por lo tanto, no se debe descartar que las funciones empleadas en el modelo para la obtención de biomasa no sean las más adecuadas, y/o es necesaria su re-calibración para luego realizar las validaciones pertinentes (Delgado, 1988).



El otro aspecto que fue necesario cubrir durante el desarrollo inicial en Venezuela del modelo CERES-Maíz, fue el relacionado a la determinación de los coeficientes genéticos de los maíces que se emplearían como data necesaria para el funcionamiento del modelo CERES-Maíz en Venezuela. Para ello, Marrero (1987), en su tesis de grado, determinó dichos coeficientes genéticos del modelo de simulación en 6 cultivares en maíces venezolanos para predecir sus relaciones genotipo-ambiente, en sus diversas fases de desarrollo: P1 (coeficiente de la fase juvenil), P5 (coeficiente de la duración del llenado de granos), G2 (coeficiente de número de granos por planta), G3 (coeficiente de la tasa de llenado de granos), y los eventos fenológicos de emergencia, aparición del cuello de la sexta hoja, floración femenina y madurez fisiológica, en seis cultivares venezolanos de maíz (Marrero, 1987). Los primeros se constituirían como datos de entrada del modelo de simulación CERES-Maíz y fueron determinados con el propósito de utilizarlos para la operación del mismo.

Por otra parte, los eventos fenológicos determinados, aparte de servir como referencia para la determinación de los coeficientes, tuvieron el objeto de servir como información mínima para la validación del modelo CERES-Maíz en el aspecto de fenología, proyecto que eventualmente fue conducido por el FONAIAP, hoy INIA.

El trabajo constó de un ensayo principal llevado a cabo en el campo experimental del INIA-CENIAP, en Maracay en el que se hizo un seguimiento detallado de las fases de desarrollo de los seis cultivares, para registrar la ocurrencia de los eventos antes nombrados, basados en la caracterización fenológica de Hanway y Ritchie (1982).

Posteriormente, Marrero (1987) determinó los coeficientes P1 y P5, basados en el concepto de las unidades de calor o "días - grados de crecimiento", y los coeficientes G2 y G3. Para determinar dichos coeficientes, se tomó como guía orientadora el trabajo de Hunt (1984). Sin embargo, una parte considerable de dicha metodología fue modificada y adaptada a los recursos y técnicas disponibles para la época.

También, Marrero (1987) realizó un ensayo de tipo complementario donde se estudió el desarrollo del crecimiento del maíz y se determinó el final del período juvenil con el objetivo de ver si el número de hojas presentes en ese momento es un buen indicador de dicho final.

Los resultados obtenidos para los coeficientes genéticos arrojaron valores comprendidos dentro de los rangos característicos esperados para cultivares tropicales de maíz; así mismo, se concluyó que los procedimientos utilizados fueron de fácil aplicación. Por lo que se invita a que estos se apliquen a otros cultivares con el objeto de caracterizarlos, como forma de evaluar su respuesta a la interacción genotipo-ambiente y poder predecir así su comportamiento en localidades donde no se hayan sembrado antes (Marrero, 1987).

### *Conclusiones parciales sobre el uso de CERES-Maíz*

Al finalizar esta fase inicial de aplicación del modelo CERES-Maíz en Venezuela, se debe sacar la conclusión que los disfuncionamientos constatados se deben corregir mediante la re-escritura de algunas partes del modelo, que aparecieron como inadecuadas para simular correctamente el ciclo del agua o del nitrógeno o como inadaptadas a las variedades utilizadas en el país. Para ello, hubiera sido necesario proceder a una descompilación del modelo y una reescritura de las partes para poder proceder luego a nuevos trabajos de calibración y validación, fuera de alcance de los primeros experimentadores.

## Introducción

Estudiar la nutrición nitrogenada del maíz implica tomar en cuenta los fenómenos implicados en la transferencia del nitrógeno, primero desde el suelo hasta la cercanía inmediata de las raíces, y luego hasta su absorción por éstas y su traslado a las partes aéreas. Pero la modelización de este proceso no puede realizarse correctamente sin considerar las pérdidas y las transformaciones del nitrógeno durante su ciclo en el sistema suelo-solución-planta.

Estas transformaciones se producen primero durante la circulación de la solución del suelo. Dependen del pedo-clima que condiciona las transferencias entre las formas del nitrógeno orgánico y mineral y, por último, su absorción por las raíces. Luego, otras transformaciones ocurren durante la transferencia del nitrógeno hacia las partes aéreas y el grano durante el crecimiento y el desarrollo de la planta. Por consiguiente, no es posible modelizar aisladamente un fenómeno como el ciclo del nitrógeno sin tomar en cuenta las transferencias implicadas en los flujos, que el modelizador va tener que simular lo mejor posible con sus sistemas de ecuaciones.

Con esta perspectiva, se realizaron entre 1986 y 1994 en los llanos venezolanos varios estudios del ciclo del nitrógeno en un suelo de sabana tropical (Alfisol, Kandic Paleustalf del Jardín botánico de la UNELLEZ, ver sus principales características en la Monografía "Tierras Llaneras de Venezuela), con el cultivo de maíz. El material vegetal utilizado es un híbrido de maíz muy cultivado localmente en los años 80 y 90, el CENIAP PB8.

En este marco, se esperaba lograr modificaciones que permitirían al CERES-Maíz, el modelo elegido al término de un estudio comparativo (Hétier *et al.*, 1990), diera la mejor simulación posible de la demanda en nitrógeno. Aunque las predicciones de este modelo son a menudo consideradas como aceptables al final del cultivo, las imprecisiones de hipótesis muchas veces implícitas, conducen en resultados intermedios de simulación, a divergencias demasiado importantes con la realidad experimental. Mientras el objetivo sea la producción final, estas divergencias son, en general, compensadas parcial o completamente con otras imprecisiones u otras hipótesis implícitas que actúan en sentido contrario. En el caso de CERES-Maíz, los resultados finales obtenidos son en general realistas a nivel de la cosecha final, lo que permite esquivar muchas críticas. Por el contrario, si se exige una buena precisión en la estimación de la demanda en nitrógeno y, por lo tanto, en la producción vegetal a lo largo del ciclo, partes enteras de CERES deben ser revisadas.

Las experimentaciones principales en las cuales se basa este estudio, se realizaron en condiciones de alimentación hídrica y mineral cerca del óptimo. Ello permitió controlar punto por punto el modelo CERES en ausencia de estrés hídrico o nutricional.

## *Preliminares necesarios a la modelización del ciclo del N por CERES-Maíz*

### Rasgos generales del ciclo del nitrógeno en un cultivo de maíz

Para poder simular lo mejor posible el funcionamiento del sistema suelo-planta, es en primer lugar necesario colocar límites al sistema. Dentro de los límites definidos por los balances

---

<sup>23</sup> con informaciones procedentes de trabajos de M. Zuvia, D. Cardon realizados en Venezuela, e I.Reydellet realizados en Burkina Faso durante los años 1990.

cuantitativos, el modelo intentará a continuación simular las entradas, las salidas y los intercambios entre los distintos compartimentos definidos en función de los métodos de medición elegidos.

Antes de mencionar como ejemplo, estas experiencias preliminares indispensables, tales como cultivos en lisímetros y en parcelas marcadas por urea  $^{15}\text{N}$  (cuyos principales resultados fueron reunidos en el Apéndice del presente capítulo) se recordarán algunos datos generales del ciclo del nitrógeno válidos en todo cultivo intensivo de maíz (Figura 5.5.).

En el esquema siguiente, la fijación libre de nitrógeno atmosférico no está evocada por no disponer de mediciones o de referencias confiables al respecto.

En el caso del Alfisol de Barinas (unidad PP1 del mapa presentado en el Capítulo 3 de la Monografía Tierras Llaneras de Venezuela), se puede estimar que en la zona explorada por las raíces de un cultivo de maíz se encuentran 2 a 4 toneladas de nitrógeno orgánico. La cantidad de nitrógeno mineral amoniacal y nítrico es muy variable pero casi nunca sobrepasa 10 kg N por hectárea antes de la fertilización.

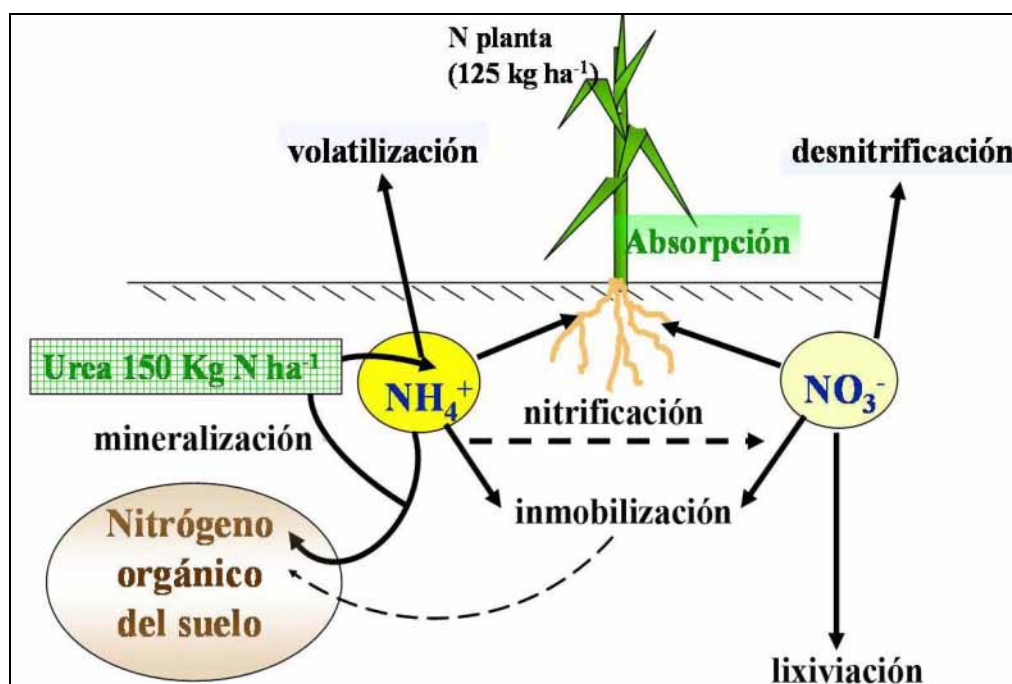


Figura 5.5. Esquema general del ciclo del nitrógeno bajo cultivo de maíz.

#### *Definiciones básicas: Flujos de mineralización bruta y neta*

Los balances de nitrógeno derivado del fertilizante constituyen el primer grado de utilización del trazador isotópico  $^{15}\text{N}$  usado según las reglas generales indicadas en el Capítulo 1 del presente referencial en la parte dedicada a los ciclos del nitrógeno y del fósforo. Dichos balances son indispensables, pero no son suficientes para construir, calibrar y validar los modelos por lo que se refiere a la nutrición nitrogenada de las plantas.

Para evaluar estos flujos de nitrógeno en condiciones próximas al funcionamiento normal, el trazador isotópico es la herramienta indispensable para pasar de evaluaciones arbitrarias a medidas precisas.

Para aclarar el significado de las medidas necesarias, es necesario, en primer lugar, recordar aquí también la definición del exceso isotópico y el principio de la dilución isotópica. ( para más detalles, ver el primer capítulo del presente referencial)

#### Definición del exceso isotópico

El  $^{15}\text{N}$ , isotopo estable del  $^{14}\text{N}$ , existe en todo el nitrógeno del planeta con una concentración de 0,366 %. Cuando la concentración del trazador en el nitrógeno total se eleva más arriba de esta concentración natural, se habla de Exceso isotópico con relación al contenido natural de todo el nitrógeno del planeta.

#### Principio de la dilución isotópica

Una pequeña cantidad de trazador se introduce en el sistema sin perturbar su equilibrio bioquímico al tiempo inicial  $t_0$ . Se conoce su concentración inicial (0 en término de Exceso isotópico en el caso del  $^{15}\text{N}$ ).

Después de un tiempo variable, el trazador isotópico se ha diluido en todo o parte del sistema gracias a las reacciones bioquímicas en las cuales el elemento puede estar implicado. Se vuelve entonces a medir la concentración del isótopo trazador del elemento estudiado en el compartimento de entrada y eventualmente en otros. Se aprecia así en el compartimiento de entrada, la diferencia entre la proporción inicial y final del trazador en el total del elemento trazado. La disminución constatada indica la amplitud de la dilución. En caso de realizar varias mediciones sucesivas en uno o varios compartimientos del sistema estudiado, se pueden establecer los parámetros de las ecuaciones describiendo la cinética de dilución isotópica.

Tratándose del amonio que nos interesa aquí, el trazador  $^{15}\text{N}$  aportado en una solución madre de amonio marcado (Figura 5.6), se diluye casi instantáneamente en el amonio de la solución del suelo.

Una segunda medición (después de un día por ejemplo) va servir a mostrar en qué medida el trazador se diluyó en el amonio "normal" cuyo contenido isotópico (0,366%) es el de todo el nitrógeno presente en el medio ambiente de la experiencia. Si se diluyó por ejemplo diez veces el trazador aportado, eso significa que la cantidad de amonio presente en la solución del suelo era diez veces superior a la que se introdujo con el trazador (*que nunca es "puro" por sencillas razones técnicas y económicas*).

En el caso del amonio, nos podemos limitar al caso simple de la solución de una muestra de suelo. En este caso simple evocado por la Figura 5.6, sólo cambia con el tiempo, la concentración del trazador introducido al tiempo 0. Este trazador va a continuación salir del compartimento "solución" por efecto de los procesos de organización o de fijación (= inmovilización) y ser sustituido por nitrógeno de la mineralización de compuestos no marcados por  $^{15}\text{N}$ ; pero una única medida estática no es suficiente para acceder a evaluaciones de flujo, es necesario para ello, introducir el tiempo necesario para la dilución cuando no es instantánea.

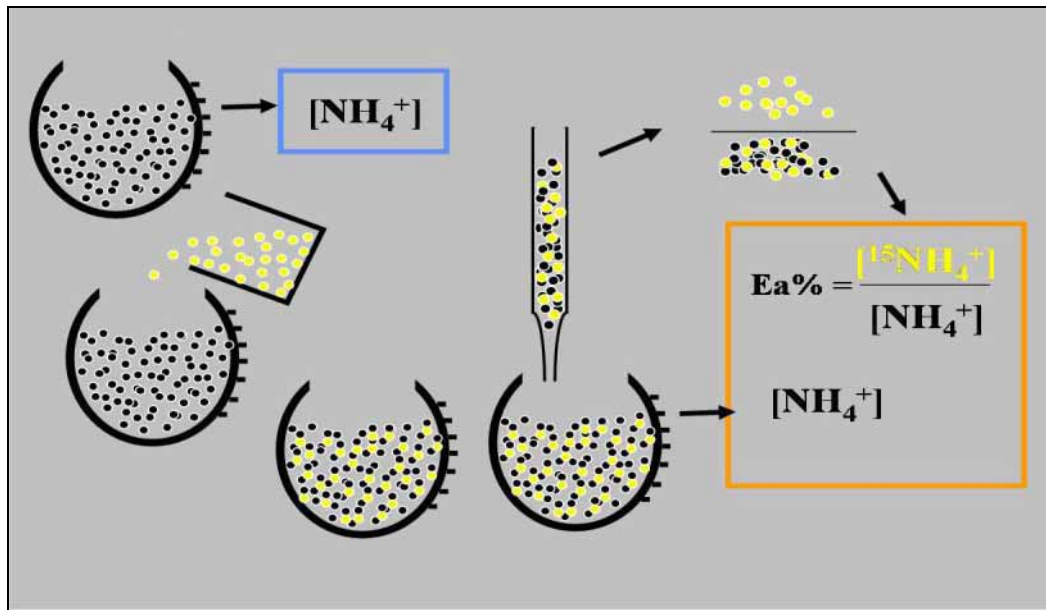


Figura 5.6. Principio de la dilución isotópica.

### Mediciones de flujo de mineralización bruta en el campo

Recordamos ahora la definición de la mineralización bruta y neta para evitar definitivamente la confusión entre lo que es el fenómeno (mineralización bruta) y el resultado de los dos fenómenos opuestos mineralización bruta e inmovilización bruta que se llama mineralización neta:

$$\text{MIN neta} = \text{MIN bruta} - (\text{Inmovilización} + \text{Absorción} + \text{Pérdidas})$$

En el caso de un cultivo de maíz, el sistema incluye: la solución del suelo donde se introduce la urea marcada, la biomasa microbiana y las reservas orgánicas del suelo y por supuesto las raíces y las partes aéreas de la planta. El término inmovilización tiene un alcance más general que organización que concierne solamente las formas orgánicas insolubles sin tomar en cuenta el amonio catiónico fijado en sitios de intercambio.

Las medidas isotópicas, en condiciones experimentales adaptadas a las condiciones del suelo total o del suelo rizosférico, permiten entonces evaluar los flujos brutos de mineralización.

Para evaluar el flujo diario, correspondiente a la mineralización bruta, es necesario disponer de, al menos, dos medidas a intervalos de tiempo bastante cortos para poder considerar como válidos una serie de postulados e hipótesis indispensables. En el caso de la urea, la hidrólisis dura menos de 24 horas. Se esperará, pues, un día para hacer la primera medida.

En el caso de experimentos realizados en Burkina Faso en los años 90 (Reydellet, 1997), se estima también que la nitrificación se inicia a partir del segundo día después del marcado y que los excesos isotópicos del nitrógeno nítrico o amoniacal son aproximadamente idénticos, durante los 5 días que separan las dos medidas de nitrógeno mineral en la solución del suelo.

En las experiencias efectuadas en Burkina Faso, sólo se consideró el producto de la mineralización en su conjunto: amonio y N nítrico. Las mediciones realizadas no permiten saber si la planta selecciona preferencialmente una de las dos especies químicas durante las distintas fases de su desarrollo (Figura 5.7).

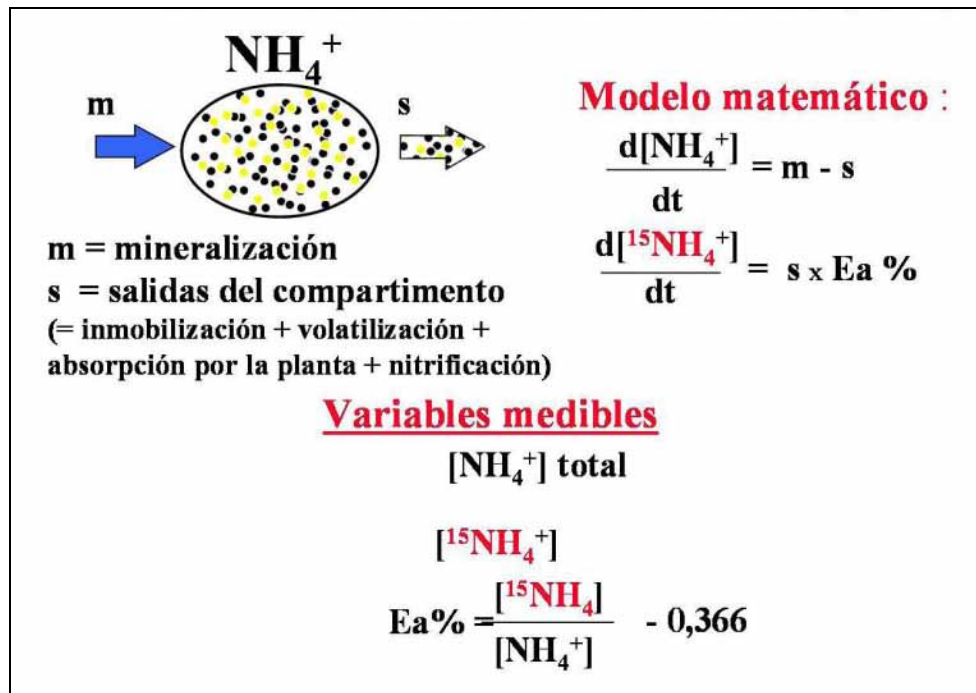


Figura 5.7. Evaluación de la mineralización bruta.

Los experimentos realizados en Burkina Faso implicaban una gran cantidad de trazador <sup>15</sup>N acompañado de una cantidad mínima de N total: método dicho del trazador sin carga. Por consiguiente, se admite también que el volumen total del compartimento de nitrógeno mineral no varía significativamente entre las dos fechas de extracción, lo que simplifica los cálculos. En este caso, el valor del flujo diario de mineralización bruta se obtiene multiplicando el nitrógeno mineral total (o el nitrógeno tomado por la planta) por el ln (logaritmo neperiano) del ratio entre el exceso isotópico final e inicial.

Estos resultados de Burkina Faso (Reydellet, 1997) se obtuvieron en micro-parcelas marcadas sobre un suelo ferruginoso tropical bastante similar al suelo de Barinas aunque más arenoso. La mineralización bruta puede variar de 5 a 10 kg por hectárea y por día o sea una cantidad en todos los casos bien superior a las necesidades de la planta. A partir de los resultados de Barinas se puede conseguir evaluaciones similares. Estos resultados evidencian claramente que la mineralización bruta representa un flujo bien superior a la extracción diaria por el maíz que alcanza su nivel máximo entre el trigésimo y el sexagésimo día después de la siembra, máximo de extracción del orden de 2 kg N ha<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup>, o sea tres a cinco veces menos que el flujo de mineralización bruta diaria.

Se puede hacer un cálculo similar para evaluar la organización bruta durante el mismo tiempo. Un cálculo de organización bruta da resultados tres veces menores que la mineralización bruta: 1 a 3 kg N ha<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup>. Permanece entonces siempre un margen amplio para abastecer la planta incluso en el momento de sus mayores necesidades. Una semana después de la fertilización del maíz en Barinas, del total de nitrógeno derivado de la urea en el suelo, ya el 70% estaba en forma de nitrógeno orgánico. Este porcentaje aumentó hasta un 98% momento de la cosecha. Ello permite tener una idea de la intensidad del fenómeno de inmovilización neta que puede variar de 1 a 3 kg N por hectárea y por día, cuando la remineralización es casi nula.

Aparentemente, no es pues la mineralización bruta que constituye el factor que en general limita la nutrición nitrogenada del maíz. Antes de concluir, vale la pena examinar otro tipo de experimentos realizados en laboratorio para confirmar las observaciones de campo pero esta vez, con la perspectiva de crear nuevos sub-modelos del funcionamiento rizosférico o de mejorar los modelos existentes.

### *Estudio del efecto rizosférico sobre la mineralización bruta en laboratorio*

En presencia de planta, el problema se complica aún un poco más ya que, en la rizósfera, las condiciones cambian mucho y rápidamente debido a la creación de un gradiente de concentración de nitrógeno en la cercanía inmediata de la raíz. En efecto, las raíces hacen el vacío de nutrimentos nitrogenados en la solución, y proporcionan substratos carboxílicos que favorecen el desarrollo de la microflora rizosférica.

En este caso, el experimento no se organiza para confirmar o rechazar a posteriori uno de los postulados de un modelo existente. Se trata más bien de crear un modelo nuevo que se podrá utilizar solo para apoyar investigaciones fundamentales o como sub-modelo destinado a mejorar un modelo existente.

Sin entrar aquí en los detalles técnicos de estas experiencias y nos limitaremos a mencionar su resultado global en los gráficos siguientes (Figuras 5.8 y 5.9).

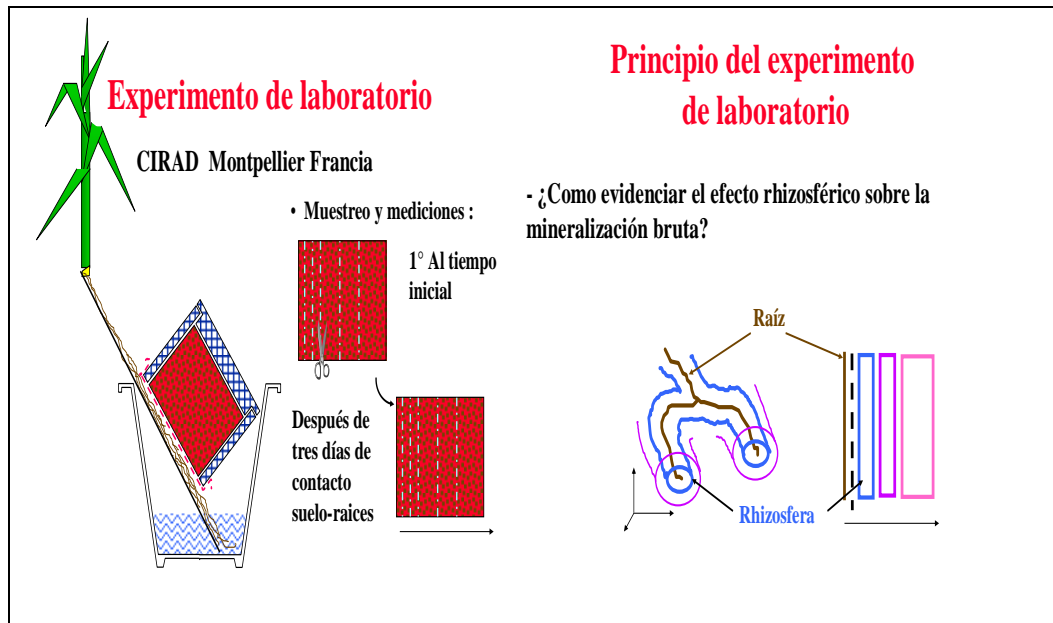


Figura 5.8. Evidencia experimental del efecto rizosférico.

Se observa que el resultado del marcado de parcelas, con y sin cultivos, se explica por un efecto rizosférico muy notable y también muy local. Si se admite que, en la rizósfera, las raíces representan - un 1% del peso total de suelo rizosférico, se tendrían alrededor de 300 toneladas de suelo rizosférico por hectárea o sea un 10% de la tierra arable que sería la sede de una mineralización bruta dos veces más activa que el resto del suelo.

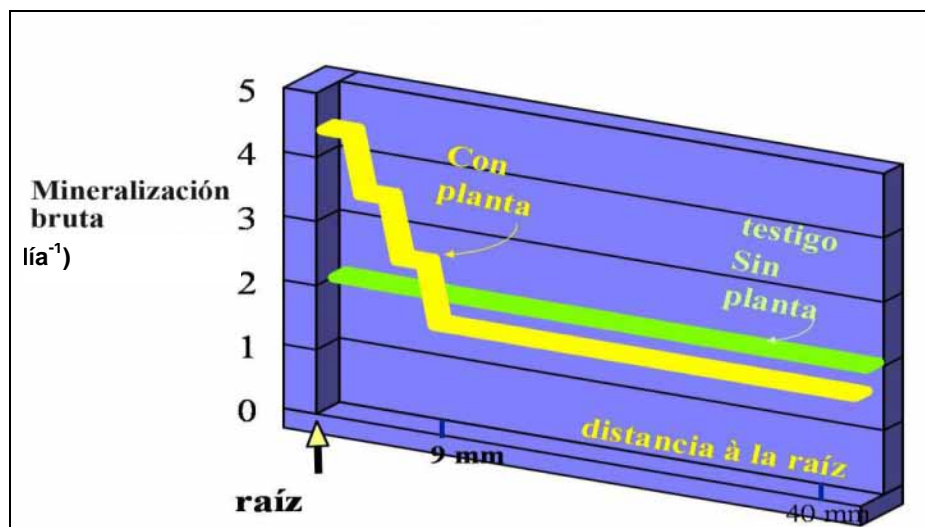


Figura 5.9. Ejemplo de resultado: mineralización bruta dentro y fuera de la rizósfera.

En el caso concreto de la nutrición nitrogenada del maíz, es necesario colocarse en el contexto de la competición entre las tres biomásas (rizósferas del cultivo y de las malezas por una parte, biomásas microbianas no rizosféricas por otra parte) para saber cómo favorecer las extracciones de nitrógeno por el cultivo, sobre todo durante el segundo mes después de la siembra. Durante este período crítico, se podría mejorar las cosechas jugando por ejemplo sobre el nivel de la mineralización bruta, la limitación de las pérdidas, de la organización y de la competición con las malezas.

Todos estos resultados ponen de manifiesto que muchos esfuerzos quedan por hacer para adaptar los modelos a las condiciones reales de los cultivos.

### Segundo ejemplo: Utilización del modelo CERES-Arroz en el Estado PORTUGUESA<sup>24</sup>

#### *Introducción*

Como segundo ejemplo de esfuerzos coordinados para mejorar la modelización de un cultivo, hemos seleccionado una parte del trabajo realizado por la UNELLEZ (nucleo Guanare) y dirigido por el Profesor Luis Álvarez durante la última década del siglo pasado (Alvarez, 2005).

En aquella época, los productores empezaron a darse cuenta de que, con la intensificación desproporcionada de los cultivos, la amplitud de los problemas inducidos (plagas, malezas, enfermedades, etc.) alcanzó niveles difícilmente controlables incluso por la aplicación masiva de productos fitosanitarios más o menos nocivos.

***Como ejemplo de fertilización exagerada, se puede citar el de una empresa muy importante y técnicamente avanzada en el contexto local, del Estado de Portuguesa. Esta empresa productora de semilla certificada y arroces para el consumo humano, impuso sus condiciones de preparación del suelo, irrigación, cultivo y fertilización a los productores de arroz asociados.***

***Una vez inundado, el suelo es preparado por desmenuzamiento y cepillado, luego sembrado con una semilla pre-germinada. Dos días más tarde, después de un riego, se aplica 200 kg ha<sup>-1</sup> de abono completo 20-10-18, con una dosis adaptada de Zinc y Magnesio. Treinta días después de la***

<sup>24</sup> Alvarez, L. 2005. El sistema de producción de arroz en los Llanos Occidentales de Venezuela.



**siembra, se aplica otra vez 200 kg ha<sup>-1</sup> de un abono completo de fórmula 23-0-25. Alrededor de los 60-65 días después de la siembra, se aplican aún 100 kg ha<sup>-1</sup> de Urea luego, quince días más tarde (75-80 días después de la siembra), 130 a 150 kg ha<sup>-1</sup> de Sulfato de Amonio.**

Tomando en cuenta esta mala utilización de los abonos, el Programa de Producción Agrícola Vegetal de la Universidad Ezequiel Zamora lanzó una investigación que comenzó por una evaluación de la respuesta del arroz a la aplicación de nitrógeno, elemento más importante en la determinación del rendimiento en grano. Por métodos clásicos, así se volvió a poner en evidencia la eficiencia de los aportes fraccionados que permiten obtener buenos rendimientos por contribuciones modestas de nitrógeno sin demasiados impactos negativos en el medio ambiente.

Luego, al basarse en las consideraciones generales de Norero (1982), se elaboró un programa plurianual de investigación destinado a optimizar las condiciones de cultivo del arroz en la región. Para este autor, la experimentación agronómica tradicional, de carácter inductivo, intenta generalizar las conclusiones de experiencias locales. Se trata pues de experiencias cuyos resultados no pueden aplicarse mientras no se obtenga una reproductividad satisfactoria en lugares y condiciones variadas. Este método consume mucho tiempo y dinero, ya que nunca es simple armonizar los resultados de distintas investigaciones a menudo aisladas por barreras disciplinarias y/o por diferencias de contexto ecológico difícilmente superables.

Por lo contrario, el método deductivo pasa del general al particular, partiendo de teorías basadas en principios generales y datos básicos aceptados por la comunidad de los científicos y de los productores. Al aplicar el método científico experimental, se intenta integrar un máximo de variables consideradas como factor de producción. Se analizan los resultados de experiencias originales efectuadas in situ o procediendo de otros lugares e incluso de otras latitudes y se elabora un conjunto de hipótesis. Sobre esta base se elaboran modelos de producción que permiten a la vez explicar y predecir resultados de cultivos.

Por medio de la utilización de modelos de simulación debidamente calibrados y validados, se espera pues determinar la influencia respectiva de una serie de variables que influyan sobre la producción de arroz, y definir así la manera de modificar la planta y su manejo y así aumentar su rendimiento (IRRI, 1990).

A tal efecto, se procedió al análisis del sistema suelo-planta con ayuda de un modelo matemático que simula el crecimiento, el desarrollo y la producción del arroz, adaptándolo a las condiciones de los llanos occidentales de Venezuela, y apoyándose sobre investigaciones coordinadas por las necesidades de calibración y validación del modelo elegido, el modelo CERES (Crop-Environment Resource Synthesis)-Arroz

#### *Aplicación del modelo de simulación CERES-Arroz.*

El modelo CERES-arroz, simula el crecimiento, el desarrollo y la producción de distintas variedades de arroz bajo distintas condiciones agroclimáticas. El modelo simula el desarrollo de la planta según fases de crecimiento, en función del genotipo, de la distribución de los productos de la fotosíntesis en la planta, de la dinámica del sistema radical, del efecto de estrés hídrico y nitrogenado, y de los factores medioambientales (Ritchie *et al.*, 1986, Singh *et al.*, 1990).

#### *Experimentos de calibración con arroz*

Para describir las condiciones de producción de arroz, se basa aquí en una experiencia efectuada durante el período de lluvias de 1997, en un arrozal situado a 18 km de la ciudad de Guanare, capital del estado Portuguesa.

Se trataba de un suelo poco explotado, representativo de los que se sembraban en arrozales una vez agotados los suelos actualmente sobreexplotados. Se situaba en un bosque galería (árboles de aproximadamente 30 m de altura), recientemente desforestado y sembrado dos años sin interrupción con arroz irrigado.

El suelo se preparó en temporada seca con rollos pesados (Big Rome) luego ligeros. La velocidad de infiltración del agua en el suelo era de 11.1 mm/hora. El sembrado de una variedad local (Fonaiap 1, con un ciclo de 121 días de la aparición a la cosecha). La fertilización, de acuerdo con un estudio preliminar (Alvarez, 1997a), consistió, primero en un aporte inicial de 46 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (Superfosfato triple) y 60 kg K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> (KCl) y segundo en la aplicación de 120 kg N ha<sup>-1</sup> (Urea), en dos fracciones, una primera a la siembra y otra a principios del período reproductor. Fueron necesarios 1.977 milímetros de riego complementario a las lluvias, un herbicida y un insecticida para control del gusano de la espiga (*Spodoptera frugiperda*).

### Comparación de resultados obtenidos y simulaciones

En el Cuadro 5.2 se pueden ver algunos resultados experimentales en comparación con las simulaciones del modelo Ceres-arroz. Se observa un buen acuerdo entre los datos previstos por el modelo y los medidos por lo que se refiere a las tres fechas de las fases de desarrollo, al rendimiento y el peso de grano, la producción de biomasa a la madurez fisiológica.

Pero este resultado globalmente satisfactorio no debe servir a disimular la necesidad de una recalibración del modelo para obtener una mejor coincidencia para el número de granos/m<sup>2</sup>, el número de panículas por m<sup>2</sup> y la producción de biomasa a la antesis.

Este ejemplo da la oportunidad de insistir sobre el hecho que un buen resultado global puede resultar de errores compensados con astucias de cálculo y no de un modelo que refleja bien la realidad en todos los detalles del crecimiento y el desarrollo de la planta y sus relaciones con el suelo.

Cuadro 5.2. Comportamiento simulado y medido del arroz. Resultados preliminares. Parcela Soropo. Municipio Guanare. Período de lluvias 1997

Variable	Valor simulado	Valor medido
Fecha de iniciación de la panícula (días después de la siembra dds)	54	54
Fecha de floración	90	90
Fecha de madurez fisiológica (dds)	117	123
Rendimiento de grano (Mg ha <sup>-1</sup> ), 14% de humedad	7,62	7,68
Peso del grano (g)	0,03	0,03
<b>Numero de grano por m</b>	<b>21,84</b>	<b>19,31</b>
<b>Numero de panícula por m<sup>2</sup></b>	<b>673,08</b>	<b>258,7</b>
<b>Biomasa (kg ha<sup>-1</sup>) a la antesis</b>	<b>7,63</b>	<b>9,58</b>
Biomasa (Mg ha <sup>-1</sup> ) a la madurez fisiológica	12,25	12,76

Esta experiencia fue repetida en estación de lluvia sobre un terreno próximo al precedente durante la temporada de las lluvias 2000. Sólo cambió la forma de aplicación del abono repartida en tres aplicaciones durante el desarrollo del cultivo, sembrado en una parcela cultivada en caña de azúcar durante los ocho últimos años. Los resultados se muestran en el Cuadro 5.3.

Cuadro 5.3. Comportamiento medido y simulado del arroz. Resultados preliminares. Propiedad Santa Ana. Municipio Guanare. Temporada de las lluvias año 2000

Variable	Valor simulado	Valor medido
Fecha de iniciación de la panícula (días después de la siembra dds)	55	54
Fecha de floración	90	82
Fecha de madurez fisiológica (dds)	119	118
Rendimiento de grano ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) 14% de humedad	8,05	8,00
Peso del grano (g)	0,03	0.03
<b>Número de grano por <math>\text{m}^2</math></b>	<b>23.074</b>	<b>32.445</b>
<b>Numero de panícula por <math>\text{m}^2</math></b>	<b>573,71</b>	<b>252</b>
<b>Biomasa (<math>\text{Mg ha}^{-1}</math>) a la madurez fisiológica</b>	<b>12.057</b>	<b>15.230</b>

#### *Conclusiones parciales sobre el uso de CERES Arroz*

El modelo CERES-Arroz simulaba correctamente la duración del ciclo hasta el principio de su período reproductor, la floración y la madurez fisiológica así que el rendimiento en grano y en biomasa a la cosecha así como el peso del grano. Sin embargo, no llegaba a una buena previsión de los componentes del rendimiento: número panículas/ $\text{m}^2$ , número granos/ $\text{m}^2$ , producción de biomasa a la antesis.

El tiempo y el costo necesarios para la obtención de este tipo de resultados, por la vía experimental clásica, impedirían encontrar a tiempo las respuestas correctas a las preguntas de los productores. El recurso a una modelización mejorada constituye entonces una buena manera de racionalizar el proceso de toma de decisión tanto a nivel técnico como a nivel económico. Pero, esta confiabilidad indispensable supone la organización y el seguimiento de experimentaciones estrechamente vinculadas a la calibración y a la validación del modelo elegido. Ello permite apoyar la elección racional del itinerario técnico adecuado para que el cultivo sea rentable a nivel económico y satisfactorio a nivel ecológico.

#### *Tercer ejemplo, modelo Momos<sup>25</sup> (Microorganismos y materia orgánica del suelo)*

##### *Antecedentes*

Las investigaciones conducidas por el Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas (ICAE) en los Andes venezolanos, fueron orientadas en primer lugar por motivaciones medioambientales y agro-ecológicas. En Venezuela, Colombia y Ecuador, sobre el límite de la vegetación forestal, entre 3300 y 4800 msnm, bajo las condiciones húmedas de la parte septentrional de los Andes, se encuentra el páramo, un ecosistema de tipo alpestre. El páramo es caracterizado por suelos ricos en materia orgánica y particulares condiciones climáticas (López y Crespo, 1996), lo que explica probablemente su buena resistencia a la degradación por la erosión, a pesar del uso de superficies cultivadas con pendientes fuertes (Llambi y Sarmiento, 1998; Sarmiento, 2000; Abadín et al., 2002; Poulénard et al., 2003).

El sistema de referencia utilizado para la calibración del modelo MOMOS, fue el páramo venezolano relativamente menos antropizado que los sistemas de baja altitud. El modelo puesto a

<sup>25</sup> Contribución de M. Pansu, IRD Montpellier Francia, P. Bottner, Cefe-CNRS, Montpellier Francia, (fallecido el 15.10. 2006) y L. Sarmiento, ICAE, Universidad de Los Andes, Venezuela

punto sobre el paramo se aplicó a continuación a distintos ecosistemas de un gradiente altitudinal de 4000 a 65 msnm.

Una gestión conservadora de las reservas orgánicas es fundamental en estas montañas andinas. En efecto, ellas constituyen las fuentes superiores de captación de agua y la degradación de sus suelos tendría efectos negativos sobre el curso inferior de los ríos que abastecen los llanos de los bosques húmedos tropicales o de las sabanas circundantes.

Estos suelos de altitud secuestran cantidades importantes de carbono sobre una profundidad de 0,5 a 1 metro lo que constituye, a escala regional, un papel beneficioso sobre el balance global del carbono. Es pues importante incluir bien en los estudios los mecanismos de este secuestro (Van Noordwijk y al 1998; Niklaus y Falloon 2006).

Los agro-ecosistemas del páramo están ocupados tradicionalmente en Venezuela por barbechos pastoreados de 7 a 10 años que alternan con dos años de cultivo de papas seguidos de dos a tres años de cereales. Se someten actualmente a una agricultura intensificada con un retroceso de las zonas de barbecho (Hofstede et al, 2002). Para hacer frente a los efectos de esta intensificación, la modelización constituye una herramienta irremplazable de comprensión de la renovación de las reservas orgánicas por el barbecho y de previsión de los riesgos vinculados a la intensificación de su utilización agrícola.

### Descripción del modelo MOMOS

La Figura 5.10 corresponde a la última versión del modelo MOMOS donde el compartimento de reacción central es también el de la biomasa microbiana (Pansu *et al.*, 2004).

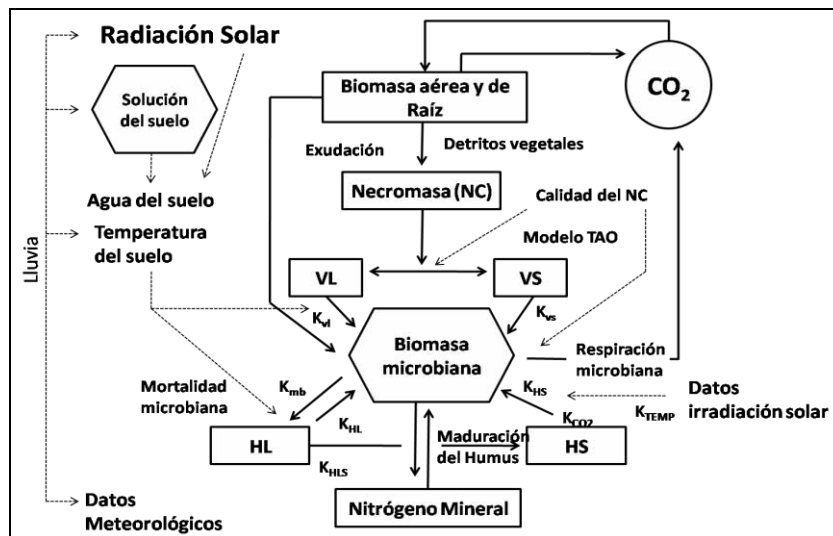


Figura 5.10. Estructura del modelo MOMOS

### Calibración y validación

Los estudios de calibración y validación del modelo MOMOS no habrían sido posibles sin la técnica de entierro de bolsos de malla de nylon llenados de suelo añadido de una cantidad suficiente de material vegetal marcado <sup>14</sup>C y <sup>15</sup>N, (trigo cultivado sobre solución nutritiva en células de cultivo)

para que se puedan realizar nueve extracciones anuales (cada una con cuatro réplicas, Couteaux *et al.*, 2002).

Para estas experiencias de calibración de los modelos, las variables probadas para su influencia sobre los mecanismos de transformación  $^{14}\text{C}$  y  $^{15}\text{N}$  eran:

- paja marcada más o menos joven y más o menos rica en nitrógeno
- tiempo de barbecho
- clima y tipo de suelo: puna del altiplano Boliviano de altitud, o paramo Venezolano con un pluviometría y un tipo de suelo muy diferente.

Las experiencias de validación utilizaban una paja marcada de un solo tipo y se establecían sobre un gradiente altitudinal venezolano que incluía una gran variedad de ecosistemas y suelos:

- bosque tropical húmedo de la zona de El Vigía, 65 m de altitud, temperatura anual medio 27,4°C, pluviometría anual medio 1826 mm, Inceptisol,
- sabana estacional de la región de Barinas, 165 m de altitud, temperatura medio 26,4°C, pluviometría medio 1462 mm, Alfisol,
- bosque estacional de montaña de Tovar, 780 m de altitud, temperatura medio 23°C, pluviometría medio 1112 mm, Mollisol,
- Selva nublada de la región de Mérida, altitud 1800 m, temperatura medio 17,4°C, pluviometría medio 1992 mm, Inceptisol,
- páramo andino de Gavidia (diferente parcela de la experiencia de calibración), altitud 3400 m, temperatura medio 8,9°C, pluviometría medio 1505 mm., Inceptisol, páramo de altitud de El Banco, 3968 m de altitud, temperatura medio 5,5°C, pluviometría medio 790 mm, Entisol.

*In situ*, cada uno de los datos climáticos se registraban a diario: temperatura mínima y máxima del aire, pluviometría y radiación así como para algunos lugares presión de vapor y velocidad del viento. A cada muestreo se tomaban sub-muestras para los análisis de:

- Biomasa microbiana total y  $\text{Bm-}^{14}\text{C}$
- C total y  $^{14}\text{C}$  total del suelo
- N total y  $^{15}\text{N}$  total

### *Calibración del modelo MOMOS*

Para las experiencias de calibración de los modelos, las variables probadas para su influencia sobre los mecanismos de transformación  $^{14}\text{C}$  y  $^{15}\text{N}$  eran:

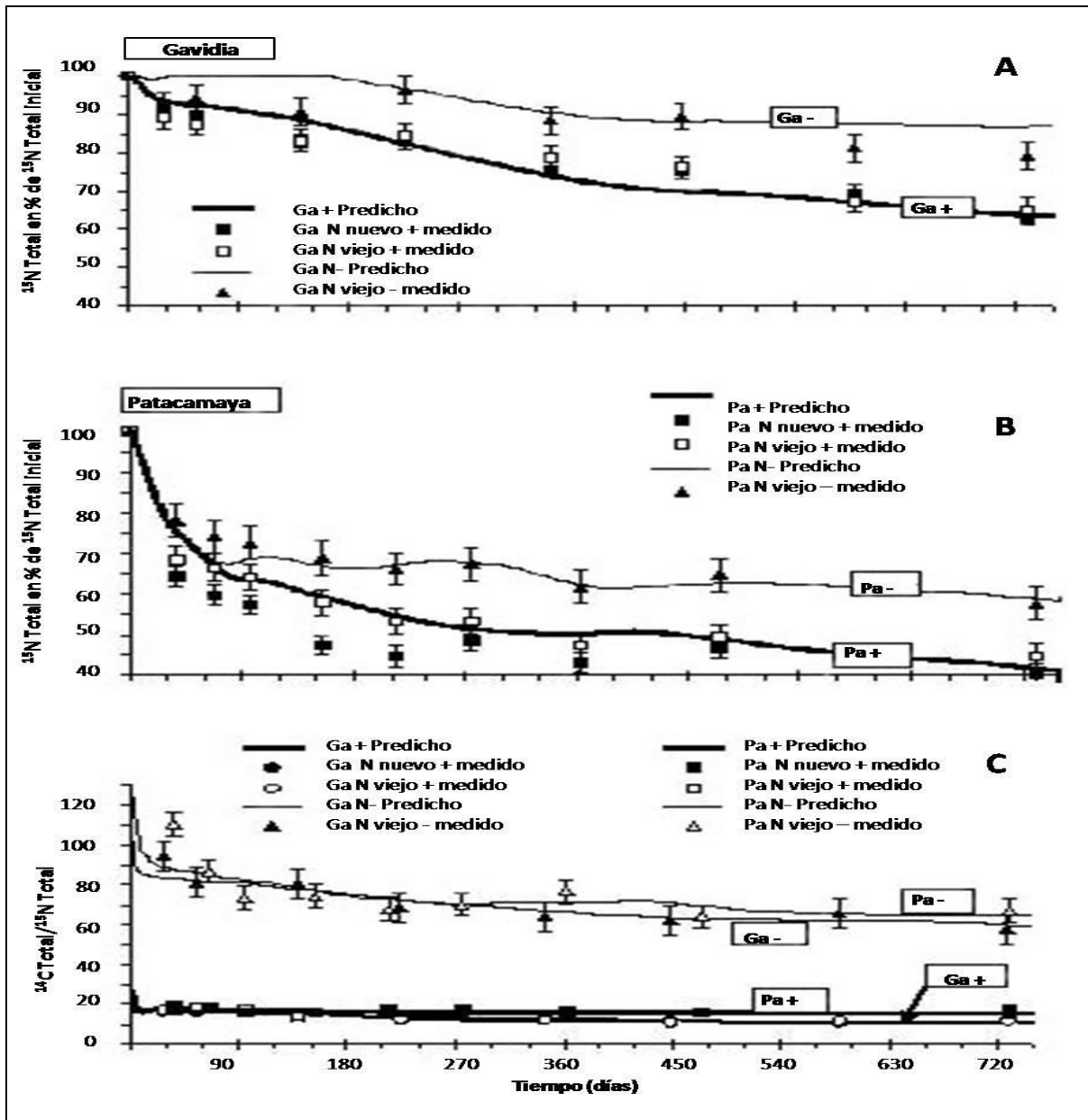
- calidad de la paja marcada aportada
- tiempo de barbecho
- clima y tipo de suelo.

### *Influencia del uso del suelo y de la naturaleza del aporte*

En los dos sistemas, boliviano y venezolano, no se detectó influencia significativa del tiempo de barbecho sobre los procesos de descomposición de la materia orgánica en estos barbechos (Figura 5.11). Pero, sí se detectó una neta influencia de la calidad de la paja aportada y se encontraron relaciones significativas entre los resultados y (Bottner *et al.*, 2006):

- la composición bioquímica y fracción estable del aporte de paja marcada (Thuriès *et al.*, 2002);

- el ratio C/N del aporte y el tipo de alimentación microbiana de los compartimentos vegetales;
- el ratio C/N del aporte y tasa de mortalidad microbiana.



Figuras (A y B) y en la relación ( $^{14}\text{C}$  total /  $^{15}\text{N}$  total) figura (C) en los suelos de Gavidia- Ga (paramo Venezolano) y en Patacamaya- Pa (puna Boliviana). Signo negativo indica material vegetal pobre en N, y el signo positivo indica material vegetal rico en N; Viejo (7 años en barbecho), Joven (barbecho reciente); las barras indican desviación estándar promedio.

Figura 5.11. Comparación de valores medidos y predichos en  $^{15}\text{N}$  total y en % de  $^{15}\text{N}$  total inicial.

## Resultados

### Influencia del clima y del tipo de suelo

Desde un punto de vista climático, la mineralización del carbono y nitrógeno debería ser más débil en la puna boliviana, cuyo clima es muy frío y muy seco, que en el paramo venezolano que es constantemente húmedo. En realidad, se observa todo lo contrario: los suelos arenosos de la puna son muy pobres en carbono (del orden de un 0,5% C) mientras que los suelos del paramo son muy ricos y almacenan alrededor un 10% de C. Era necesario pues buscar otro factor susceptible de invertir este efecto climático en términos de secuestro del C.

Distintas pruebas pusieron de manifiesto que el único parámetro que permitía explicar las diferencias observadas entre los tipos de acumulación de carbono de los lugares del páramo y la puna era el tipo de respiración microbiana. El coeficiente respiratorio encontrado en la puna fue dos veces más elevado en la puna que en el páramo.

Aunque los factores climáticos sean mucho menos favorables a la descomposición en la puna que en el páramo, tan pronto un poco de agua esté disponible, se produce un despertar violento de la biomasa microbiana cuya respiración mineraliza más carbono. Esto es ilustrado por la predicción diaria por MOMOS del cociente respiratorio de la biomasa microbiana que puede tomar valores muy bajos en período seco y también de los valores tres veces más elevados en la puna que en el paramo cuando el agua está disponible (Figura 5.12).

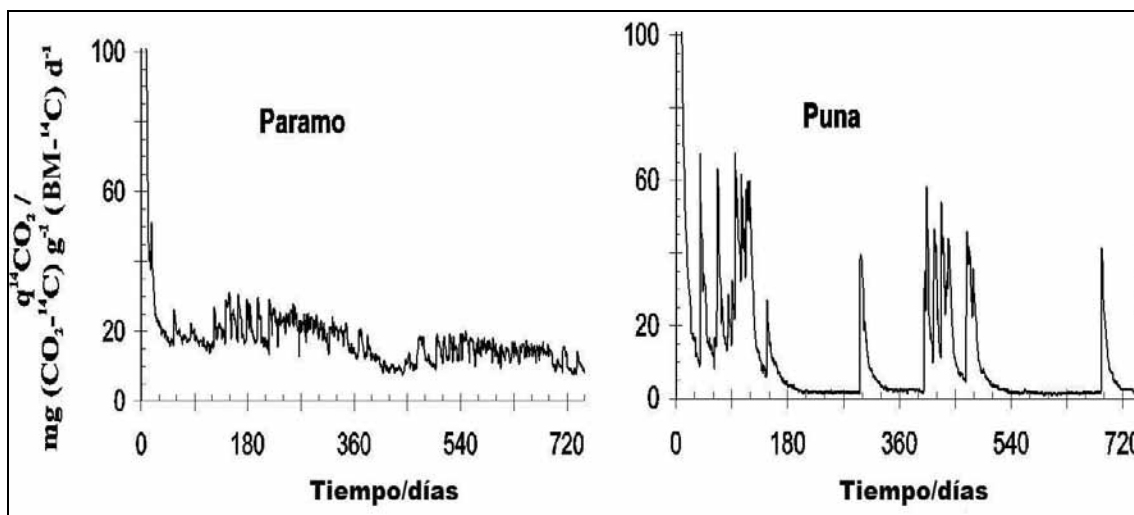


Figura 5.12. Evolución diaria del cociente respiratorio de la biomasa microbiana en los dos ecosistemas del páramo venezolano y la puna boliviana.

### Validación de MOMOS por predicción de la renovación de C del suelo por la rizo-depositación

Este trabajo requirió un acoplamiento entre MOMOS y FAPROM, un modelo realizado para simular la producción primaria de barbecho del paramo venezolano (Martineau et Saugier, 2006; 2007). FAPROM toma en cuenta la producción de biomasa, de necromasa aérea y las entradas de C en el suelo desde las necromasas y la exudación de las raíces. Este trabajo tenía por objeto precisar tres nuevas hipótesis (Pansu *et al.*, 2008):

- a. el valor de los parámetros MOMOS calibrados con las transformaciones de las pajas marcadas  $^{14}\text{C}$ , puede ser utilizado para predecir las transformaciones del C total,
- b. estas predicciones pueden servir a simular el almacenamiento y la renovación de C por los aportes de  $^{12}\text{C}$  de las raíces en contacto con los materiales marcados  $^{14}\text{C}$  de las bolsas,
- c. las contribuciones de las raíces a la materia orgánica del suelo pueden compartirse en:
  - mortalidad de raíz dirigida hacia los compartimentos más o menos estables,
  - exudación de raíz considerada como fuente de energía inmediatamente disponible para el compartimento microbiano BM.

Estas tres hipótesis se validaron en todos los lugares, a excepción del suelo humífero del páramo venezolano para el cual el efecto de la contribución radical no era significativa. Por el contrario, en la puna boliviana, las predicciones eran mejoradas significativamente por la introducción de la contribución radical.

### *Modelo MOMOS: Conclusiones parciales*

Estos primeros ejemplos corresponden al caso clásico donde la experimentación se organiza al servicio de calibración y validación de un modelo simple en proceso de elaboración.

En este caso, el modelo sirve para dar a las cuestiones planteadas, respuestas más adaptadas al aspecto dinámico de los fenómenos estudiados. En efecto, el modelo permite extrapolar a escala del tiempo ecológico, los resultados obtenidos sobre un reducido número de años.

A esta escala de tiempo, por lo que se refiere a la acumulación de carbono y nitrógeno, es mucho más simple liberarse de la servidumbre pesada que representa la modelización de la planta cultivada, la cual supone cultivos repetidos y difíciles a seguir sobre períodos tan largos.

En el caso del modelo MOMOS, una tal acumulación de resultados coherentes y fiables hubiera sido prácticamente imposible a organizar sin hacer explícitamente referencia a un modelo. Ello demuestra bien claramente aquí su papel de marco teórico, tanto para organizar investigaciones como para la gestión racional de los suelos.

## **CONCLUSIONES**

Los tres ejemplos elegidos nos parecen suficientes para demostrar el interés que pueden encontrar tanto los investigadores que los profesores, los estudiantes y los productores en el acoplamiento de la modelización y la experimentación agronómica.

Primero hemos detallado la necesidad de siempre seguir de cerca los pasos de calibración y validación de modelos como el CERES-Maíz, modelos concebidos para variedades y condiciones bien diferentes de las encontradas en los llanos venezolanos.

Estos pasos conciernen primero la variedad de maíz utilizada y luego la simulación más o menos inadecuada del ciclo del agua y del nitrógeno bajo maíz cultivado en condiciones tropicales.

Luego, el ejemplo de la fertilización nitrogenada inadecuada del arroz permite evidenciar, a partir de ejemplos simples, las ventajas de combinar el interés económico y ecológico con el interés científico de las cuestiones planteadas por la calibración y la validación del modelo CERES-Arroz.

Las correcciones que quedan por hacer conciernen principalmente la naturaleza, la amplitud y el calendario de las pérdidas del nitrógeno derivado del fertilizante. La urea siendo el principal fertilizante nitrogenado producido y utilizado en Venezuela, disminuir estas pérdidas tiene mucha importancia tanto económica como ecológica para el país.



Suponiendo que medio millón de hectáreas sea dedicado en los llanos a la producción de maíz y arroz, estos cultivos consumen por lo menos 100.000 toneladas de urea. Investigaciones dirigidas a disminuir de un 20% este consumo sin disminuir significativamente la producción, constituyen entonces una manera altamente rentable de valorizar la modelización del arroz y del maíz en general y la simulación del ciclo del nitrógeno en particular.

Hemos visto, finalmente, que el estudio comparativo de varios agro-ecosistemas mediante un modelo calibrado en el páramo venezolano y la puna boliviana ha permitido confirmar el papel central y fundamental de la biomasa microbiana y de su respiración específica en la constitución y el mantenimiento de las reservas orgánicas del suelo en función de las secuencias climáticas locales.

Por otro lado, la modelización y la escritura de los programas de simulación en computadoras son actividades altamente educativas. Es en efecto, este proceso obliga los alumnos a organizar sus conocimientos a partir de los elementos proporcionados por el profesor. Por otro lado, se ven obligados a tomar conciencia de la complejidad de los agro-ecosistemas, pero sin ser desanimados de antemano por el hermetismo de las barreras disciplinarias. Este enfoque educativo facilitará, por otro lado, su formación profesional y sus relaciones con los distintos protagonistas de la producción agrícola de los llanos, en plena evolución técnica e institucional.

## BIBLIOGRAFÍA

- Alvarez, L. 2005. El sistema de producción de arroz en los llanos occidentales de Venezuela, pp. 241-252. En J.M. Hétier y R. López Falcón (ed.) Tierras Llaneras de Venezuela. CIDIAT, IRE, UNELLEZ. Fondo Editorial UNELLEZ, Editorial Venezolana, C.A., Mérida, Venezuela.
- Anderson, M. G., y K. M. Sables. 1988. A review of the bases geomorphological modeling. In: Anderson, M. G., ed. Modelling Geomorphological Systems, Chichester: Jhon Wiley and sons, pp. 1-32.
- Asadi, M. E. y R. S. Clemente. 2003. Evaluation of CERES-Maize of DSSAT model to simulate nitrate leaching, yield and soil moisture content under tropical conditions. Food, Agriculture & Environment Vol.1 (3&4): 270-276.
- Bert, F.E., C.E. Laciaña, G.P. Podesta, E.H. Satorre, y A.N. Menéndez. 2007. Sensitivity of CERES-Maize simulated yields to uncertainty in soil properties and daily solar radiation. Agric. Syst. 94:41–150.
- Carberry, P.S. y D.G. Abrecht. 1991. Tailoring crop models to the semi-arid tropics. In: *Climatic Risk in Crop Production: Models and Management for the Semi-arid Tropics and Subtropics*. R.C. Muchow and J.A. Bellamy, (eds). CAB International, Wallingford, UK, pp. 157-182.
- Carberry, P.S., R.E. Muchow y R.L. McCown. 1989. Testing the CERES-Maize simulation model in a semiarid tropical environment. *Field Crops Research* 20:297-315.
- Comerma, J., L. Guenni, y G. Medina. 1985. Validación del balance hídrico del modelo CERES maíz en la zona de Maracay, Estado Aragua, Venezuela. *Agronomía Tropical*. 35 (4-6); 115-132. 1985.
- Delgado, R. 1988. Validación de los aspectos balance de agua y nitrógeno del Modelo CERES-MAIZ. Tesis Magíster Scientiae en Ciencia del Suelo. Facultad de Agronomía. Universidad Central de Venezuela, Maracay, Venezuela. 201 p.
- Hoogenboom, G., J.W. Jones, C.H. Porter, P.W. Wilkens, K.J. Boote, W.D. Batchelor, L.A. Hunt, and G.Y. Tsuji (Editors). 2003. Decision Support System for Agrotechnology Transfer Version 4.0. Vol. 1. Univ. of Hawaii, Honolulu, HI.
- Ibáñez, J. J., C. Machado, V. Zucarello y C. González-Huecas. 1995. Modelos de Simulación y Variabilidad Espacio-Temporal. En: (pp. 111-132), Ibáñez, J. J. & Machado, C. (Editores), Análisis

- de la Variabilidad Espacio-Temporal y Procesos Caóticos en Ciencias Medioambientales, Geoforma-CSIC, 308 p. Logroño.
- Jagtap, S.S., F.J. Abamu, y J.G. Kling. 1999. Long-term assessment of nitrogen and variety technologies on attainable maize yields in Nigeria using CERES-Maize. *Agric. Syst.* 60:77-86.
- Jeffers, J.N.R. (1982) *Outline studies in ecology: modelling*. Chapman and Hall, London (U.K.) and New York (U.S.A.).
- Jones, C.A., y J.R. Kiniry. 1986. *CERES-Maize, a simulation model of maize growth and development*. Texas A&M University Press, College Station.
- Jones, J., G. Tsuji, G. Hoogenboom, L. Hunt, P. Thornton, P. Wilkens, D. Imamura, W. Bowen, y U. Singh. 1998. Decision support system for agrotechnology transfer; DSSAT v3. pp. 157-177. *In* G.Y. Tsuji, G. Hoogenboom, P.K. Thornton (eds.) *Understanding options for agricultural production*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands
- Jones, J.W., G. Hoogenboom, C.H. Porter, K.J. Boote, W.D. Batchelor, L.A. Hunt, P.W. Wilkens, U. Singh, A.J. Gijsman, y J.T. Ritchie. 2003. The DSSAT cropping system model. *Eur. J. Agron.* 18:235-265.
- Liu, X., X. Ju, Y. Zhang, C. He, J. Kopsch y Z. Fusuo. 2006. Nitrogen deposition in agroecosystems in the Beijing area. *Agriculture, Ecosystems and Environment.* 113:370–377.
- Lizaso, J. I., A.E. Fonseca y M.E. Westgate. 2007. Simulating source-limited and sink-limited kernel set with CERES-Maize. *Crop Sci.* 47:2078-2088.
- Lizaso, J.I., M.E. Westgate, W.D. Batchelor y A. Fonseca. 2003. Predicting potential kernel set in maize from simple flowering characteristics. *Crop Sci.* 43:892-903.
- López, R. y C. Crespo. 1996. Erosividad de la lluvia y riesgos de erosión hídrica en suelos de Mucuchies, Estado Mérida. *Revista Geográfica Venezolana*, 37(1): 77-95.
- Mantovani, C.E., F.J. Villalobos F. Orgaz y E. Federados. 1995. Modelización de la uniformidad del riego por aspersión efectos sobre el rendimiento de los cultivos. *Agricultural Water Management*, v.27. *La Gestión del Agua*, v. 27. P. 243-257. p.243-257.
- Marrero, J. 1987. Determinación de los coeficientes genéticos del modelo de simulación CERES-MAIZ en 6 cultivares en maíces venezolanos para predecir sus relaciones genotipo-ambiente. Tesis para obtener el grado de Ingeniero Agrónomo, Mención Fitotecnia. Facultad de Agronomía. Universidad Central de Venezuela, Maracay, Venezuela.
- Norero, A. 1983. Crecimiento y desarrollo de raíces de cultivos anuales. Bases agrofísicas para modelos de simulación. *Serie Suelos y Clima* Nº 57. CIDIAT, Mérida, Venezuela.
- Norero, A. 1977. La fitósfera: el ambiente físico de las plantas cultivadas. *Ciencia e Investigación Agraria*, 4(4):263-272.
- Norero, A. 1976. La evapotranspiración de los cultivos. Aspectos agrofísicos. II. Factores climáticos. A. Radiación. CIDIAT, Mérida, Venezuela.
- Norero, A. 1974. Concepto dinámico de "humedad disponible" y su estimación para fines técnicos. V *Jornadas Venezolanas de Riego*. Caracas, Venezuela.
- Norero, A. 1973. Clima, evapotranspiración y crecimiento vegetal. CIDIAT, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.
- Ritchie, J.T., U. Singh, D.C. Godwin y W.T. Bowen. 1998. Cereal growth, development and yield. p. 79–98. *In* G.Y. Tsuji, G. Hoogenboom, P.K. Thornton, (eds.) *Understanding options for agricultural production*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.

- Ritchie, J.T., U. Singh, D.C. Godwin y W.T. Bowen. 1998. Cereal growth, development and yield. p. 79–98. In G.Y. Tsuji, G. Hoogenboom, P.K. Thornton, (eds.) Understanding options for agricultural production. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- Ritchie, S. y J. J. Hanway. 1982. How a corn plant develops. Iowa State Univ. Technol. Spec. Rep., 48 p.

### **Bibliografía temática “Modelo - Momos”**

- Abadín, J., S.J. González-Prieto, L. Sarmiento, M.C. Villar y T. Carballas. 2002 - Successional dynamics of soil characteristics in a long fallow agricultural system of the high tropical Andes, *Soil Biology & Biochemistry*, 34, 1739-1748.
- Bottner P, M. Pansu, L. Sarmiento, D. Hervé, R. Callisaya-Bautista y K. Metselaar. 2006. Factors controlling decomposition of soil organic matter in the fallow systems of the high tropical Andes: a field simulation approach using  $^{14}\text{C}$  and  $^{15}\text{N}$  labelled plant material, *Soil Biology & Biochemistry*, 38 (8), 2162-2177
- Coûteaux M.M., L. Sarmiento, P. Bottner, D. Acevedo y J.M. Thiéry. 2002. Decomposition of standard plant material along an altitudinal transect (65-3968 m) in the tropical Andes. *Soil Biology & Biochemistry*, 34, 69-78.
- Martineau, Y. y B. Saugier. 2006. Comportement contre-intuitif d'un modèle mécaniste de succession végétale. *Comptes Rendus Académie des Sciences France, serie Biologie* 329:21–30.
- Martineau, Y. y B. Saugier. 2007. A process-based model of old field succession linking ecosystem and community ecology. *Ecological Modelling* 204:399-419.
- Pansu, M. y J. Gautheyrou. 2006. Handbook of soil analysis - Mineralogical, organic and inorganic methods Springer, Berlin, Heidelberg, New-York, 993 p.
- Pansu, M., L. Sarmiento, D. Hervé, K. Metselaar y P. Bottner. 2006. Modelling the transformations and sequestration of soil organic matter in two contrasting ecosystems, *Eur. J. of Soil Science*, doi:10.1111/j.1365-2389.2006.00867.x.
- Pansu, M., L. Thuriès, M.C. Larré-Larrouy y P. Bottner 2003 – Predicting N transformations from organic inputs in soil in relation to incubation time and biochemical composition. *Soil Biology & Biochemistry*, 35, 353-363.
- Pansu, M., P. Bottner, L. Sarmiento y K. Metselaar. 2004. Comparison of five soil organic matter decomposition models using data from a  $^{14}\text{C}$  and  $^{15}\text{N}$  labeling field experiment, *Global Biogeochemical Cycles*, 18, GB4022, doi: 10.1029/2004GB002230.
- Pansu, M., Y. Martineau, y B. Saugier. 2008. A modelling method to quantify *in situ* the input of carbon from roots and the resulting C turnover in soil. *Plant and Soil*, doi: 10.1007/s11104-008-9791-1
- Pansu, M., L. Sarmiento, M.A. Rujano, M. Alban, D. Acevedo y P. Bottner. 2009. Modeling Organic changes by Micro-Organisms of Soils (MOMOS model validation) of six contrasted ecosystems of an altitudinal gradient, en correction
- Pansu, M, P. Bottner y L. Sarmiento. 2009. Micro-Organismes et Matière Organique du Sol (modèle MOMOS) : bilan de 20 ans de modélisation basée sur le traçage isotopique *in situ*, en correction

### **Bibliografía temática, Modelización - CERES Maíz**

- Barak, P. y J.A.E. Molina. 1990. Optimization of an ecological model with the Marquard algorithm. *Ecological modelling*, 51: 251-263.

- Bejarano, A., V.S. Segovia, N.C. Rosales y H. Moreno. 1984. Formación, prueba y descripción del híbrido doble de maíz CENIAP PB8. *Agronomía Tropical*, 34: 95-109.
- Bevington, P. R. 1969. *Data reduction and error analysis for the physical sciences*. Mc Graw-Hill, New York.
- Carberry, P. S. 1991. Test of leaf area development in CERES Maize: a correction. *Field Crops Research*, 27: 159-167.
- Cardon, D. A., L. E. Alvarez y J. Pérez. 1993. Utilización del método de la ventana para determinar el crecimiento radicular del maíz. *XII Congreso Venezolano sobre la Ciencia del Suelo*. Guanare, 9 al 13 de noviembre de 1993.
- Cardón, D. A., L. E. Alvarez y J. Perez. 1994. Simulación del área foliar con el modelo CERES MAIZE en la zona tropical. *Festival Nacional del Maíz*, Guanare 12 al 16 de octubre de 1994.
- Cardón, D. 1996. Efecto de la fertilización nitrogenada sobre las reservas de nitrógeno orgánico en los suelos de los llanos occidentales de Venezuela Informe final ULA del Proyecto CE: TS3\* - CT91 – 0003 Tomo 3 Parte 4 Modelización
- Castillo Gómez, A. E. 1988. *Investigación físico-biológica y validación de un modelo de crecimiento, desarrollo y rendimiento del maíz (Zea Mays L.) en Nicaragua*. Magister Scientiae Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Turrialba, Costa Rica.
- Doran, J.W., L.N. Mielke, y J.F. Power. 1985. Tillage-imposed changes in the agricultural ecosystem. En: *Proc. of the 10th Conf. on Reduced Tillage- Rational Use in Sustained Production*. Int. Soil Tillage Res. Org., Guelph, Ontario, Canada, 8-12 July. Elsevier Science Publishing, Amsterdam.
- Ganry, F. 1990. Application de la méthode isotopique à l'étude des bilans azotés en zone tropicale sèche. Thèse de doctorat Université de Nancy 355 p.
- Hétier, J.M., M. Zuvia, S. Houot y J.M. Thierry. 1990. Comparaison de trois modèles choisis pour la simulation du cycle de l'azote dans les agro-systèmes tropicaux. *Cahiers ORSTOM Ser. Pédologie* 25: 1989-1990.
- Hétier, J.M. y D. Cardon. 1997. Balances del nitrógeno derivado del suelo y del fertilizante en un alfisol bajo maíz. *Agronomía trop.* 47 (2): 217-237
- Houot, S., L. Cadot y J.A.E. Molina. 1995. Simulation by NCSWAP of the nitrogen dynamics under crop amended with sewage sludge in two soils. *Proc "8th Nitrogen workshop"*, Sept 1994, Gent (à paraître chez Kluwer, Amsterdam).
- Houot, S., L. Cadot y J.A.E. Molina. 1995. Simulation with the model NCSOIL of the temperature and humidity impact on sewage sludge nitrogen evolution in soils. In *"Modelling the fate of agrochemicals and fertilizers in the environment"*. C. Giupponi, A. Marani and F. Morari Eds, European Society for Agronomy, Unipress, Padova.
- Jones, C.A. y J.S. Kiniry. 1986. *CERES Maize, a simulation model of maize growth and development*. Texas A & M University Press, 193 pp.
- Jones, J.W., Jagtap, S.S., Hoogenboom, G. y Tsuji, G.J. (1989) The structure and function of DSSAT. En: *Proc. of the IBSNAT Symposium on Decision Support System for Agrotechnology Transfer*, 1-14. 81st Annual Meeting of the American Society of Agronomy, Las Vegas, Nevada. Department of Agronomy and Soil Science, University of Hawaii, Honolulu.
- Jordan, M.O., Ph. Girardin, C. Varlet-Granchet, P. Picard, y R. Trendel. 1988. Rythme d'apparition des racines primaires du maïs (*Zea mays*). III Variations observées au champ. *Agron.* 8: 37-46.
- Lal, R. 1974. Soil temperature, soil moisture and maize yield from mulched and unmulched tropical soils. *Plant and Soil* 40: 129-143.

- Legay, J.M. 1996. L'expérience et le modèle, Un discours sur la méthode. Conférence débat Groupe Science en question INRA 24.10.1996
- Lizaso, J. 1994. *Inundación en maíz: efectos en las partes aéreas y subterráneas y un modelo de simulación*. Thèse d'Etat, Universidad Central de Venezuela, Maracay, 236 pp.
- Marquardt, D. W. 1963. An algorithm for least-squares estimation on nonlinear parameters. *J. Soc. Ind. Appl. Math.*, 11: 431-441.
- McKee, G.W. 1964. A coefficient for computing leaf area in hybrid corn. *Agron. J.*, 56: 240-241.
- Menasseri, S., S. Houot y J.A.E. Molina 1995. Field calibration of the decomposition rate of soil organic pools in the NCSWAP model. In "Modelling the fate of agrochemicals and fertilizers in the environment", C. Giupponi, A. Marani and F. Morari Eds, European Society for Agronomy, Unipress, Padova.
- Mielke, L.N., J.W. Doran y K.A. Richards. 1986. Physical environment near the surface of plowed and no-tilled surface soils. *Soil Tillage Res.* 5: 355-366.
- Molina, J.A.E. y K. Richards. 1984. *Simulation model of the nitrogen and carbon cycle in the soil-water-plant system, NCSWAP; guide for the preparation of input data files and execution of NCSWAP*. Soil Series 116, Dep. of Soil Science, Univ. of Minnesota, St Paul.
- Molina, J.A.E., C.E. Clapp, M.J. Shaffer, W. Chichester y W.F. Larson. 1983. A model of nitrogen and carbon transformations in soil: description, calibration and behaviour. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47: 85-91.
- Molina, J.A.E., A. Hadas y C.E. Clapp. 1990. Computer simulation of nitrogen turnover in soil and priming effect. *Soil Biol. Biochem.*, 22, 349-353.
- Pages, L., M. O. Jordan y D. Picard. 1989. A simulation model of the three-dimensional architecture of the maize root system. *Plant and Soil*, 119 :147-154.
- Pansu, M. y H. Sidi. 1987. Cinétique d'humification et de minéralisation de mélanges sols-résidus végétaux. *Science du Sol* 25: 247-265.
- Picard, D., M. O. Jordan y R. Trendel. 1985. Rythme d'apparition des racines primaires du maïs. I. Etude pour une variété en un lieu donné. *Agronomie*, 5: 667-676.
- Press, W.H., B.P., Flannery, S.A. Teukolsky, y W.W. Vetterling. 1989. *Numerical recipes in Pascal*. Cambridge University Press, New York.
- Reydellet, I. 1997. Effet de la rhizosphère du maïs sur la minéralisation brute de l'azote dans un sol ferrugineux tropical (Burkina Faso) Thèse de doctorat Institut polytechnique de Lorraine Spécialité Sciences agronomiques 115p.
- Vegas, J., V. Segovia y E. Bisbal. 1990. Determinación de coeficientes genéticos en cinco híbridos de maíz (*Zea mays*. L.). *I Reunión Suramericana de Maiceros*, 17 al 21 de septiembre de 1990, Maracaibo, Venezuela.

### **Bibliografía temática "Arroz"**

- Alvarez, L. 1982. Efectos de niveles de nitrógeno en dosis únicas y fraccionadas, sobre el rendimiento del arroz variedad Araure 1. Primeras jornadas técnicas de investigación. Programa de producción agrícola vegetal. UNELLEZ. 7 y 8 de diciembre de 1982. Guanare, Venezuela.
- Alvarez, L. 1988. Evaluación de la respuesta del arroz fertilización NPK en suelos del estado Portuguesa. VI Jornadas Técnicas de Investigación del Vice rectorado de Producción Agrícola. UNELLEZ. Del 23 al 25 de noviembre de 1988. Guanare.
- Alvarez, L. 1992a. Rendimiento del arroz en función del fraccionamiento y dosis de nitrógeno en Guanare, Portuguesa, Venezuela. *Revista UNELLEZ de Ciencia y Tecnología*. 10(1-2):57-66.

- Alvarez, L. 1992b. Eficiencia productiva y rentabilidad de la fertilización nitrogenada de arroz en Guanare, Portuguesa, Venezuela. Revista UNELLEZ de Ciencia y Tecnología. 10(1-2):67-76.
- Alvarez L. 1993. Evaluación de líneas de trigo (*Triticum aestivum* L.) tolerantes al calor en los Llanos occidentales venezolanos. Revista UNELLEZ de Ciencia y Tecnología. 11(1-2):77-86. Guanare, Venezuela.
- Alvarez, L. 1997a. Producción de arroz en los Llanos Occidentales de Venezuela. Ediciones de la Universidad Ezequiel Zamora (UNELLEZ). Barinas. 246 pp.
- Alvarez, L. 1997b. Optimización de la fertilización nitrogenada y del manejo del agua de riego en la producción de arroz, mediante el modelo de simulación CERES-rice. Proyecto de tesis. Doctorado en Ciencias Agrícolas. Facultad de Agronomía. Universidad Central de Venezuela. Maracay. 28 pp.
- Alvarez, L. 1999 a. El sistema de producción de arroz en los Llanos Occidentales de Venezuela y su sostenibilidad. UNELLEZ. Vice-rectorado de Producción Agrícola. Guanare. 10 pp.
- Alvarez, L. 1999 b. Descenso del C y del N del suelo, producidos por el monocultivo de arroz y la rotación arroz-soya, en condiciones del municipio Guanare. Venezuela. (Resumen). XV Congreso Venezolano de la Ciencia del Suelo. Barquisimeto. p 74.
- Alvarez, L. 2000. Rendimiento y rentabilidad de variedades de arroz (*Oryza sativa* L.) durante la época lluviosa, en Portuguesa, Venezuela. Revista UNELLEZ de Ciencia y Tecnología 18(1): 97-118.
- Alvarez, L., R. González y J. Guerrero. 1985. Evaluación de la respuesta del arroz a la fertilización NPK, en un Vertisol en el estado Portuguesa. Terceras jornadas técnicas de investigación. Programa de producción agrícola vegetal. UNELLEZ. Guanare. 25 Y 26 de febrero de 1985.
- Comerma, J., F. Campos, O. Márquez, E. Peña y J. Vera, 1990. Tierras para el cultivo de arroz en Venezuela. In El arroz en Venezuela. Alcance. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Agronomía. Maracay. Pp. 73-82.
- Hansen, J.W., N.B. Pickering, J.W. Jones, C. Wells, H. Chan y D.C. Godwin. 1994. Weatherman. In DSSAT version 3. Eds. Gordon Y. Tsuji, Goro Uehara, Sharon Balas. International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer. University of Hawai. Honolulu. pp. 137-192.
- IRRI. 1990. Rice researchers launch major study on global warming. The IRRI reporter. 4/90. pp. 1-2.
- Norero, A. 1982. Material de enseñanza del curso Modelos Agronómicos. CIDIAT. Mérida, Venezuela.
- Kropff, M.J., F.W.T. Penning de Vries y P.S. Teng. 1995. Capacity building and human resource development for applying systems analysis in rice research. IRRI, Manila. 20 p.
- Ramírez Gómez, M. 1995. Sostenibilidad agropecuaria y su relación con la nutrición integrada de plantas y conservación de suelos y aguas. Programa Nacional de manejo integrado de suelos y aguas. CORPOICA. Bogotá. 19 pp.
- Ritchie, J.T., E.C. Alocilja, U. Singhand y G. Uehara. 1986. IBSNAT/CERES Rice Model. Agrotechnology Transfer 3:1-5.
- Sing, U., G.Y. Tsuji, y D.C. Godwin. 1990. Planting new idea in DSSAT: The CERES rice Model. Agrotechnology Transfer 10:1-7.

## Bibliografía balances de nitrógeno

- Carballas, T., González-Prieto S.J., Acea M.J., Villar M.C., Diaz-Raviña M. y Carballas M. 1986. The mineralización of nitrogen as a measure of biological degradation in soils. *Transactions of the XIII Congress of the ISSS*, Hamburg.
- Christianson, C.B., Vlek P.L.G., 1991. Alleviating soil fertility constraints to food production in West Africa : Efficiency of nitrogen fertilizers applied to food crops. *Fertilizer research* 29: 21-33
- Clay, D.E., Malzer G.L. Anderson J.L. 1990) Tillage and dicyandiamide influence on nitrogen fertilizer immobilization, remineralization and utilization by maize. (*Zea mays* L.) *Biology and Fertility of Soils*
- Gonzalez Prieto, S.J. y T. Carballas. 1992. Simple step-wise acid hidrólisis method for the fractionation of soil organic nitrogen. *Soil Biology and Biochemistry* 24, 925-926.
- Jenkinson, D.S. 1981. The fate of plant and animal residues in soil. In: *The chemistry of soil Processes* (D.J. Greenland and M.H.B.Hayes Eds) pp 505-561. John Wiley and Son Ltd.
- Kelley, K.R. y F.J. Stevenson. 1987. Effect of carbon source on immobilization and chemical distribution of fertilizer nitrogen in soil. *Soil Science Society of America Journal* 51, 946-951.
- Legg, J.O., F.W. Chichester G. Stanford y W.H. De Mar. 1971. Incorporation of tagged mineral nitrogen in soil. *Soil Science Society of America Proceedings* 35, 273-276
- Reddy, G.B. y K.R. Reddy. 1993. Fate of nitrogen-15 enriched ammonium nitrate applied to corn. *Soil Science Society of America Journal* 57, 111-115
- Smith, C.J., J.R. Freney y A.R. Mosier. 1993. Effect of acetylene provides by wax-coated calcium carbide on transformation of urea nitrogen applied to an irrigated wheat crop. *Biology and Fertility of Soils* 16, 86-92.
- Stevenson, F.J. 1982a. Organic forms of soil N. in: *Nitrogen in Agricultural Soils*. (F.J.Stevenson Eds.), pp 67-122 American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, Madison.
- Ta, T.C., M.A. Paris y F.D.H. Mc Dowal. 1989. Evaluation of <sup>15</sup>N method and to measure nitrogen transfer from alfalfa to companion timothy. *Plant and Soil* 114, 243-247.
- Timmons, D.R. y R.M. Cruse. 1990. Effect of fertilization method and tillage on nitrogen-15 recovery by corn. *Agronomy Journal* 82, 777-784.

**Roberto López Falcón, Jean Marie Hétier,  
Danilo López Hernández, Richard Schargel, Alfred Zinck**  
Editores

**TIERRAS LLANERAS DE VENEZUELA**  
*...tierras de buena esperanza*



**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES**  
Consejo de Publicaciones  
2015



Título de la obra: **Tierras Llaneras de Venezuela**  
...tierras de buena esperanza

Editores: **Roberto López Falcón, Jean Marie Hétier**  
**Danilo López Hernández, Richard Schargel**  
**Alfred Zinck**

Arbitrado y publicado por el Consejo de Publicaciones de la  
Universidad de Los Andes  
Av. Andrés Bello, antiguo CALA, La Parroquia  
Mérida, Estado Mérida, Venezuela  
Telefax (+58274) 2713210, 2712034, 2711955  
e-mail cpula@ula.ve  
<http://www.ula.ve/cp>

Colección: Tecnología  
Serie: Ingeniería  
1ª edición en CD Rom, 2015

Reservados todos los derechos  
© Roberto López Falcón, Jean Marie Hétier, Danilo López Hernández  
Richard Schargel, Alfred Zinck

Diagramación: Consejo de Publicaciones  
Diseño de Portada: Consejo de Publicaciones

Hecho el Depósito de Ley  
Depósito Legal FD2372015329  
ISBN 978-980-11-1781-0

Mérida, Venezuela, 2015