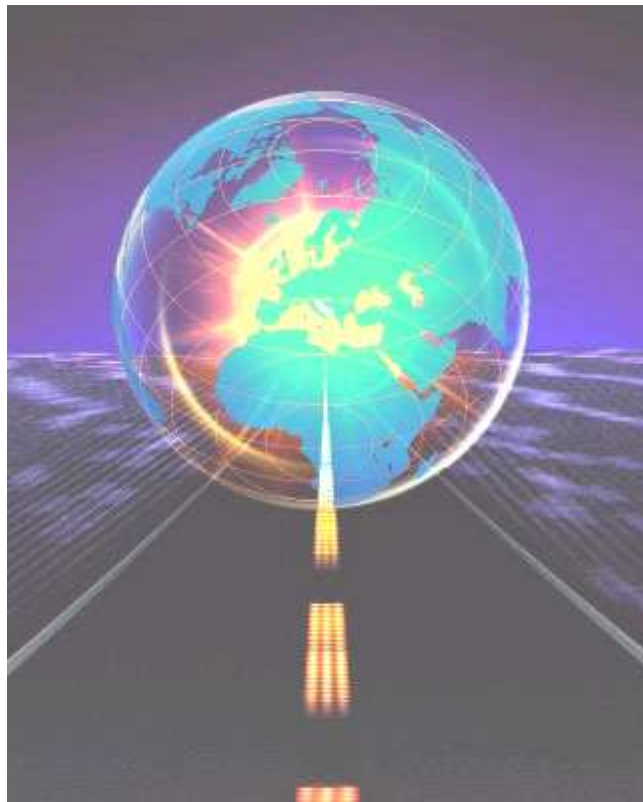


# CAPITULO V



## **5. SIMULACION DE PROCESOS**

5.1 Fundamentos del Modelado .....	65
5.2 Investigación de Sistemas.....	75
5.3 Tendencias actuales de la Simulación.....	80
5.4 Algunos Modelos de Simulación en Agricultura.....	82



### 5.1. FUNDAMENTOS DEL MODELADO.

#### 5.1.1. Simulación.

La administración de sistemas reales organizados por el hombre cada vez se vuelven más complejos. A partir del apareamiento de las computadoras electrónicas, la simulación es una de las herramientas más importantes para el análisis del diseño y operación de complejos procesos o sistemas.

Podemos decir que la simulación es la representación del modelo de un sistema real.

**Definición:** “*Simulación es el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y realizar experimentos con él para entender el comportamiento del sistema o evaluar varias estrategias (dentro de los límites impuestos por un criterio o por un conjunto de criterios) para la operación del sistema.*” [lib01].

Entonces, simulación es realizar o construir un modelo analítico del sistema real y utilizarlo para obtener resultados del comportamiento del mismo en situaciones distintas.

De acuerdo a la definición de simulación las entradas del modelo y las relaciones funcionales entre sus diversos componentes pueden o no implicar un elemento aleatorio sujeto a las reglas de probabilidad. El modelado de la simulación entonces es una metodología aplicada y experimental que intenta:

- a) Describir el comportamiento del sistema.
- b) Postular teorías o hipótesis que expliquen el comportamiento observado.
- c) Usar estas teorías para predecir un comportamiento futuro, es decir, los efectos que se producirán mediante cambios en el sistema o en su método de operación.



## **Optimización de la fertilización agrícola mediante simulación de procesos.**

---

La simulación es aplicable a todas las disciplinas como por ejemplo: administración económica, mercadeo, educación, política, ciencias sociales, transporte, agricultura, etc.

### **5.1.2. Definición de Modelo.**

El modelo es la representación de un objeto, idea o sistema de forma diferente al original. El propósito es ayudarnos a entender, explicar o mejorar un sistema. El modelo puede ser una replica exacta de éste (aunque con un material y escalas diferentes).

Las funciones de un modelo pueden ser múltiples como: predecir, comparar, toma de decisiones, comunicación y ayuda para el pensamiento, etc.

El uso de los modelos no es nuevo, estos han sido muy importantes en el desarrollo intelectual de la humanidad. Desde siempre el hombre ha adoptado la idea de utilizar el modelo para presentar y expresar ideas u objetos. El modelado incluye desde pinturas de murales, y fabricación de ídolos, hasta la escritura de complejos sistemas de ecuaciones matemáticas aplicables al vuelo de un cohete, al análisis de fenómenos naturales, etc.

Un modelo puede tomar muchas formas, pero una de las más útiles es la matemática, que se expresa mediante un conjunto de ecuaciones; pero nuestra definición debe incluir y permitir modelos cualitativos y cuantitativos [www23].

### **5.1.3. Función de los Modelos**

Es difícil clasificar todas las funciones que satisfacen los modelos. Podemos reconocer cinco usos legítimos y comunes:

- a) Una ayuda para el pensamiento.
- b) Una ayuda para la comunicación.
- c) Para entrenamiento e instrucción.
- d) Una herramienta de predicción.
- e) Una ayuda para la experimentación.



## **Optimización de la fertilización agrícola mediante simulación de procesos.**

---

---

**Los modelos ayudan al pensamiento**, organizando y clasificando conceptos confusos e inconsistencias. La construcción de modelos obliga a organizar, evaluar y examinar la validez de pensamientos.

**Como una ayuda para la comunicación**, ya que todos los lenguajes verbales tienden a ser ambiguos e imprecisos, cuando se trata de representar ideas o descripciones complejas. Los modelos bien concebidos pueden eliminar esta ambigüedad y proporcionar un modo de comunicación más eficiente y efectivo.

**Los modelos como ayuda al entrenamiento e instrucción**, son muy importantes para afrontar varias eventualidades antes de que ocurran. La mayoría de los lectores ya conocen dichas aplicaciones como modelos de tamaño natural o modelos de vehículos espaciales usados para entrenar astronautas, modelos para enseñar a conducir automóviles, y simulación de negocios para entrenar ejecutivos.

Una de la ayuda más importante de los modelos es la *predicción* de las características del comportamiento de la entidad modelada.

Finalmente, el uso de los modelos hace posible la *experimentación* controlada para situaciones en que los experimentos directos son impracticables o muy costosos.

De todo lo descrito anteriormente podemos decir que un modelo puede servir para uno de los dos propósitos principales: ya sea *descriptivo* para explicar y entender: o *preceptivo*, prediciendo y duplicando las características del comportamiento.

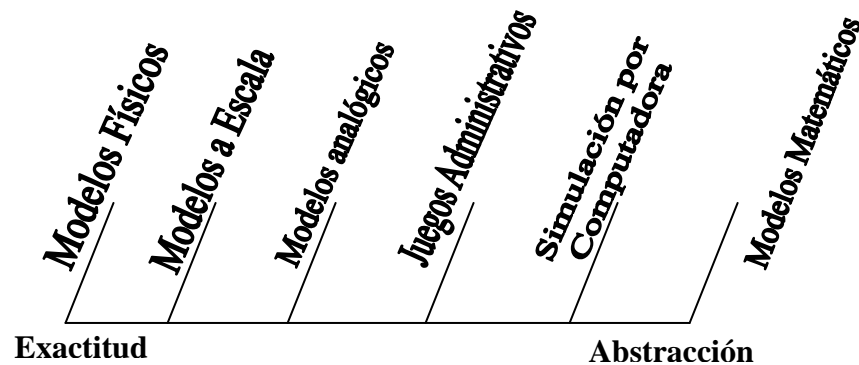
### **5.1.4. Clasificación de los modelos**

Algunos de los esquemas de clasificación son los siguientes:

- a) Estático (de corte seccional) vs. Dinámico (de series de tiempo).
- b) Determinístico vs. Estocástico.

- c) Discreto vs. Continuo.
- d) Icónico o físico vs. Analógico vs. Simbólico.

Podemos decir que los modelos de simulación son como un espectro continuo, empezando con los modelos exactos o reales a escala y siguiendo con los modelos matemáticos completamente abstractos ver la *Figura 5.1*.



*Figura 5.1.*

Como podemos observar al inicio del espectro encontramos los modelos físicos o icónicos, debido a que se asemejan al sistema en estudio. Los modelos físicos pueden ser del mismo tamaño de la entidad modelada, como pueden ser de mayor o menor tamaño dependiendo del modelo; estos también pueden ser bi o tridimensionales. Pueden usarse para demostración o para experimentación indirecta.

Los modelos analógicos son aquellos en los que una propiedad del objeto real está representada por una propiedad sustituida, que por lo general se comporta de manera similar.

Al avanzar a través del espectro, encontramos aquellos modelos en los cuales interactúan el factor humano y la computadora. En general, dichas simulaciones se conocen como juegos para la toma de decisiones; el hombre interactúa con la salida de la computadora y obtiene un resultado, este se retroalimenta a la computadora como entradas al sistema.



## **Optimización de la fertilización agrícola mediante simulación de procesos.**

---

Los modelos matemáticos o simbólicos son aquellos en que se usa un símbolo, en vez de usar un dispositivo físico, para representar una entidad. Representar sistemas mediante un conjunto de ecuaciones diferenciales es un ejemplo muy común. Hay que tener mucho cuidado con estos modelos abstractos por lo que es conveniente asegurarse que el modelo sea una representación válida del problema.

### **5.1.5. Ventajas y Desventajas de la Simulación.**

Todos los modelos de simulación se llaman modelos de entrada y salida. Es decir el sistema produce la salida a partir de una entrada, estos son incapaces de generar un resultado por si mismos. Por lo tanto, la simulación no es una teoría, sino una metodología de resolución de problemas. Debido a que es necesario y deseable ajustar la herramienta técnica al problema en vez de lo contrario, esto hace que surja la pregunta ¿Cuándo es útil la simulación?

Hemos definido la simulación como la experimentación con un modelo de un sistema real. Un problema experimental aparece cuando surge la necesidad de cierta información específica acerca de un sistema; sin embargo, algunas veces las desventajas de la experimentación directa son muy grandes.

1. Puede interrumpir las operaciones de la compañía.
2. Si la gente es parte integral del sistema, puede afectar los resultados, es decir, el hecho de que se observe a la gente puede modificar su comportamiento.
3. Mantener las mismas condiciones operativas para cada repetición o corrida del experimento, puede ser muy difícil.
4. El obtener el mismo tamaño de muestra, puede requerir más tiempo y ser más costoso.
5. Quizás no pueda ser posible explorar muchos tipos de alternativas en la experimentación del mundo real.

Por lo tanto, la simulación debe ser utilizada cuando exista una o más de las siguientes condiciones:



## **Optimización de la fertilización agrícola mediante simulación de procesos.**

---

1. No existe una adecuada formulación matemática del problema.
2. Los métodos analíticos están disponibles, pero los procedimientos matemáticos son tan complejos y difíciles, que la simulación brinda un método más simple de solución.
3. Las soluciones analíticas existen y son posibles, pero están más allá de la habilidad matemática del personal disponible.
4. Se desea observar el trayecto histórico, simulando el proceso sobre un periodo.
5. La simulación puede ser la única posibilidad.
6. Se requiere la aceleración del tiempo para sistemas o procesos que demandan mucho tiempo para realizarse.

Una ventaja adicional de la simulación radica en su poderosa aplicación educativa y de entrenamiento. Aunque la simulación es considerada como un planteamiento de fuerza bruta o como último recurso por aquellos que tienen una extensa preparación matemática.

La simulación es una de las técnicas cuantitativas de más uso, que se emplea para resolver problemas de administración.

### **5.1.6. Estructura de los Modelos de Simulación.**

La estructura de un modelo se puede representar matemáticamente de la siguiente manera.

$$E = f(x_i, y_j)$$

Donde

$E$  es el efecto del comportamiento del sistema

$x_i$  Son las variables y los parámetros que podemos controlar

$y_j$  Son las variables y los parámetros que no podemos controlar

$f$  Es la relación entre  $x_i$  y  $y_j$ , que da origen a  $E$

En una perspectiva un poco más amplia, encontramos que cualquier modelo consiste en alguna combinación de los siguientes elementos:



## Optimización de la fertilización agrícola mediante simulación de procesos.

---

---

- a) **Componentes.** Son partes constituyentes que en conjunto forman el sistema<sup>1</sup>, también nos referimos a los componentes como *elementos o subsistemas*.
- b) **Variables.** Se puede tomar aquellos valores que la forma de la función permite. Hay dos tipos de variables en el modelo de un sistema, las *exógenas* y las *endógenas*. Las variables exógenas también se llaman variables de entrada, estas surgen debido a causas externas. Las variables endógenas se generan dentro del sistema. A las variables exógenas las podemos llamar independientes y las variables endógenas dependientes.
- c) **Parámetros.** Son cantidades a las cuales el operador del modelo puede asignarles valores arbitrarios.
- d) **Relaciones Funcionales.** Describen el comportamiento de las variables y los parámetros dentro de un componente o entre componentes de un sistema. Estas relaciones pueden ser de naturaleza determinística o estocástica. Las relaciones determinísticas son identidades o definiciones que relacionan ciertas variables o parámetros, donde una salida del proceso es singularmente determinada por una entrada dada. Las relaciones estocásticas son aquellas en las que el proceso tiene de manera característica una salida indefinida para una entrada determinada.
- e) **Restricciones.** Son limitaciones impuestas a los valores de las variables o la manera en la cual los recursos pueden asignarse o consumirse. Estas restricciones pueden ser auto-impuestas por el diseñador o impuestas por el sistema mediante la naturaleza del mismo.
- f) **Funciones de Objetivo.** Es una definición explícita de los objetivos o metas del sistema y de cómo se evaluarán.

---

<sup>1</sup> **Sistema:** Se define como un grupo o conjunto de objetos unidos por alguna forma de interacción o interdependencia, para realizar una función específica.





## **Optimización de la fertilización agrícola mediante simulación de procesos.**

---

### **5.1.7. El Arte del Modelado.**

El arte del modelado consiste en la habilidad para analizar un problema. Para esto tenemos siete principios:

1. Dividir el problema del sistema en problemas más simples.
2. Establecer una definición clara de los objetivos.
3. Buscar analogías.
4. Considerar un ejemplo numérico específico del problema.
5. Establecer algunos símbolos.
6. Escribir los datos obvios.
7. Si se obtiene un modelo manejable, enriquecerlo. De otra manera simplificarlo.

En general uno puede *simplificar*, si se hace lo siguiente:

- a) Convertir a las variables en constantes.
- b) Eliminar o combinar variables.
- c) Suponer linealidad.
- d) Agregar suposiciones más potentes y restricciones.
- e) Restringir los límites del sistema.

El *enriquecimiento* implica exactamente lo contrario

### **5.1.8. Criterios para Realizar un buen Modelo.**

Podemos establecer ciertos criterios que cualquier buen modelo de simulación debe cumplir. Un buen modelo de simulación debe ser:

- a) Fácil de entender por parte del usuario.
- b) Dirigido a metas u objetivos.
- c) Sensato, en cuanto a que no dé respuestas absurdas.
- d) Fácil de controlar y manipular por parte del usuario, es decir, debe ser sencillo comunicarse con el modelo.
- e) Completo, en lo referente a asuntos importantes.
- f) Adaptable, con un sencillo procedimiento para modificar el modelo o para actualizarlo.



## Optimización de la fertilización agrícola mediante simulación de procesos.

---

- g) Evolutivo, es decir, que debe ser sencillo al principio y volverse más complejo, de acuerdo con el usuario.

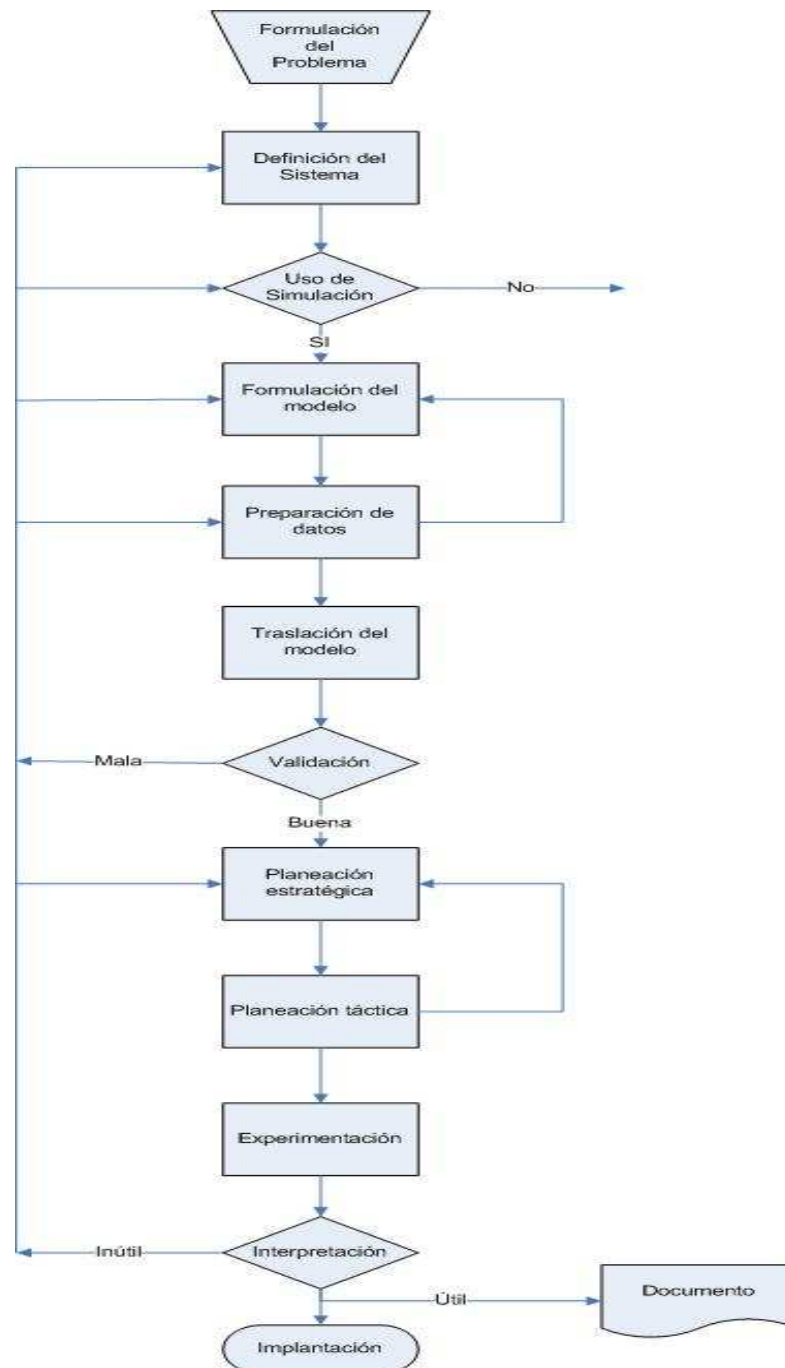
### 5.1.9. El Proceso de Simulación.

Si se supone que la simulación se usa para investigar las propiedades de un sistema real, se debe mencionar las siguientes etapas:

1. *Definición del Sistema:* Determinación de los límites o fronteras, restricciones y medidas de efectividad que se usarán para definir el sistema que se estudiará.
2. *Formulación del modelo:* Reducción o abstracción del sistema real a un diagrama de flujo lógico.
3. *Preparación de datos:* Identificación de los datos que el modelo requiere y reducción de éstos a una forma adecuada.
4. *Translación del modelo:* Descripción del modelo en un lenguaje aceptable para la computadora que se usará.
5. *Validación:* Incremento a un nivel aceptable de confianza de modo que la inferencia obtenida del modelo respecto al sistema real sea correcta.
6. *Planeación Estratégica:* Diseño de un experimento que producirá la información deseada.
7. *Planeación Táctica:* Determinación de cómo se realizará cada una de las corridas de prueba especificadas en el diseño experimental.
8. *Experimentación:* Corrida de la simulación para generar los datos deseados y efectuar el análisis de sensibilidad.
9. *Interpretación:* Uso del modelo y resultados.
10. *Documentación:* Registro de las actividades del proyecto y los resultados así como de la documentación del modelo y su uso.

Con los pasos anteriores se supone que el problema puede resolverse de una mejor manera mediante la simulación. Pero ya se ha dicho que la simulación es un planteamiento aproximado o un último recurso para resolver problemas [lib1].

Los pasos o elementos de una simulación y sus relaciones se muestran en el diagrama de flujo de la *figura 5.2*.



*Figura 5.2. Diagrama de flujo.*



### 5.2. INVESTIGACION DE SISTEMAS

#### 5.2.1. Iniciación del Estudio.

La experiencia indica que la iniciación adecuada de un proyecto de simulación, puede marcar el éxito o fracaso de este. El proyecto se inicia cuando se presenta la necesidad de tomar una decisión; además los resultados pueden servir para un doble propósito: primero ayudar a formular recomendaciones y segundo para justificar, apoyar y ayudar a tomar decisiones.

El análisis se empieza recopilando información y datos apropiados que proporcionen tanto la estructura inicial del estudio como una descripción del sistema. El proyecto de simulación normal empieza con la descripción de la situación de parte de los involucrados en el sistema a modelar, pero esta descripción es en términos generales e imprecisos, por lo que debemos elaborar un diagnóstico.

Los límites del estudio deben establecerse rápidamente para obtener una idea clara de lo que se hará y lo que no se hará. Deben hacer las estimaciones de los beneficios y los costos que este implicar; estos costos aun para un simple proyecto de simulación pueden ser muy altos tanto en dinero como en tiempo hombre.

Para formular un problema correctamente, se debe dividir en dos fases.

*Primera fase:* Período de orientación y formulación del problema del o los involucrados en el sistema real; la fase dos es la formulación del problema de investigación. Los pasos de esta fase son los siguientes:

1. Identificar a quien o a quienes toman las decisiones.
2. Determinar los principales objetivos de cada uno de los responsables en algún aspecto de la decisión.
3. Identificar a otros participantes y el grado de influencia que puede tener en una solución.



## **Optimización de la fertilización agrícola mediante simulación de procesos.**

---

4. Determinar los objetivos y los intereses establecidos de otros participantes.
5. Establecer qué aspectos de la situación están expuestos al control de quienes toman las decisiones.
6. Identificar aspectos que pueden afectar el resultado de posibles soluciones.
7. Determinar las objeciones o acciones contrarias que pueden sugerir los otros participantes.

*Segunda fase:* Formulación del problema de investigación esta fase se refiere a establecer bases y planear la investigación del estudio. Los pasos de esta son los siguientes:

1. Especificar las tareas y el sistema que se estudiará.
2. Determinar las restricciones impuestas, en términos de personal, itinerario, fondos y tiempo de cómputo.
3. Establecer el sistema de administración.
4. Asegurar la participación del personal requerido.
5. Tener acceso a toda la información y datos pertinentes.
6. Desarrollar la base de criterios adecuados.
7. Establecer los límites del estudio.

### **5.2.2. Descubrimiento de Hechos.**

La fuente de datos más común se logra a través de la medición y la observación, pero podemos también utilizar documentos, entrevistas y la participación de quienes están involucrados en el sistema real. Debemos tener en cuenta que el descubrimiento de hechos, es el punto de partida para obtener la información necesaria.

### **5.2.3. Construcción del Modelo.**

Debemos realizar cuatro etapas para convertir nuestro conocimiento del sistema en un modelo matemático.

1. Especificación del propósito del modelo.



## **Optimización de la fertilización agrícola mediante simulación de procesos.**

---

2. Especificación de los componentes que se incluirán en el modelo.
3. Especificación de los parámetros y variables asociados con los componentes.
4. Especificación de las relaciones funcionales entre los componentes, parámetros y variables.

Los Experimentos de simulación se realizan para innumerables propósitos, algunos de los cuales son los siguientes:

1. **Evaluación:** determinar la realización del proyecto del sistema es el mas correcto y apropiado.
2. **Comparación:** con varias políticas o procedimientos operativos propuestos.
3. **Predicción:** Estimación del rendimiento del sistema.
4. **Análisis de sensibilidad:** determinar los factores que afectan el rendimiento del sistema.
5. **Optimización:** Determinar que factores producirán una mejor respuesta.
6. **Relaciones funcionales:** establecer la naturaleza de la relación entre uno o más factores significativos y la respuesta del sistema.

Se debe tener en cuenta que hay mas metas o propósitos que las enunciadas anteriormente, pero estas son las más comunes. Estos propósitos tienen implicaciones significativas para todo el proceso de construcción y experimentación del modelo. Nadie debe construir un modelo, sin tener en mente una meta experimental explícita para luego identificar los componentes pertinentes que contribuyen a la efectividad o ineficiencia de su operación [www25].

### **5.2.4. Modelado de Componentes.**

Cuando modelamos componentes o subsistemas nos interesan tres entidades distintas: la entrada, el sistema, y la respuesta. Esto podemos observar en la *figura 5.3*.



**Figura 5.3.** Sistema Simple

Para modelar este componente debemos conocer o suponer el conocimiento de dos de las tres entidades, dándose algunos casos: 1) Si conocemos las ecuaciones que describen el comportamiento del sistema dinámico, entonces el problema es conseguir las salidas a partir de entradas dadas, esta es la situación más fácil de modelar. 2) Si conocemos las ecuaciones que describen el sistema y necesitamos una salida deseada, el problema es encontrar las salidas necesarias para producir dicha respuesta. Este caso se clasifica en la categoría de *problemas de control*. 3) El problema inverso es mucho más difícil cuando se nos da un conjunto de entradas y salidas correspondientes de un sistema, y tenemos que encontrar una descripción matemática de este. A este problema se conoce como el *problema de identificación de la estructura*.

En general, los componentes del sistema convierten entradas en salidas. Existen tres tipos diferentes, los cuales constituyen los bloques de la estructura básica de los sistemas complejos:

1. **Elementos de transformación**, donde se opera sobre una o más entradas de alguna manera determinada y se transforman en una o más salidas.
2. **Elementos de clasificación**, donde se separan o clasifican una o más entradas en dos o más salidas diferentes.
3. **Elementos de retroalimentación**, donde se modifica la entrada de alguna manera como una función de salida. Esto podemos verlo esquemáticamente en la *figura 5.4*.

El proceso de conversión puede ser determinístico<sup>2</sup> o estocástico<sup>3</sup>. La definición de la estructura del componente depende mucho del conocimiento a priori<sup>4</sup>.

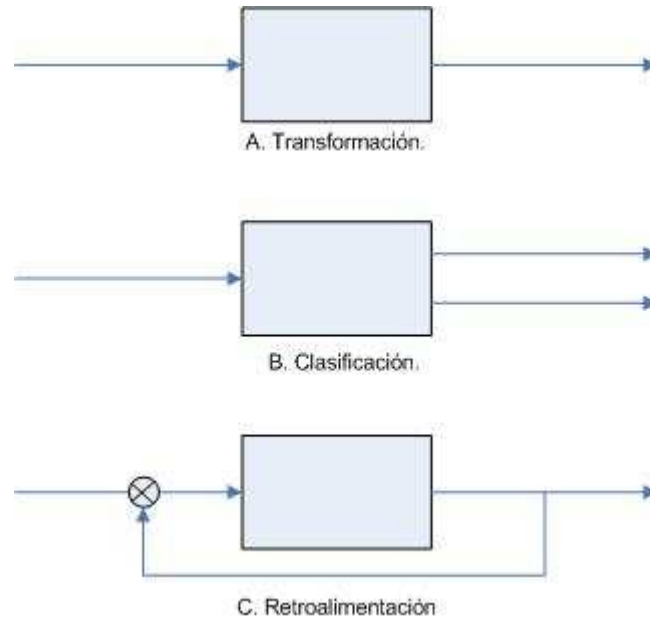


Figura 5.4. Componentes básicos del sistema.

El constructor de modelos comúnmente utiliza algunos patrones o planteamientos como los siguientes:

1. La estructura del sistema se conoce lo suficiente o es tan simple y transparente que puede entenderse con una plática con quienes operan el subsistema.
2. La estructura es análoga con alguna descripción teórica existente.
3. La estructura del sistema se puede extraer mediante un análisis estadístico de los datos.
4. Recurrir a la experimentación.
5. No existe dato alguno y no es posible experimentar directamente sobre el sistema.

En el Anexo A. Se tratan algunas técnicas estadísticas y otras metodologías para determinar las relaciones entre componentes y variables [Lib01].

<sup>2</sup> Determinístico: La salida es determinada por una entrada dada.

<sup>3</sup> Estocástico: indeterminación de salida para una entrada dada.

<sup>4</sup> Priori: Conocimientos independientes de la experiencia.





### 5.3. TENDENCIAS ACTUALES DE LA SIMULACION.

#### 5.3.1. Generadores de simuladores, entornos de simulación y animación gráfica.

Los lenguajes de simulación presentan una serie de limitaciones en lo que se refiere a la comunicación con el usuario, por lo que se propone una metodología donde se incorpore de manera directa los conceptos fundamentales de la teoría de sistemas donde se incluye:

##### **La modelización**

El modelizador debería tener la posibilidad de elegir diversos formalismos de modelización según las características del sistema que pueden ser entre otros continuos y discretos; pudiéndose concebir también modelos de sistemas cuya estructura varíe con el tiempo, es decir habría la posibilidad de especificar cambios controlados por el modelo en su estructura estática y dinámica. Por lo cual la modelización debe constar de:

- *Selección del formalismo de modelización.*
- *Manipulación del modelo.* Descomposición del modelo en sub modelos.
- *Construcción modular del modelo.* Construir macro modelos acoplando e integrando modelos de subsistemas.

##### **Marcos Experimentales**

Posibilidad de su manipulación interactiva.

##### **Programas de Simulación**

Especificación algorítmica de los programas de simulación que permita un tratamiento automático de los pares modelo – marco experimental, lo que supone una especificación del lenguaje de simulación que haga posible:

- Una expresión modular de los modelos y sus acoplamientos e interacciones de acuerdo con los diferentes formalismos de modelización.
- Una especificación modular de los marcos experimentales.



## **Optimización de la fertilización agrícola mediante simulación de procesos.**

---

---

La consecuencia de todos los requisitos y especificaciones mencionados es una metodología de simulación, y un lenguaje que la materialice, lo cual haría posible un proceso de modelización asistida por computador.

### **5.3.2. Simulación Visual Interactiva.**

La simulación visual interactiva puede definirse como aquella que posibilita la creación gráfica de modelos de simulación, permite mostrar por pantalla dinámicamente el sistema simulado, así como la interacción entre el usuario y el programa en ejecución. La interacción implica que la simulación se detiene y solicita información al usuario, o bien que puede parar la simulación a su voluntad e interactuar con el mencionado programa.

Actualmente hay varios paquetes comerciales que incorporan plenamente estos conceptos como por ejemplo: Simfactory, Witness, FACTOR/AIM. Todos estos productos están orientados primordialmente a la utilización de la simulación para la resolución de problemas en el ámbito de la producción [www24].



### **5.4. ALGUNOS MODELOS DE SIMULACION EN AGRICULTURA**

Los llamados modelos de simulación, mediante el uso de computadores, tienen una fundamental aplicación en la agricultura pues constituyen un elemento importante a la hora de tomar decisiones en este campo ya que permiten cuantificar, interpretar y predecir las necesidades de los cultivos, su desarrollo y rendimiento.

Durante tres décadas estos modelos se han venido aplicando en países de clima templado, De acuerdo a informes técnicos, los programas de simulación son capaces de pronosticar los rendimientos agrícolas y contribuir al uso óptimo del agua. Por lo cual citamos algunos modelos de simulación aplicados a la agricultura [www19].

#### **5.4.1. Comportamiento térmico del suelo bajo cubiertas plásticas.**

Se desarrollo un modelo simple para predecir la temperatura del suelo bajo cubiertas plásticas sobre la base de la solución numérica de la ecuación del flujo de calor en el suelo. Para ello se requiere definir las condiciones de borde, que en la superficie son resueltas mediante el balance de radiación y energía. También se considera un coeficiente de reparto de calor y el albedo de la superficie del suelo cubierto con plástico. Este parámetro es variable de acuerdo a la hora del día. Así se determinó la temperatura superficial del suelo, suponiendo que era la misma del plástico.

Para iniciar el proceso de simulación y determinar la temperatura en el perfil del suelo se recurrió a una función periódica que combina la solución analítica y el análisis de Fourier con un número de elementos  $k = 4$ . La temperatura a 30 cm de profundidad se consideró invariable para la escala del modelo y estuvo corroborada experimentalmente. Se elaboró un programa computacional que pudiera operar a diferentes lapsos de tiempo y espaciamientos de profundidad, de acuerdo a la difusividad térmica del suelo. La hipótesis de que el plástico está en contacto directo con el suelo permitió que el modelo produjera resultados



## **Optimización de la fertilización agrícola mediante simulación de procesos.**

---

aceptables al contrastarlo con mediciones reales. Sin embargo, fue forzoso modificar el valor de la emisividad, por lo que se requiere mayor investigación para aclarar este punto [www20].

### **5.4.2. Evaluación del funcionamiento de los sistemas de conducción de agua para riego, usando modelos de simulación dinámica.**

Los modelos de simulación dinámica simulan las características hidráulicas, de operación e hidrológicas de sistemas de conducción de agua al variar el tiempo, en respuesta a los cambios de flujo de entrada o salida del sistema y al variar las condiciones de frontera, internas y externas. Idealmente estos modelos pueden:

- Considerar y/o simular todos los flujos controlados o sin control dentro, hacia y desde el sistema, considerando el rango completo de variación de las características físicas, de operación e hidrológicas del sistema, y usando técnicas normalmente aceptadas en ingeniería hidráulica, de riego e hidrológicas.
- Simular condiciones relevantes de campo.
- Usar teorías y métodos matemáticos verificables.
- Mejorar todos los cálculos, usando técnicas numéricas conservadoras.
- Introducir y obtener toda la información relevante en forma adecuada para el futuro usuario.
- Usar un mínimo de recursos de cómputo.

Los modelos de simulación dinámica dan la oportunidad de:

- Minimizar pérdidas de agua en los sistemas de conducción.
- Minimizar costos de capital y rehabilitación.
- Minimizar costos de administración y de operación.
- Minimizar costos de mantenimiento.
- Ampliar la superficie regable al maximizar la capacidad de la infraestructura existente.



## **Optimización de la fertilización agrícola mediante simulación de procesos.**

---

---

- Mejorar la seguridad en la operación de los sistemas de conducción de agua.
- Evaluar y desarrollar mejores métodos de control (manual o automático del sistema).
- Agilitar los procesos de planeación y diseño.
- Incrementar la productividad agrícola al mejorar la entrega de agua a los productores.
- Dar mayores oportunidades para entrenamiento del personal sobre el funcionamiento y la operación de sistemas de conducción de agua para riego.

Los modelos de simulación dinámica de sistemas de conducción de agua para riego, con las características descritas, existen y continuarán desarrollándose mundialmente [www21].