

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA

EMBRAPA

EVALUACIÓN DE PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN

VEGETAL EN BASE A UN ENFOQUE DE

SISTEMA

CONVÊNIO IICA/EMBRAPA

C O N T E N I D O

	<u>Página</u>
I. INTRODUCCION	1
II. CLASIFICACION U ORDENAMIENTO DE LAS INVESTIGACIONES EN CULTIVOS	2
III. SISTEMAS DE EVALUACION DE PROYECTOS DE INVESTIGACION	4
IV. TEORIA AGRONOMICA, MODELOS DE PRODUCCION Y EVALUACION DE INVESTIGACIONES	7

EVALUACION DE PROYECTOS DE INVESTIGACION VEGETAL
EN BASE A UN ENFOQUE DE SISTEMAS *

Heruán Tejeda **

I. INTRODUCCION

El estudio de los procesos asociados a la investigación, es decir, la investigación de la investigación, es un tema cuyo desarrollo es muy reciente, pero que ha estado recibiendo mucha atención en los últimos 15 años (Hunter y Rubenstein, 1971).

Durante un cierto período de tiempo, después de la Segunda Guerra Mundial, el sector industrial de los países avanzados invertía grandes cantidades de recursos en investigación y desarrollo. La rentabilidad de los nuevos productos compensaba las inversiones, sin que existiera demasiada competencia en el campo de la investigación. Sin embargo, llegó un momento en que la situación se tornó altamente competitiva, con muchas empresas investigando sobre los mismos productos o procesos. Así se hizo necesario determinar prioridades para lograr una distribución eficiente de los recursos destinados a esta actividad.

En agricultura, tanto la existencia de recursos limitados para investigación y desarrollo tecnológico, como la necesidad de aumentar la producción para satisfacer una demanda creciente, hacen necesaria una distribución muy eficiente de estos recursos, de tal manera de obtener el máximo beneficio para la sociedad (Kaldor, 1971).

En la presente exposición, se analizan algunos problemas asociados con la evaluación de investigaciones en cultivos. El énfasis de la discusión se centra en los aspectos agronómicos del problema, asumiendo que en la medida que se desarrolle un conjunto de conocimientos teóricos sobre producción de cultivos y que las relaciones de producción se expresen cuantitativamente mediante modelos, los resultados de los análisis económicos para determinar prioridades de investigación tendrán mayor validez.

* Trabajo presentado al Seminario sobre Evaluación de Proyectos de Desarrollo Agropecuario (con Énfasis en Programas de Investigación). Gobierno de Uruguay-BID-IIICA. Montevideo, 16-20 de Febrero, 1976.

** Ingeniero Agrónomo, Ph.D., Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Santiago, Chile.

La exposición tiene tres partes. En la primera, se hace una revisión de diferentes clasificaciones que se han presentado sobre investigaciones en cultivos. En la segunda parte, se revisan procedimientos utilizados para determinar prioridades, identificando problemas comunes. En la tercera parte, se desarrolla la hipótesis de como un conjunto de principios agrónomos y la expresión cuantitativa de las relaciones que afectan el rendimiento facilitan la evaluación de investigaciones en producción vegetal, mejorando la calidad y validez de las prioridades así determinadas.

II. CLASIFICACION U ORDENAMIENTO DE LAS INVESTIGACIONES EN CULTIVOS

Es evidente que el tipo de investigación a desarrollar depende, entre otras consideraciones, del estado de progreso de la agricultura de la región de interés. Desde este punto de vista, podemos distinguir, a lo menos, tres tipos de agricultura:

- a) Agricultura de colonización, que sería aquella que se desarrolla en terrenos que recién se incorporan al cultivo, ya sea por habilitación de la región o por asentamiento de colonos. Esta situación podemos caracterizarla por un nivel muy escaso o nulo de conocimientos acerca de las especies más adaptadas para cultivar y de las formas más apropiadas de cuidados culturales. Este estado de cosas se pueden encontrar en diferentes regiones de América Latina, como por ejemplo la zona de Aysén en Chile.
- b) Agricultura tradicional, llevada a cabo por pueblos establecidos por años en la región. En este caso, probablemente se conocen especies adoptadas, lo que no excluye la posibilidad de introducir otras como el trigo en América, por ejemplo. En relación a las técnicas de cultivo, si bien se pueden encontrar aspectos sobresalientes, como las terrazas en la región andina, generalmente se observan deficiencias importantes desde algún otro punto de vista de la tecnología moderna. Este tipo de agricultura se encuentra en diferentes regiones de América del Sur.
- c) Agricultura desarrollada, en donde especies, variedades y técnicas de cultivo han sido determinadas con la ayuda de la experiencia y la investigación. Este tipo de agricultura es dominante en los países del mundo desarrollado, existiendo también en importantes regiones de América del Sur. Aquí se presenta el fenómeno que muchas veces coexisten, lado a lado, la agricultura desarrollada y la agricultura tradicional.

Es evidente que en cada uno de estos tres casos, el orden de prioridades en investigación en producción de cultivos va a ser diferente.

Otro aspecto que condiciona los objetivos de la investigación es el tipo de información tecnológica que se quiera proporcionar a los agricultores. Solamente presentaremos tres niveles de complejidad:

- a) Recomendación simple, basada principalmente en datos considerados de validez promedia para la región en cuestión. En este caso se considera suficiente la información obtenida en pocos lugares, considerados como "representativos". Esta información se da como válida para las condiciones promedias de la región. Ejemplo de esto se da principalmente en el uso de pesticidas y fertilizantes.
- b) Un segundo nivel de complejidad es aquel en que al formular la recomendación, se toman en cuenta características susceptibles de ser identificadas y medidas en el sitio de producción. Este es el caso de prescribir pesticidas sólo cuando se tiene comprobado el peligro de plagas, riego luego de determinar la necesidad de agua y fertilizante sólo en base a análisis de suelo.
- c) El tercer nivel de complejidad pudiera consistir en aquella recomendación que junto con incorporar los conocimientos de validez para toda la región, y las mediciones de las características locales identificables, también considera una estimación de la distribución de probabilidad de aquellos factores que sin ser controlables, afectan al rendimiento, tales como disponibilidad de lluvia, daño de heladas, etc.

Evidentemente, el tipo de investigación a realizar difiere de un caso a otro, probablemente existiendo un orden secuencial de complejidad y costo. Sin embargo, cada nivel subsecuente permite al agricultor mejorar la base sobre la cual fundamenta las decisiones que orientan la administración de su predio.

Brady (1967), en una presentación relacionada con los programas de investigación agronómica del futuro, identificaba tres tipos de investigación en el área de suelos y cultivos.

- a) La primera de ellas, denominada "investigación interpretativa" tendría por objeto el aumentar el conocimiento sobre las relaciones básicas del ambiente en que se desarrolla la producción, y no necesariamente buscar la solución de un problema particular. No siempre esta clase de investigación tiene importancia dentro del conjunto de las investigaciones en producción vegetal.
- b) La segunda categoría consiste en la denominada "investigación adaptativa", cuyo objeto es probar, bajo nuevas condiciones de producción, uno o varios elementos cuya eficacia ya ha sido probada en otros lugares, como por ejemplo variedades, productos químicos o técnicas de cultivo. Este tipo de investigación ha jugado un papel muy importante en la propagación de tecnologías mejoradas en Estados Unidos y se estima que tiene un alto potencial en los países subdesarrollados.

- c) La tercera categoría comprende a la denominada "investigación empírica", cuyo objeto es estudiar mediante ensayo directo las posibilidades de nuevas especies, variedades, productos químicos, técnicas de cultivo, etc., sin prestar mayor atención al conocimiento de las causas por las cuales la técnica ensayada sirve o no sirve. Una proporción considerable de las actuales técnicas de producción en países desarrollados se han originado en investigaciones empíricas. Sin embargo, el hecho de que los nuevos conocimientos se obtengan sólo por tanteo constituye una limitación importante, por cuanto no se generan los elementos de juicio que permitan predecir el comportamiento de la nueva técnica bajo condiciones diferentes a las estudiadas. Al decir del Dr. Brady, las revistas científicas están repletas de artículos en que, por ejemplo, se informa de la respuesta de cultivos a diferentes fertilizantes. Estos artículos demuestran que todavía se está utilizando una gran cantidad de esfuerzos para determinar la respuesta de un cultivo dado, en un año dado, en un suelo dado, a un fertilizante dado y todo esto sin ninguna expectativa que los resultados así obtenidos puedan ser aplicados en otros lugares.

Moseman, (1974), en su libro sobre investigación agrícola para países en desarrollo, sustenta una clasificación de las investigaciones similar a la de Brady (1967). Moseman distingue:

- a) La investigación adaptativa, cuyo objetivo es adecuar las innovaciones a los ambientes específicos donde se utilizarán.
- b) La investigación de protección, para evitar o reducir al mínimo la emergencia derivada de la aparición de plagas y enfermedades, capaces de causar pérdidas extensas.
- c) La investigación innovativa, para mantener el constante suministro de materiales de alto rendimiento y prácticas de producción mejoradas.

Se debe hacer notar que no nos hemos referido a la popular clasificación que diferencia las investigaciones en básicas o aplicadas. En realidad los resultados de estudios que pueden ser considerados como básicos, constituyen insumos de conocimiento para los estudios aplicados, no siendo fácil entonces, el establecer límites dentro del continuo constituido por las investigaciones básicas, las aplicadas y las de desarrollo (Mahlstedt, 1971).

III. SISTEMAS DE EVALUACION DE PROYECTOS DE INVESTIGACION

La literatura presenta varios esquemas que se están utilizando para evaluar proyectos de investigación.

Meyer (1971), canciller de la Universidad de California en el campus de Davis, ha descrito el procedimiento utilizado en dicha universidad y estación experimental. La característica fundamental de este sistema consiste en que, además de utilizar la técnica de presupuesto por programa, incorpora de lleno la comunidad académica en todo el proceso de toma de decisiones. En la creación de este procedimiento, la primera etapa consistió en desarrollar un plan académico para involucrar los departamentos y sus respectivos cuerpos docentes e investigadores en el proceso de toma de decisiones. Durante la segunda etapa, se identificó el conjunto de objetivos o metas y los correspondientes programas para cumplir dichas metas. En la tercera etapa se desarrollaron y/o simplificaron los procedimientos operacionales. Luego de determinar los objetivos, metas y programas para toda la estación experimental, las metas y programas de cada departamento se determinan internamente en cada uno de ellos, luego de un intenso intercambio de ideas y examen de los programas en avance y las direcciones futuras de la investigación. El presupuesto es entregado a los departamentos y éstos tienen libertad para redistribuir recursos entre programas en la medida que sea requerido por las operaciones. Todo el procedimiento se fundamenta en el hecho de que si bien puede ser desastroso permitir una completa autonomía, por otro lado, la alternativa de imponer un plan maestro que no tome en cuenta las ideas o intereses de las personas en niveles más bajos (de toma de decisiones) es igualmente perjudicial.

El sistema de planeamiento a largo plazo de investigación en el estado de Iowa ha sido descrito por Mahlstede (1971). Este procedimiento, similar al de California en el sentido de que requiere la participación activa de toda la comunidad científica, se caracteriza por una mayor incorporación de elementos formales de análisis económico. En el desarrollo del procedimiento, se comienza por aceptar que el financiamiento público de las actividades de la estación experimental involucra tres metas: crecimiento económico, seguridad e igualdad. Por lo tanto, la investigación debe, implícitamente, contribuir al logro de estas metas. El procedimiento descrito, considera solamente la primera meta, es decir, desarrollo económico. Luego de individualizar 19 áreas de investigación, se forma un panel de discusión para cada una de ellas. Cada cual identificó las líneas de investigación posibles dándoles un orden de prioridades de acuerdo a un criterio de evaluación que considera la factibilidad de realizar el estudio, el beneficio esperado en relación a la meta de crecimiento económico, la probabilidad de obtener dicho beneficio y el correspondiente costo. El beneficio de la investigación se estima igual al valor de los recursos ahorrados para producir una cantidad equivalente de producto, luego de aplicar el resultado de la investigación. El costo se obtiene al estimar los recursos necesarios para realizar la investigación, incluyendo el factor tiempo de la inversión.

Nuevamente, el rol de los investigadores es fundamental dentro del procedimiento, por cuanto la validez del mismo depende fuertemente de la promesa que los científicos, a través de un trabajo sistemático de grupo, pueden predecir hasta cierto grado, el resultado de la investigación, y así proporcionar la base para seleccionar aquellas líneas que aparezcan con las más altas tasas de retorno.

En Minnesota se ha desarrollado un sistema de procesamiento de información para la asignación de recursos en investigación agrícola. El sistema denominado "MARRAIS" ha sido descrito por Fishel (1971), y sirve para seleccionar entre líneas alternativas de investigación propuestas y la distribución eficiente de recursos entre ellas. Se asume que previamente han sido identificadas todas las posibles líneas de investigación. A diferencia de los anteriores, este procedimiento es esencialmente cuantitativo, constituyendo un programa de computación. Utilizando conceptos de estadística bayesiana, incorpora la estimación probabilística de lograr el objetivo de la investigación, en forma de una distribución "a priori" de probabilidad. Además, descuenta a la fecha presente, tanto el costo de la investigación por el período que duren los trabajos, como el retorno durante un cierto número de años para obtener las cifras en las cuales se basa el análisis costo-beneficio. Sin embargo, a pesar de su refinamiento matemático-estadístico-económico, este procedimiento presenta las mismas limitaciones que los anteriores en el sentido que la confiabilidad de los resultados depende del investigador que proporcionó las informaciones básicas. Según el mismo autor, la confiabilidad sólo puede determinarse comparando predicciones hechas por el sistema con lo que realmente ocurra en la realidad, después de efectuar la investigación.

Gastal (1975), ha presentado un procedimiento el cual está orientado tanto a identificar líneas potenciales de investigación como a seleccionar las más eficientes, bajo ciertos criterios. Además, el procedimiento reconoce dos problemas secuenciales de selección: determinar prioridades entre los rubros o productos, y en la segunda etapa determinar las disciplinas o campos del conocimiento en los cuales investigar. El proceso de selección de rubros se realiza mediante la asignación de puntajes, en base a un conjunto de criterios económicos y sociales (valor de la producción, superficie cubierta, participación en la balanza de pagos y variaciones de precios), sumando para cada producto, los puntajes de cada indicador, para obtener el valor final. Este proceso se realiza en forma estratificada y con niveles crecientes de agregación en el orden región, estado y país. La determinación de prioridades de investigación dentro de cada rubro se realizó en base a la información proporcionada por científicos especializados.

Paez (1975), ha enfrentado esta misma situación, es decir, la determinación de prioridades de investigación por rubros y dentro de rubros, mediante el desarrollo de un procedimiento matemático de maximización con restricciones en dos etapas. En la primera etapa, se obtiene la distribución óptima de una cantidad fija de recursos entre los diferentes rubros, y en la segunda, se optimiza la distribución de recursos entre los aspectos disciplinarios que se deben estudiar dentro de cada rubro. La optimización por rubros se realiza en base a datos de rendimiento por hectárea, precio del producto y costo de producción. La distribución de recursos entre disciplinas se realiza bajo el supuesto que es posible jerarquizar los problemas que afectan a cada producto, en base a información proporcionada por investigadores, extensionistas y productores.

Bello (1975), en su publicación sobre evaluación del desarrollo de estaciones experimentales, sugiere un conjunto de criterios para evaluar los programas de investigación. Estos criterios consideran tanto los objetivos del programa como la forma en que se realiza, siendo por lo tanto, un procedimiento para evaluar programas en desarrollo y no para tomar decisiones sobre qué investigaciones es más conveniente realizar.

Todos los procedimientos descritos anteriormente, requieren estimaciones previas de los siguientes aspectos: a) el conjunto de todas las líneas de investigación posibles de realizar, b) el costo de cada línea, c) la probabilidad de obtener el resultado perseguido, y el beneficio derivado de aplicar el resultado de la investigación al proceso productivo.

Tal como se indicó al revisar cada procedimiento, las respuestas a por lo menos algunas de estas interrogantes depende en mayor o menor grado de la opinión de los investigadores obteniéndose la información por consulta directa. Esto implica que la información así obtenida, si bien procede de una fuente altamente calificada, no está libre de subjetividad. Elementos como formación académica, experiencia previa, familiaridad con determinadas investigaciones y preferencias personales, son todos factores potencialmente causantes de opiniones sesgadas. En estas circunstancias, a pesar de lo sofisticado y complejo que pueda ser el procedimiento utilizado, la evaluación resultante no será mejor que los datos. Por lo tanto, el grado de subjetividad de la información básica constituye una fuente potencial de problemas que convendría eliminar en cuanto fuera posible.

IV. TEORIA AGRONOMICA, MODELOS DE PRODUCCION Y EVALUACION DE INVESTIGACIONES

A continuación presentaremos algunas ideas que pudieran servir de orientación en la búsqueda de soluciones al problema de la subjetividad en la evaluación de investigaciones en cultivos.

En primer lugar quisiera establecer la hipótesis de trabajo de que por lo menos una parte de las dificultades que enfrenta la evaluación de investigaciones tiene su origen en: a) la ausencia de un conjunto de conocimientos generales sobre producción de cultivos, que integre las diferentes disciplinas involucradas y que pudiera denominarse Teoría Agronómica; y b) en la falta de expresiones cuantitativas para las relaciones de producción, que sean válidas, a lo menos para cierto rango de condiciones particulares de regiones y cultivos.

Este vacío de una teoría agronómica ha sido detectado por diferentes investigadores. Black (1968) indica que, si bien es cierto que los principales problemas científicos en el área suelo-planta son la medición de efectos y la integración de conocimientos, hasta el presente el mayor esfuerzo se ha concentrado sólo en medir, sin que la integración haya experimentado progresos de importancia. Army y colaboradores (1971), reconocen que la Agronomía ha dedicado la mayoría de sus esfuerzos a la comprensión de mecanismos aislados involucrados en el proceso productivo sin que se haya desarrollado un esfuerzo paralelo equivalente destinado a sintetizar los conocimientos de un cuerpo estructurado de teoría agronómica.

Brady (1967), por su parte ha criticado el hecho de que tradicionalmente una proporción demasiado alta de tiempo y recursos se emplea en investigaciones cuyos resultados son aplicables solamente en la época y lugar en donde se realizó el trabajo.

Diferentes razones se pueden citar como posibles causas de esta situación (Tejeda, 1973). La agronomía, como la ciencia de la utilización de recursos naturales e industriales en la producción agrícola es el resultado de la integración de diferentes disciplinas y áreas del saber. Es fácil identificar que dentro de la problemática agronómica, una parte de ella es esencialmente determinística, mientras otra parte también importante es de naturaleza estocástica. Por ejemplo, dada la presencia de una maleza, el hecho de controlarla mediante la aplicación de una dosis de herbicida puede considerarse como una situación determinística. La resistencia varietal a enfermedades fitopatológicas también puede considerarse como determinística. El control del pH del suelo mediante encalado o enmiendas también es un problema que puede ser considerado determinístico. Por otro lado, la ocurrencia de una helada o sequía, es un problema estocástico, como también lo es el nivel de rendimiento que se logra en un cultivo cualquiera sea la variedad y manejo empleado. Aparentemente, los aspectos determinísticos de la Agronomía han avanzado hasta altos niveles de desarrollo, mientras los aspectos estocásticos recién están siendo considerados y cuantificados. Los aspectos determinísticos bien pueden haber logrado su actual estado de avance debido a la contribución, en conceptos y en metodología, de las ciencias básicas Biología, Química Física, con las cuales están directamente relacionados. Además, este tipo de estudios es relativamente fácil de realizar, utilizando sistemas aislados dentro del laboratorio, invernadero o recinto de campo experimental. Contrariamente, los aspectos estocásticos deben ser estudiados de tal manera que se pueda estimar la distribución de probabilidad involucrada, lo cual puede significar explorar el comportamiento del fenómeno estudiado en toda la región de producción y por más de un año. El objetivo de estas investigaciones debe ser evaluar la variabilidad en vez de lograr resultados promedios, como ha sido el enfoque tradicional. Este retraso del estudio de los aspectos estocásticos en relación a los determinísticos puede ser una causal de la falta de una teoría agronómica integrada, la cual necesariamente debe tener en cuenta ambos aspectos.

Otro factor que puede haber retrasado el desarrollo de una teoría agronómica es que ella implica el estudio de problemas con un alto número de dimensiones. Forrester, citado por Hutchinson (1971), indica que la mente humana no está bien adaptada para hacer predicciones intuitivas sobre la operación de sistemas complejos, en los cuales la retroinformación tenga un rol importante. Solamente, desde la segunda mitad de este siglo, con el advenimiento del computador electrónico, ha sido posible evaluar en gran escala, hipótesis en campos multifactoriales, como también estudiar estructuras complejas, que incluyan procesos de retroinformación. Hasta entonces y de acuerdo a las herramientas desarrolladas por Fisher (Ferrari, 1966), el objetivo era precisamente el contrario, es decir, aislar solo unos pocos factores, manteniendo el resto a niveles constantes, cuando se

estudiaba su efecto sobre el sistema. El error experimental desafortunadamente ha sido considerado como una especie de canasto de desperdicios, donde se ha arrojado la información inexplicable que, excepto errores de medición, se atribuye a "factores no experimentales" y/o "no controlados". Esta información es precisamente la que hoy debemos identificar para completar el cuadro de conocimientos generales.

Los principios agronómicos generales deben incluir por lo menos, los siguientes aspectos:

1. Integrar todos los conocimientos provenientes de las diferentes disciplinas relativas a la producción, y que se estudian separadamente, dentro de un esquema lógico y organizado, que permita derivar expresiones cuantitativas del efecto de los factores de producción sobre el rendimiento.
2. Incluir el efecto estocástico del medio ambiente, de tal manera de poder predecir el comportamiento de cultivos en regiones diferentes de las estudiadas, con sus correspondientes distribuciones de probabilidad.

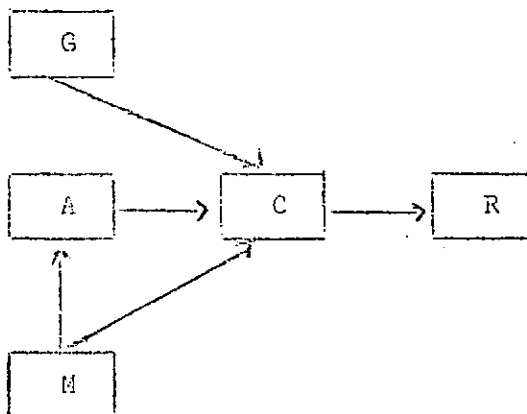
En otras palabras, y de acuerdo a Army y colaboradores (1971), la agronomía debe describir en términos cuantitativos la respuesta de los cultivos a los cambios en disponibilidad de nutrientes, genotipo, pesticidas, normas de manejo, otras características del suelo y los efectos del clima.

La falta de un conjunto de conocimientos generales agronómicos tendría los siguientes efectos negativos sobre el problema de la evaluación y asignación de recursos a las investigaciones en producción vegetal. En primer lugar, no se dispone de criterios objetivos que permitan identificar en forma sistemática el conjunto de líneas de investigación que es posible realizar en una región para llevar la producción más allá de ciertos niveles pre-determinados. En segundo lugar, no se dispone de mecanismos que permitan predecir, en forma objetiva y a la vez cuantitativa, de cuales serían los beneficios posibles de alcanzar de cada línea de investigación. Y, conocer la probabilidad objetiva de lograr el resultado perseguido en cada una de ellas.

Como se vió anteriormente, estas estimaciones hasta el momento se obtienen en gran parte, del conocimiento y la experiencia subjetiva de los investigadores.

A continuación describiremos una forma de representar esquemáticamente las relaciones entre grupos de factores de producción y rendimiento de diferentes especies en una región de límites definidos. Considerando la región y las especies cultivadas como el sistema en estudio, trataremos luego de establecer algunos principios de validez general dentro del sistema. Finalmente, discutiremos la factibilidad de describirlo mediante modelos estadístico-matemáticos.

En primer lugar, queremos comenzar diciendo que el rendimiento (R) de un cultivo (C) es el resultado de la interacción de tres conjuntos de factores. Ellos son la capacidad genética de la planta (G), los factores del ambiente (A) y las prácticas culturales o manejo (M). En una primera aproximación la interrelación entre estos cinco elementos se puede representar en la siguiente forma:



Es evidente que este esquema es demasiado simple, siendo necesario perfeccionarlo para obtener una representación más cercana a la realidad. Una primera consideración que puede tenerse en cuenta es que la relación entre manejo (M), ambiente (A) y cultivo (C) es dinámica durante el período (t) comprendido entre el establecimiento y la cosecha del cultivo en cuestión. Por lo tanto, la expresión de estos tres elementos debe incluir un subíndice (t), tomando la forma $M(t)$, $A(t)$ y $C(t)$.

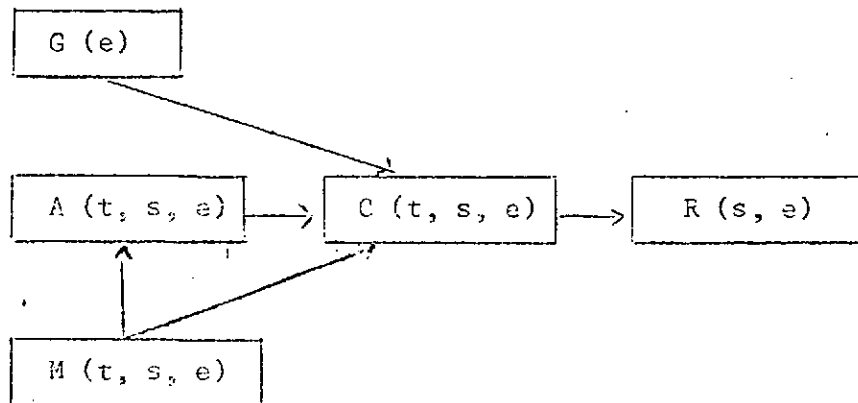
La capacidad genética (G) indudablemente permanece constante durante un ciclo dado del cultivo, aún cuando puede ser modificada entre un ciclo y otro tanto por efectos genéticos y/o de ambiente (mutaciones, segregaciones, etc.), como también por efecto de un manejo específicamente orientado para ello (mejoramiento). (G) puede ser considerada como un vector cuyos componentes definen las diferentes características del cultivo, tales como precocidad, resistencia a enfermedades, calidad del fruto, etc.

El elemento $A(t)$, que representa el ambiente, también es un vector que comprende propiedades del suelo, del clima y del medio biótico en que se desarrolla el cultivo. No todos los componentes son funciones del tiempo (t), como por ejemplo la profundidad del suelo; sin embargo algunos muy importantes, como la disponibilidad de agua y temperatura del suelo, por ejemplo, son esencialmente variables a lo largo del ciclo del cultivo.

El manejo $M(t)$ es otro vector cuyos componentes no son todos dependientes del tiempo. Mientras la época de siembra es un dato fijo para todo el ciclo del cultivo, el calendario de riego se debe ir ajustando a medida que avanza el crecimiento.

Hasta el momento, hemos supuesto que el proceso se desarrolla en un punto dado del espacio físico agrícola y que se cultiva una sola especie. Ninguno de estos dos supuestos son ciertos en la realidad, salvo casos de monoculturas continuadas en plantaciones con límites bien definidos. La situación más común es que varias especies se cultiven dentro de una región. Una consecuencia que se deriva inmediatamente de esta realidad es que los componentes del vector $A(t)$, que representa los factores ambientales, deben tener un segundo subíndice (s) que representa un sitio cualquiera en la región, por cuanto es un hecho observado que no existe dentro de una región agrícola, dos sitios de producción en donde las variables que afectan el rendimiento sean idénticas.

La existencia de variabilidad en los componentes ambientales plantea la necesidad de definir un rango de variación dentro del cual se asume que nuestro análisis tiene validez. Para facilitar el planteamiento, supondremos que es posible elegir límites a la región agrícola de interés y que dentro de esta región así definida, existen valores mínimos y máximos para las variables ambientales, que definirían los correspondientes rangos. Además de los componentes ambientales, tanto el cultivo como el manejo toman valores específicos para cada sitio de producción, por lo cual también deben incluir el subíndice (s). Finalmente, todos los elementos del esquema son específicos para cada especie cultivada (e), por lo cual todos los elementos deben incluir este subíndice. Por lo tanto, una forma general de representar los cultivos de una región dada, durante un ciclo dado de crecimiento sería:



$$t = 1, 2, \dots, T$$

$$s = 1, 2, \dots, S$$

$e = 1, 2, \dots, E$, en donde T es el número de unidades de tiempo que comprende la estación de crecimiento, S es el número de sitios diferentes de producción dentro de la región y E es el número de especies que se cultivan. El resto de los términos conservan el significado definido anteriormente.

Dentro de esta representación abstracta de la producción de cultivos en una región dada, los conocimientos agronómicos actuales permiten enunciar los siguientes supuestos:

- I. Es posible establecer un ordenamiento de las diferentes especies en cuanto a su capacidad para producir alimentos y/o fibra. Esto es lo que se conoce como concepto de las ventajas comparativas.
- II. Para cada especie cultivada, es posible establecer un ordenamiento de las correspondientes variedades en cuanto a su capacidad para producir alimento y/o fibra, lo que corresponde al concepto de adaptación de variedades.
- III. El rendimiento máximo de una variedad adaptada de una especie corresponde a una combinación de niveles óptimos de factores, asumiendo un manejo adecuado. Si uno o más factores no está en su nivel óptimo, el rendimiento será inferior al máximo, independientemente del hecho de que el resto esté a nivel óptimo. Este es el concepto de factor limitante.
- IV. Del conjunto de factores potencialmente limitantes, es posible corregir el nivel de algunos de ellos mediante prácticas de manejo, existiendo otro grupo que no es posible modificar. Los primeros se denominan factores manejables de producción y los segundos, factores no manejables.
- V. Dentro del conjunto de factores no manejables, algunos de ellos son de naturaleza estocástica, como los factores climáticos, mientras que otros son esencialmente fijos. Mientras es posible estimar la distribución de probabilidad de los factores estocásticos, los factores limitantes fijos son los que determinan el techo de producción del cultivo y variedad de la región, cuando el resto de los factores está a niveles óptimos.

Luego de establecer estos principios básicos, podemos ver que de ellos se desprende una secuencia lógica de objetivos y metas para la investigación en producción vegetal. Las metas serían (a) identificar las especies con mayores ventajas comparativas, (b) introducir o desarrollar variedades adaptadas, (c) identificar factores ambientales limitantes y desarrollar normas de manejo destinadas a optimizar sus niveles y (d) estimar la distribución de probabilidad de los factores ambientales aleatorios.

La realización parcial o total de las líneas de investigación destinadas a lograr estos objetivos dependerá de la evaluación de costos, factibilidad y beneficios esperados de cada una de ellas. En esta etapa es donde los modelos estadístico-matemáticos podrían hacer su mayor contribución, al permitir simular la aplicación de posibles resultados de investigación al proceso productivo.

No existen argumentos que sean conocidos por el autor, que se opongan, a priori, a la posibilidad de establecer modelos estadístico-matemáticos para describir la relación entre comportamiento de especies cultivadas y las variables ambientales. Estos modelos permitirían simular el efecto de diferentes ambientes de producción sobre un conjunto de especies, y de esta manera predecir su ordenamiento relativo. Algo muy similar pudiera ser posible en relación a variedades. Esto último aparece como altamente factible de estudiarse, dada la existencia de programas cooperativos a nivel mundial sobre adaptación de variedades, bajo el liderazgo de centros internacionales. Modelos de adaptación de variedades podrían indicar, con un grado de subjetividad menor que la opinión de los investigadores, acerca de la magnitud del beneficio de la investigación en programas de mejoramiento. Esto podría ser incluso extensivo al estudio de la resistencia a enfermedades, dada la relación entre ataque de enfermedades, resistencia varietal y factores ambientales.

El desarrollo de modelos de rendimiento de los cultivos, generalizados a varias regiones con diferentes rangos de valores para los factores ambientales, permitiría simular el efecto de corregir, mediante las correspondientes investigaciones, uno o varios factores detectados como limitantes en una nueva región.

Nuevamente estas estimaciones, necesarias para el análisis costo beneficio de diferentes líneas de investigación, tendrían un grado menor de subjetividad, que la opinión de investigadores.

Como ejemplo de modelos que se han construido para expresar la relación entre rendimiento de cultivos y factores de producción, mencionaremos sólo dos, uno para maíz y otro para trigo. Cada uno ha sido construido empleando una filosofía y métodos de trabajo distintos. No es el objeto de discutir ahora las ventajas y defectos de cada procedimiento, o si se debe descartar uno en favor de otro. Lo que interesa hacer notar es que ya existe una cierta variedad de procedimientos cuantitativos, capaces de describir relaciones determinísticas o estocásticas (Anderson, 1972), y que están disponibles para ser incorporados en las investigaciones agronómicas.

Flinn (1971), utilizando técnicas de análisis de sistemas, ha construido un modelo que describe el efecto de la variación de la disponibilidad de agua sobre el rendimiento del maíz. En el modelo se incluyen los aspectos relevantes del suelo, fenología de la planta, variables de clima y estrategias de riego. La validación, con datos de producción obtenidos en una situación particular, dio como resultado que el modelo predecía los rendimientos reales con una tolerancia menor que 10%. Flinn indica que el modelo permitiría obtener, mediante simulación, la información sobre respuesta del cultivo a diferentes condiciones de suelo, clima y estrategias de riego, lo cual sería especialmente valioso tanto para áreas actualmente regadas que carezcan de estos conocimientos, como para áreas de futuros proyectos de regadío.

El autor de la presente exposición (Tejeda, 1973), ha desarrollado un modelo estadístico del rendimiento del trigo versus factores manejables y no manejables dentro de una región de contornos determinados. Se utilizó la técnica de sistemas de ecuaciones de regresión (Dhrymes, 1970), atacándose el doble problema de identificar las variables que afectan el rendimiento (especificación del modelo) y a la vez estimar los coeficientes de regresión (Kennedy y Bancroft, 1971), que describen cuantitativamente el efecto de las variables sobre el rendimiento. Se encontró que para la región estudiada, el rendimiento del trigo dependía de la fertilización nitrogenada y fosfatada; del contenido inicial de nitrógeno, fósforo y potasio del suelo; de la profundidad del suelo, el cultivo previo y la época de siembra. Aún cuando la validez de este modelo se restringe a la región en donde se recolectaron los datos originales, se estudian procedimientos que permitan su adaptación a un rango mayor de condiciones ambientales, para poder simular el efecto de introducir tecnologías mejoradas de producción en regiones de agricultura más atrasada.

Si bien es cierto que los modelos descritos no han sido desarrollados con el objeto específico de predecir la aplicación del resultado de investigaciones en producción vegetal, ellos demuestran que se está muy cerca de lograr este objetivo. En otras palabras, aún cuando todavía puede ser prematuro proclamar su existencia, aparentemente el camino está abierto para desarrollar los procedimientos que permitan la evaluación de proyectos de investigación vegetal mediante un enfoque de sistemas.

BIBLIOGRAFIA

- ANDERSON, J.R. 1972. Economic models and agricultural production systems. Canberra, Australia, Proceedings of the Australian Society of Animal Production. 9:77-83.
- ARMY, T.J., Isleib, D.R. y F.A. Greer. 1971. Integrating production systems to advance yields and quality. In Eastin, J.D. and R.D. Munson, eds. Moving off the yield plateau. American Society of Agronomy Special Publication N°20:83-89.
- BELLO, E.S. 1975. Métodos para evaluar el desarrollo institucional en estaciones experimentales agropecuarias. IICA-OEA-Zona Sur. Montevideo, Uruguay. 60 p.
- BLACK, C.A. 1968. Soil-plant relationships. New York, John Wiley and Sons, Inc.
- BRADY, N.C. 1967. Agronomic research programs for the future. In R.S. Whitney, ed. Challenge to agronomy for the future. Madison, Wisc. American Society of Agronomy Special Publication N°10.
- DHRYMES, P.J. 1970. Econometrics. Statistical foundations and applications. New York, Harper and Row. pp. 153-161.
- FERRARI, Th. J. 1966. Towards a soil fertility in dimensions. Netherland Journal of Agricultural Sciences 14:225-238.
- FISHEL, W.L. 1971. The Minnesota Agricultural Research Resource Allocation Information System and Experiment. In Fishel, W.L. ed. Resource allocation in agricultural research. Minneapolis, University of Minnesota Press. p. 344-381.
- FLINN, J.C. 1971. The simulation of crops-irrigation systems. In Dent, J.B. y J.R. Anderson, eds. System analysis in agricultural management. Sydney, Australia, John Wiley and Sons, Australasia Pty. Ltd. pp. 123-151.
- GASTAL, E. 1975. Prioridades en investigación agrícola a nivel nacional. Criterios, técnicas y socio-económicos para el establecimiento de esas prioridades. Ciudad de Panamá, Panamá FAO-IICA. Consulta de expertos en investigación en América Latina. 20 p. (Mimeografiado).

- HURTER, A.P. and A.H. Rubenstein. 1971. Decision-making mechanisms for research selection in the private sector. In Fishel, W.L., ed. Resource allocation in agricultural research. Minneapolis, Minnesota, University of Minnesota Press. pp. 195-207.
- HUTCHINSON, K.J. 1972. Modelling soil-plant-animal systems. Canberra, Australia, Proceedings of the Australian Society of Animal Production. 9:10-15.
- KALDOR, D.R. 1971. Social returns to research and the objectives of public research. In Fishel, W.L., ed. Resource allocation in agricultural research. Minneapolis, Minnesota, University of Minnesota Press. pp. 62-79.
- KENNEDY, W.J. and T.A. Bancroft. 1971. Model building for prediction in regression, based upon repeated significant tests. The Annals of Mathematical Statistics 42: 1275-1284.
- MAHLSTEDTE, J.P. 1971. Long-range planning at the Iowa Agricultural and Home Economic Experiment Station. In Fishel, W.L. ed. Resource allocation in agricultural research. Minneapolis, University of Minnesota Press. pp. 326-343.
- MEYER, J.H. 1971. The California academic-responsive budget system. In Fishel, W.L., ed. Resource allocation in agricultural research. Minneapolis, University of Minnesota Press. pp. 302-315.
- MOSEMAN, A.H. 1974. Investigación agrícola para países en desarrollo. México, Editorial Roble. 106 p.
- PAEZ, G. y R. Moscoso. 1975. Esquema bi-etapico da alocação dos recursos por productos e áreas-problema para a investigação. Brasília, Brasil, Embrapa. (Mimeografiado).
- TEJEDA, H.R. 1973. Statistical analysis and model building for a wheat production system in Chile. Unpublished Ph.D. thesis. Ames, Iowa, Library, Iowa State University of Science and Technology.