



Encuentro Internacional de
Educación en Ingeniería ACOF 2014

Nuevos escenarios
en la enseñanza de la ingeniería

Cartagena de Indias, 7 al 10 de octubre de 2014
Centro de Convenciones Cartagena de Indias

COMPLEJIDAD AMBIENTAL EN LA FORMACIÓN DE INGENIEROS AMBIENTALES

Danny W. Ibarra Vega

Universidad Sergio Arboleda
Bogotá, Colombia

Resumen

En este trabajo se pretende mostrar la metodología con la cual se está enseñando la complejidad ambiental en la formación de ingenieros ambientales, desde la perspectiva del modelamiento y simulación de problemas ambientales con la metodología de Dinámica de Sistemas. En dinámica de sistemas, se concibe cualquier aspecto del mundo como la interacción causal entre atributos que lo describen. De esta forma, se construyen representaciones sistémicas con flechas y puntos, denominadas diagramas causales, que capturan todas las hipótesis propuestas por el modelador. Finalmente se construye un sistema de ecuaciones diferenciales que permiten realizar la simulaciones del problema abordado, las cuales permiten visualizar distintos escenarios desde los que se puede aprender del sistema para intervenir sobre el en el ejercicio de decisión.

De este modo, se presenta dos ejemplos de trabajos con Dinámica de Sistemas que se pueden implementar con estudiantes de Ingeniería Ambiental para introducir conceptos y sensibilizarlos con los modelos construidos. Se concluye que la utilización de la Dinámica de Sistemas en la enseñanza para ingenieros ambientales, actúa como pauta que conecta diferentes campos del conocimiento requeridos para la comprensión de la situación ambiental actual del planeta, convirtiéndose así en una herramienta pedagógica para la Ingeniería.

Palabras clave: complejidad ambiental; dinámica de sistemas; modelamiento

Abstract

This paper aims to show the methodology which is teaching environmental complexity in the preparation of environmental engineers from the perspective of modeling and simulation of environmental problems with the methodology of System Dynamics. In System Dynamics, any aspect of the world is conceived as the causal interaction between attributes that describe it. Thus, systemic arrows point representations are constructed, called path diagrams, capturing all the hypotheses proposed by the modeler. Finally a system of differential equations to make the simulations of the problem addressed, which allow to visualize different scenarios from which the system can learn to intervene in the exercise of the decision is built. Thus, two examples of works with system dynamics that can be implemented with students from Environmental Engineering to introduce concepts and sensitize the constructed models are presented. We conclude that the use of system dynamics in education for environmental engineers, acting as pattern which connects different fields of knowledge required for the understanding of the current environmental situation in the world, becoming a pedagogical tool for Engineering.

Keywords: environmental complexity; system dynamics; modeling

1. Introducción

El fenómeno sociológico que se ha denominado popularmente “crisis ambiental”, asociado con fenómenos como el cambio climático, adelgazamiento de la capa de ozono, erosión del suelo, extinción de especies etc., no es otra cosa que una crisis de la racionalidad de nuestra especie (Leff 2002). De esta forma es necesario repensar las herramientas con las que abordamos y comprendemos los problemas. Por ello se hace importante desarrollar en los estudiantes de Ingeniería Ambiental una visión sistémica para no caer en la irracionalidad ambiental.

La complejidad es una característica de los sistemas que puede ser estudiada desde diversas Metodologías. El estudio de los sistemas complejos es el estudio de la dinámica y el poder creativo de las interacciones en un sistema. Es esta la razón por la cual se estudia, en sistemas complejos, las realimentaciones, los equilibrios, la estabilidad (dinámica del sistema), además de las propiedades que la interacción entre las partes hace emerger y que son distintas a las propiedades de las partes (emergencias). El medio ambiente es el ejemplo vivo de un sistema complejo que se auto-produce y que se auto-organiza, basado en retroalimentaciones que, además, le hacen productivo, pues todo en la naturaleza es cíclico (Leff 2004).

Dado el contexto anterior se puede decir que el ingeniero ambiental requiere de herramientas orientadas a la comprensión de las implicaciones de las actuaciones del ser humano, enmarcándose en un riguroso estudio de sistemas complejos. En este trabajo se pretende mostrar la metodología con la cual se está enseñando la complejidad ambiental en la formación de ingenieros ambientales desde la perspectiva del modelamiento y simulación de problemas ambientales con la metodología de dinámica de sistemas.

La Dinámica de Sistemas es una metodología desarrollada por el ingeniero Forrester del Massachusetts Institute Technology (MIT) presentado en sus libros *Industrial Dynamics* y *Urban Dynamics* (Forrester, 1999a, Forrester 1999b).

En dinámica de sistemas, se concibe cualquier aspecto del mundo como la interacción causal entre atributos que lo describen. De esta forma, se construyen representaciones sistémicas con flechas y puntos, denominadas diagramas causales, que capturan todas las hipótesis propuestas por el modelador. Finalmente se construye un sistema de ecuaciones diferenciales que permiten realizar la simulaciones del problema abordado, las cuales permiten visualizar distintos escenarios desde los que se puede aprender del sistema para intervenir sobre el en el ejercicio de decisión (Redondo 2013).

De ahí la importancia de esta asignatura para dotar a nuestros estudiantes de herramientas que les libren del vago juicio de valor que solemos utilizar sobre las decisiones importantes, basándonos en opiniones que provienen de una comprensión que no ha sido sometida a la discusión de pares escenarios posibles, pero también conducir a nuestros estudiantes a la posibilidad de llevar a cabo simulaciones que evitan el odioso enfoque de ensayo y error.

La Dinámica de sistemas en el área ambiental tiene su primer y principal antecedente cuando se aplicó a finales de los 60 en un estudio conocido como límites al crecimiento presentado ante el Club de Roma. El Club de Roma, una asociación privada compuesta principalmente por empresarios, científicos y políticos, designó a un grupo de investigadores del Massachusetts Institute of Technology para realizar esta investigación. Sus resultados fueron la base del primer informe del Club de Roma, en el que se realizaron proyecciones de la población, los recursos disponibles y la contaminación del planeta. El modelo es conocido como el modelo del mundo. Este modelo, tuvo gran incidencia en la opinión pública y fue objeto de múltiples debates, lo cual contribuyó a la difusión de la Dinámica de Sistemas (Aracil y Gordillo 1997).

En el informe al Club de Roma se llegó a la conclusión de que “si la industrialización, la contaminación ambiental, la producción de alimentos y el agotamiento de los recursos mantienen las tendencias actuales de crecimiento de la población mundial, este planeta alcanzará los límites de su crecimiento en el curso de los próximos cien años. El resultado más probable sería un súbito e incontrolable descenso, tanto de la población como de la capacidad industrial” (Meadows, et al. 1972). La siguiente figura presenta los resultados de sus simulaciones:

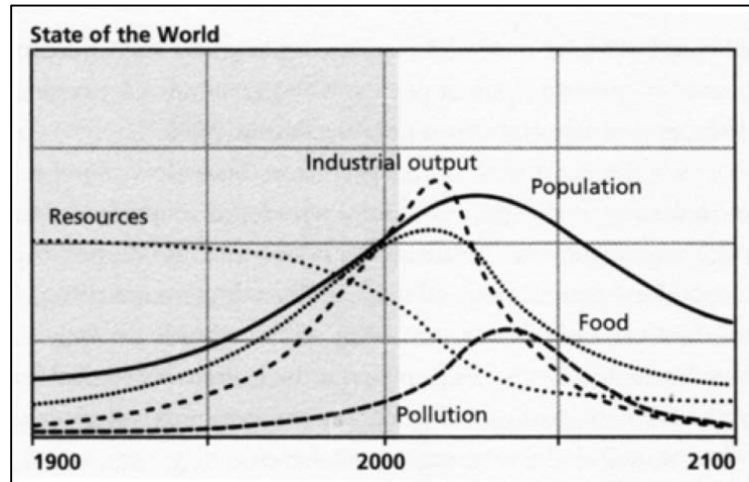


Figura 1. Límites al Crecimiento (1972)

En la figura 1 vemos que una disminución en la tasa de extracción de recursos no renovables por el agotamiento de los mismos, dará lugar a una disminución de la producción mundial de alimentos y de la producción industrial, que a su vez conduciría a la disminución de los niveles de vida para todos.

1.1 La Educación y Dinámica de Sistemas

La educación y la enseñanza usualmente utilizan problemas lineales y estáticos del mundo real. Difícilmente logra mostrar los problemas del mundo que son dinámicos. Forrester en 1992 dice en una publicación sobre educación: "La mente humana toma imágenes, mapas y relaciones estáticas de una manera maravillosamente efectiva" (Forrester, 1992). Pero cuando los sistemas y sus partes interactúan, esa mente humana no es buena para simular y para percibir los cambios a través del tiempo del sistema. Es por esto que la dinámica de sistemas se ha venido utilizando como herramienta pedagógica en diferentes lugares del mundo, ya que ofrece un marco para dar cohesión, significado y motivación a la educación en todos los niveles, desde la educación primaria en adelante (Forrester, 1992).

De igual manera, se han diseñado programas informáticos que permiten la implementación de la Dinámica de Sistemas que han sido la propuesta de inclusión del modelado y simulación en los procesos pedagógicos de la educación básica y media (Andrade y Gómez, 2008). La propuesta que se plantea es utilizar la Dinámica de Sistemas como instrumento para facilitar la integración transversal del currículo, orientándolo al aprendizaje de lo ambiental por medio de la modelización de sus problemas, más no como una nueva asignatura en el currículo.

2. Implementación de Modelos Ambientales

A continuación se presenta algunos ejemplos de modelación utilizando Dinámica de Sistemas en diferentes niveles de profundidad, que fueron construidos en discusiones con estudiantes de Ingeniería Ambiental de la Universidad Sergio Arboleda en la Asignatura de Complejidad Ambiental.

La metodología que se sigue en la construcción de los modelos ambientales que se presentan a continuación es la siguiente: las discusiones inician con una pregunta problema y la posterior identificación de los atributos del sistema que permitirían resolver la pregunta. Se consideran entonces las relaciones causales entre los atributos, teniendo cuidado de que los argumentos que las justifican estén bien conceptualizados. El resultado es el diagrama causal. Acto seguido, se consideran los atributos del diagrama causal como variables de estado, razones de cambio, variables auxiliares y parámetros del sistema (vea una discusión más profunda en Sterman 2000 o Aracil y Gordillo 1997) y se construye el diagrama de niveles y flujos. Con el diagrama de niveles y flujos se discute la expresión matemática que representaría los comportamientos del sistema, teniendo cuidado en el uso de las unidades. Finalmente, se utilizan programas especializados de simulación para visualizar el sistema y sacar algunas conclusiones.

El resultado del ejercicio no apunta a la predicción, sino al aprendizaje del sistema, quedando al descubierto comportamientos del sistema que mejoran la fundamentación ambiental de los estudiantes.

2.1 Emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)

En este ejemplo trata de resolverse la pregunta ¿cuál podría ser un efecto de los programas de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero sobre el cambio climático?

El diagrama causal propuesto para el modelo se presenta la figura 2a y se lee de la siguiente manera: a mayores emisiones de Gases Efecto Invernadero a la atmosfera, habrá un aumento en el calentamiento global. El cual de acuerdo a convenios internacionales como el protocolo de Kioto, incentivará la puesta en marcha de proyectos de reducción de emisiones, de este modo habrá una disminución las emisiones de GEI, pero no será una eliminación de las fuentes de emisiones. Solo representará una disminución de GEI.

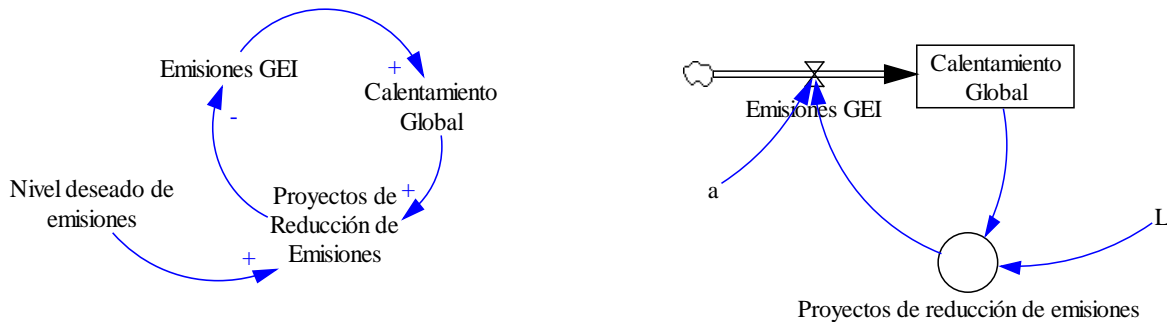


Figura 2. a) Derecha, el diagrama causal. b) Izquierda el diagrama de Niveles y Flujos.

En este sistema se acumula la temperatura, razón por la que hemos tomado el calentamiento global x en términos de temperatura como variable de estado. El calentamiento es producido por las emisiones de GEI que se considera entonces la razón de cambio del sistema. Los proyectos de reducción de emisiones P se tomaron como variable de decisión o variable auxiliar del sistema. Se consideraron los parámetros a y L que corresponden a la tasa de cambio de las emisiones de GEI y a un nivel de referencia de las emisiones, respectivamente. Las relaciones entre las variables se expresan como funciones matemáticas, como se presenta a continuación:

$$\frac{dx}{dt} = \text{Emisiones GEI} \quad (1) \quad \text{Emisiones de GEI} = a/P \quad (2)$$

$$P = L + x \quad (3)$$

Remplazando la ecuación de flujo (1) y la auxiliar (2) en la ecuación de Nivel (3), queda entonces conformada una sola ecuación denominada ecuación de Estado (4), que representará el comportamiento del sistema en el tiempo t .

$$\frac{dx}{dt} = \frac{a}{L+x} \quad (4)$$

A continuación se presentan los resultados de la aplicación del modelo (ver figura 3) que nos muestran a través de la simulación cómo es el comportamiento de las variable de Nivel

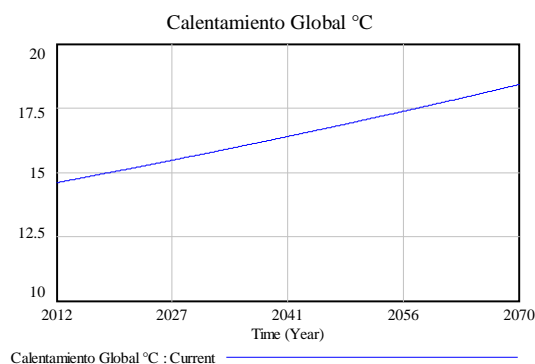


Figura 3. Simulación del Modelo de Cambio Climático

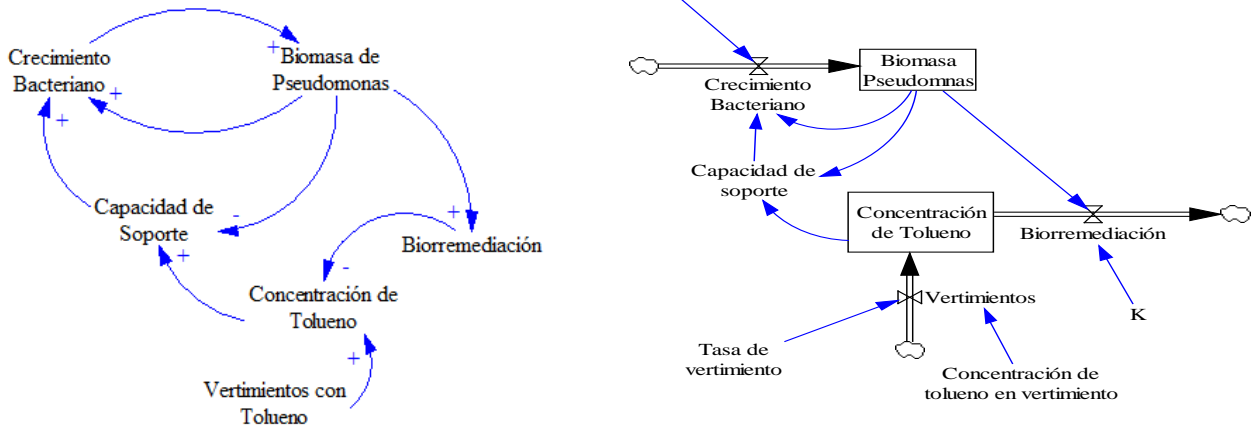
Como discusión vemos que los programas de reducción de emisiones de GEI pueden influenciar la velocidad a la que el planeta se calienta, pero no eliminar los GEI de la atmósfera o detener el calentamiento que estamos sufriendo. Se ve el incremento de la temperatura desde 14,6 °C en 2012 hasta un valor cercano a los 18 °C en 2072. Esto permite sensibilizar al estudiante sobre la necesidad de proponer mecanismos más efectivos que se sumen al esfuerzo de los programas de reducción de emisiones de GEI y considerarlo en un nuevo modelo para evaluar sus implicaciones.

Este ejemplo le permite al estudiante evidenciar que el problema ambiental global requiere de múltiples acciones y no solamente de la transformación tecnológica propuesta por los programas de reducción de emisiones de GEI.

2.2 Biorremediación

La pregunta problema en este modelo fue ¿Es posible representar la biorremediación de tolueno? El diagrama causal propuesto para el modelo se presenta en la figura xx. Y se lee de la siguiente manera: Para la biorremediación de suelos contaminados por tolueno principalmente se utilizarán la *Pseudomonas spp.* Presente en la biomasa que va a aumentar la actividad microbiana para la degradación del contaminante por medio de ruta metabólica (Castillo, et al. 2005). Esta dependerá de una capacidad de soporte que posea el suelo para poder realizar la biorremediación según la el crecimiento de la biomasa en los suelos contaminados.

Figura 4. a) Derecha, el diagrama causal. b) Izquierda el diagrama de Niveles y Flujos.



En este sistema se acumula la biomasa de *Pseudomonas spp.*, Razón por la cual la tomamos como variable de nivel Y en términos de concentración g/l. El crecimiento bacteriano es influenciado por la tasa de crecimiento *u*. De igual manera la concentración de Tolueno también es tomada como otra variable de nivel denominada X. Del diagrama de niveles y flujos se puede deducir las siguientes ecuaciones para la simulación.

$$\frac{dY}{dt} = \text{Crecimiento Bacteriano} \quad (5) \quad \text{Crecimiento} = u * Y * \text{Capacidad de Soporte} \quad (6)$$

$$\frac{dx}{dt} = \text{Vertimientos} - \text{Biorremediación} \quad (7) \quad \text{Biorremediación} = K * Y \quad (8)$$

$$\text{Vertimientos (V)} = \text{Tasa Vertimiento} * \text{Concentración en Vertimientos} \quad (9)$$

Ecuación de la capacidad de soporte (α)¹

$$\alpha = f(x, y) = 1 - \frac{y}{x}$$

A continuación se presentan los resultados de la aplicación del modelo (ver figura 5) que nos muestran a través de la simulación cómo es el comportamiento de las variable de Nivel Biomasa de *Pseudomonas* (Y) y Concentración de Tolueno (X).

¹ Esta es una función que depende tanto de del nivel Y como del nivel X por lo tanto

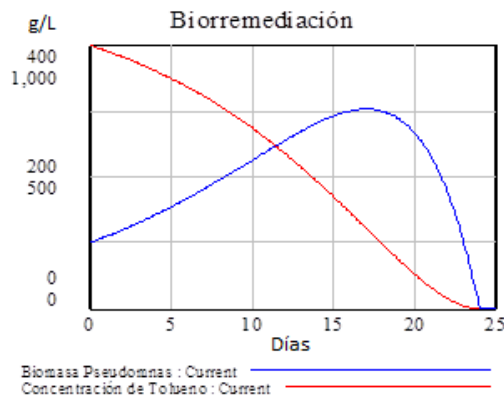


Figura 5. Simulación del Modelo de Biorremediación

De acuerdo a la Figura 5 se puede discutir que en un rango de tiempo aproximadamente entre 24 y 25 días se podrá encontrar la biodegradación completa del tolueno en los suelos contaminados por medio de una tasa diaria de biorremediación de 0.2 con a un vertimiento en concentración de 1 g/l. La concentración de tolueno disminuye mientras que las bacterias crecen de manera exponencial. La biomasa al no tener más fuente de alimento decaen completamente al mismo tiempo que se degrada el tolueno.

Este ejemplo le permite al estudiante entender la dinámica de la biorremediación de suelos contaminados, y evidencia que es necesario tener en cuenta la capacidad de soporte del sustrato al que van a degradar los microorganismos.

3. Conclusiones

Se concluye que la utilización de la Dinámica de Sistemas en la enseñanza de conceptos ambientales, actúa como pauta que conecta diferentes campos del conocimiento requeridos para la comprensión de la situación ambiental actual del planeta, convirtiéndose así en una herramienta muy útil para la ingeniería.

Estos modelos desarrollados en el marco de una actividad académica, aportan y procuran el mejoramiento de la calidad de la educación en ingenieros ambientales, ya que estos recrean y simulan comportamientos de interés en el desarrollo curricular de la ingeniería, buscando darle una mayor rigurosidad en términos de conocimiento al componente ambiental que debe ser interdisciplinar.

4. Referencias

- Andrade, H., Maestre, G., López, G., (2008), La lúdica y las redes humanas como estrategia para promover la sostenibilidad de la incorporación de la dinámica de sistemas en las escuelas colombianas. Sexto encuentro Colombiano de Dinámica de Sistemas.
- Aracil Javier, Gordillo Francisco (1997). Dinámica de Sistemas, Alianza Editorial S.A. Madrid.
- Leff, E. (2002). Hacia una pedagogía de la complejidad ambiental II. Del mundo complejo al pensamiento complejo.
- Leff, E. (2004). Racionalidad Ambiental. La reapropiación social de la naturaleza. México: Siglo XXI editores.
- Aracil Javier, Gordillo Francisco (1997). Dinámica de Sistemas, Alianza Editorial S.A. Madrid.
- Forrester, (1992) J La Dinámica de Sistemas y el Aprendizaje del Alumno en la educación escolar. Proyecto Educativo Dinámica de Sistemas Grupo de Dinámica de Sistemas Escuela de Administración Massachusetts Institute of Technology
- Forrester, J. (1999a). Industrial Dynamics. Pegasus Communications, Inc. Waltham.
- Forrester, J. (1999b). Urban Dynamics. Pegasus Communications, Inc. Waltham.
- Meadows, D.H.; Meadows, D.L.; Randers, J; Behrens, W. (1972). Los límites del crecimiento: informe al Club de Roma sobre el predicamento de la Humanidad. Fondo de Cultura Económica

- Redondo J.M. (2012) Modelado de Mercados de Electricidad. Tesis Doctoral, Ingeniería Automática Universidad Nacional de Colombia, Manizales.

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.

Copyright © 2014 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)