

MODELAMIENTO INICIAL DE CIUDADES DE PAISES EN VIA DE DESARROLLO, UTILIZANDO DINÁMICA DE SISTEMAS

RESUMEN

El propósito de este estudio es identificar los beneficios reales ofrecidos por las técnicas de modelamiento y simulación (Autómatas Celulares y Dinámica de Sistemas) en el mejoramiento de la planificación y toma de decisiones de los gobiernos de los países en vías de desarrollo respecto del crecimiento de sus ciudades. Para ello se analiza el caso específico en la ciudad de Pamplona (Colombia), una ciudad que ha experimentado un crecimiento importante en su población debido a circunstancias particulares, influenciada por las nociones de desarrollo implícitas en los modelos de crecimiento en general y las ideas de sus propios gobiernos.

PALABRAS CLAVES: Modelamiento, Simulación, Crecimiento Urbano, Dinámica de Sistemas, Autómatas Celulares, Dinámica Urbana.

ABSTRACT

The purpose of this study is to identify the real benefits offered by simulation and modelation techniques (Cellular Automata and System Dynamics), in the improvement of developing government's planning and decision making regarding their cities' expansion. To this effect the specific case of Pamplona city (Colombia) is analyzed, a city which has experienced important growth in its population due to particular circumstances, influenced by the development notions implicit in growth models in general and their own government's development ideals.

KEYWORDS: Modelation, Simulation, Urban Growth, System Dynamics, Cellular Automata, Urban Dynamics.

1. INTRODUCCIÓN

El modelamiento del crecimiento de las ciudades para planificar su desarrollo es una actividad bastante común y ampliamente aplicada a ciudades de países desarrollados, sin embargo, para los países en vías de desarrollo la utilización de este tipo de técnicas es algo relativamente novedoso. La planificación del crecimiento de las ciudades en los países latinoamericanos ha seguido una tendencia artesanal, desde el punto de vista de la utilización de las ventajas tecnológicas de las ciencias computacionales.

Una de las características más notorias respecto del crecimiento de las ciudades de los países en vías de desarrollo es que este es desordenado, inadecuadamente planificado y caótico, influenciado en gran medida por las circunstancias que definen la cultura de estos países. El crecimiento desordenado en una ciudad dificulta su planificación y puede con mucha facilidad convertirse en un gran inconveniente para el mismo desarrollo, visto este último como el proceso que lleva a la consecución de bienestar social para toda una comunidad, donde dicho bienestar, definido tácitamente por la misma comunidad, no tiene que ver solo con el componente económico sino

que además debe tener en cuenta los componentes cultural y social.

La investigación que aquí se presenta se concibe como una aproximación a una alternativa de apoyo a la gestión administrativa en los procesos de crecimiento poblacional y desarrollo económico de las ciudades colombianas, dentro de las cuales Pamplona vive actualmente una dinámica económica, social y política bastante compleja, interrelacionada y cambiante. Se enfoca a la representación de problemáticas tales como: orden público, aumento del costo de vida, hacinamiento en algunos sectores de la ciudad, aumento de las diferencias en la calidad de vida de los diversos sectores de la ciudad, desmejoramiento de la cobertura y calidad de los servicios públicos domiciliarios, incremento en las condiciones que afectan negativamente la salud pública, entre otras.

A partir de las proyecciones realizadas por el DANE a partir del censo de 1993 y teniendo en cuenta la planificación realizada a nivel local por la Alcaldía Municipal en su PBOT (Plan Básico de Ordenamiento Territorial) y por la Universidad de Pamplona en sus Planes de Desarrollo y Educativo Institucional, los investigadores a cargo del proyecto como docentes de dicha Universidad, gracias al ambiente en el cual se desarrollan laboralmente manejan información

LEONARDO JOSÉ RUEDA

Ingeniero de Sistemas. MCC (c)
Desarrollo de Sistemas de
Información y Desarrollo Web
SOFICOL S.A
lrueda@soficol.com,
ljruedam@yahoo.com

DEWAR WILLMER RICO

Ingeniero de Sistemas. MCC (c)
Docente Tiempo Completo
Ocasional
Universidad de Pamplona
dewarrico@unipamplona.edu.co,
ing_dewar@yahoo.com

concerniente a la problemática antes planteada, queriendo aproximarse a una alternativa de solución por medio de esta propuesta y adicionalmente explorando las posibilidades que las ciencias computacionales ofrecen para las soluciones de dichas problemáticas.

La investigación es una aplicación de las teorías de Modelamiento y Simulación basadas en Automatas Celulares y Dinámica de Sistemas que constituyen toda una metodología para la representación y análisis de sistemas. Se plantea a largo plazo analizar la forma en que una integración de los paradigmas antes nombrados puede facilitar el modelamiento de la dinámica urbana de una ciudad en crecimiento, así como también plantear una metodología de integración.

Este informe presenta los avances realizados en la investigación durante los primeros 8 meses de su desarrollo detallando los adelantos obtenidos en el reconocimiento del estado del arte, la definición adecuada de la investigación y la proyección de las tareas a realizar para la consecución de los objetivos planteados.

2. RESULTADOS

Las tareas llevadas a cabo hasta el momento respecto del desarrollo de la investigación abarcaron sobre todo la contextualización del problema, desde el punto de vista teórico y social; es así como se cubrieron los primeros objetivos que dan cuenta de la apropiación conceptual de la problemática en cuestión a partir de la construcción del estado del arte.

2.1 Avances en el marco conceptual

Los conceptos que facilitarán el desarrollo efectivo de las técnicas de Simulación son los referentes a los Automatas Celulares en convergencia con las teorías de Dinámica de Sistemas que van a permitir la construcción de un marco integrador tanto de los conceptos a tener en cuenta como de la diversidad y complejidad de las características a representar en el modelo de simulación.

El estudio sobre los aspectos que condicionan el desarrollo urbano y su modelamiento utilizando medios computacionales no es nuevo, al ser una problemática que afecta a toda ciudad indistintamente de su grado de desarrollo, los trabajos en esta área son numerosos. Estos trabajos han tomado como ruta el análisis de un solo paradigma y no se ha evaluado la posibilidad de integración entre ellos.

Se identificaron las fuentes primarias y los avances más significativos y actuales en las principales áreas del conocimiento requerido para el desarrollo de la investigación como son Simulación, Automatas Celulares y Dinámica de Sistemas.

2.1.1 Simulación

La Simulación se puede entender como el proceso de suministrar datos a un modelo, que representa cierto sistema que se quiere estudiar, activar los procedimientos para que el modelo procese dichos datos y luego de obtenidas las respuestas generadas, analizar el comportamiento que pueda tener el sistema cuando se lleven a cabo las acciones que corresponden a los datos entregados inicialmente. Las principales definiciones que delimitan el campo de acción en esta área son:

- “Imitación de la experimentación en el mundo real, puede verse como experimentación virtual, que permite contestar preguntas sobre (el comportamiento de) un sistema.”¹
- “Un proceso firmemente acoplado y reiterativo de tres componentes, conformado por 1) el diseño del modelo, 2) la ejecución del modelo y 3) el análisis de la ejecución.”²
- “X simula Y es verdad si, y sólo si, (a) X y Y son sistemas formales, (b) Y se toma como el sistema real, (c) X se toma como una aproximación al sistema real y (d) las reglas de validez en X están libres de error.”³

Al tratar el concepto de Simulación no se puede dejar de lado el de Modelamiento, ya que la primera sólo es posible gracias a la definición anterior de un modelo para el sistema a simular. Es tal la fuerza de la relación entre los conceptos de Modelamiento y Simulación que comúnmente se define al Modelamiento como una de las fases dentro de un proceso de Simulación, esto puede justificarse debido a la gran popularidad que a tenido la Simulación en la solución de problemas complejos; pero contrario a lo que se puede pensar no todos los modelos que se construyen tienen como fin la simulación de un sistema.

Primordialmente, un Modelo es la representación de la realidad de un fenómeno o sistema con cierto grado de abstracción; la abstracción en este caso cumple dos funciones, la primera facilitar o simplificar la construcción del modelo ya que tratar de incluir todos los aspectos de la realidad en un modelo sería imposible dada la gran cantidad de matices que ella presenta, la

¹ [1] ZEIGLER, Bernard P. Theory of Modelling and Simulation. Wiley & Sons. New York. 1976.

² [2] FISHWICK, Paul A. Simulation Model Design. Proceedings of the 1995 Winter Simulation Conference ed. C. Alexopoulos, K. Kang, W. R. Lilegdon, and D. Goldsman. 1995. p 209.

³ [3] CHURCHMAN, C. West. An analysis of the concept of simulation. A. C. Hoggatt, F. E. Balderston, eds. Symposium on Simulation Models. South-Western Publishing Co. Cincinnati, OH. 1963.

segunda generalizar el modelo dado que permite reconocer patrones estructurales del sistema o fenómeno que pueden no ser detectables a simple vista y que se pueden extrapolar a otros modelos. Otras definiciones de Modelo son:

- “Una representación hipotética, abstracta de las propiedades de un objeto, en particular su comportamiento, que es válida en todos los posibles contextos y describe todas las facetas del objeto. Un modelo (base) es hipotético ya que nunca seremos capaces -en la práctica- de construir o representar a dicho modelo “total”.”⁴
- “Dado un sistema $S(t)$ que evoluciona en el tiempo, un modelo puede ser visto simplemente como una aproximación $M(t)$ a $S(t)$.”⁵
- “Una representación simplificada de un sistema real o un proceso o una teoría, con el que se pretende aumentar su comprensión, hacer predicciones y, posiblemente, ayudar a controlar el sistema.”⁶

De otro lado, aunque la Simulación no requiera estrictamente del uso del computador es innegable que los avances en el área de las Ciencias Computacionales han tenido mucho que ver en el desarrollo acelerado de las técnicas de Simulación, facilitando el análisis y posibilitando el incremento de las variables a tener en cuenta.

De esta forma se configura una trilogía que impulsa el análisis de sistemas complejos conformada por Sistema, Modelo y Computadora; el proceso de Modelamiento relaciona al Sistema con el Modelo dado que consiste en la representación de la realidad del sistema o fenómeno utilizando algún tipo de lenguaje que configura una estructura o modelo, la Simulación permite la utilización del modelo al ser este procesado por la computadora, lo que entrega unos resultados que pueden ser estudiados.

Las fases de un proceso de Simulación permiten prever que la construcción de un modelo no es una técnica infalible, sino que por el contrario presenta gran diversidad de aspectos que pueden obstaculizar la consecución de un buen modelo, dado que el proceso parte de las concepciones de quien lo construye y va evolucionando a través de estas aproximándose poco a poco a la concepción del sistema real. Esta última concepción deberá estar definida dentro de un Marco

Experimental, el cual dará consistencia al modelo y delimitará el nivel de abstracción con que se asumirá su construcción. Solo la continua y exhaustiva verificación y validación del modelo garantizará sus resultados.

Además el nivel de detalle deseado para un modelo influye en su consecución, existirán modelos ambiciosos que requieran un gran refinamiento para que sus resultados sean aceptables en gran medida, estos modelos constituirán la mayoría; pueden también existir otros que no sean tan exhaustivos, estos tendrán aplicaciones más que todo didácticas que faciliten al principiante en modelamiento un acercamiento a la metodología estudiada.

2.1.2 Autómatas Celulares

La investigación en el tema de los Autómatas Celulares, “propuestos originalmente por John von Neumann como modelos formales de organismos auto-reproducibles”⁷, se inicia en los años 60, cuando se presentaron grandes avances en diversas áreas del conocimiento como las ciencias computacionales, la matemática, la física, entre otras. De acuerdo al devenir histórico, en lo referente a los Autómatas Celulares se pueden vislumbrar tres períodos importantes relacionados igualmente con tres investigadores: John von Neumann, John Horton Conway y Stephen Wolfram, sin embargo, es justo aclarar que “se han dado importantes aportaciones entre estos períodos... que han contribuido de manera relevante al estudio de dicha teoría”⁸.

Los Autómatas Celulares constituyen una metodología alternativa de apoyo y complemento a la simulación, ya que han sido implementados mostrando ventajas en los siguientes aspectos:

- Simplicidad relativa en su definición. Los Autómatas Celulares poseen cuatro componentes básicos: “células, estados, vecindad y reglas de transición”⁹ y se presentan como una estructura interconectada de autómatas más sencillos (células), al estilo de una red neuronal. Cada célula procesa sus entradas, actualizando en el proceso su estado según una regla de transición y generando una salida para otra célula. Esto permite deducir inicialmente que la complejidad de una autómatas celular puede reducirse a la definición de diversas características para cada célula y de sus interacciones con las demás. Además la ecuación general tiene el mismo principio de las ecuaciones en diferencias de la Dinámica de Sistemas donde las ecuaciones de nivel se definen

⁴ [4] ZEIGLER, Bernard P. Theory of Modelling and Simulation. Wiley & Sons. New York. 1976.

⁵ [5] FISHWICK, Paul A. Simulation Model Design. Proceedings of the 1995 Winter Simulation Conference ed. C. Alexopoulos, K. Kang, W. R. Lilegdon, and D. Goldsman. 1995. p 209.

⁶ [6] RÍOS INSUA, David; Ríos, Sixto; Martín, Jacinto. Simulación, Métodos y Aplicaciones. p 109.

⁷ [7] SARKAR, Palash. A Brief History of Cellular Automata. ACM Computing Surveys, v 32. 2000. p 80.

⁸ [8] JUÁREZ MARTÍNEZ, Genaro; Grados de Reversibilidad en Autómatas Celulares Lineales: UNAM. México. 1998. p 2.

⁹ [9] BATTY, M.; Couclelis, H.; Eichen, M. Urban systems as cellular automata: Environment and Planning B, v.24, n.2. 1997. p.159-164.

$$\text{nivel}(t) = \text{nivel}(t - \Delta t) + \text{flujo_neto} * \Delta t.$$

- Facilidad en el manejo de un enfoque discreto. Los sistemas complejos utilizan, en su mayoría, una definición a partir de ecuaciones diferenciales no lineales, esto puede dificultar enormemente su implementación y resolución, en contraposición a esto “los autómatas celulares manejan un enfoque discreto y de fácil codificación para su solución numérica”¹⁰ al definir su estructura de funcionamiento básica a partir de estados que van cambiando en espacios discretos de tiempo y que además se basan en el cálculo recursivo, es decir, para ellos se cumple que $\text{estado}(t) = f(\text{estado}(t - 1))$, donde $f(x)$ es la función de transición de estado.
- Capacidad evolutiva. En un entorno de aplicación específico un autómata celular está en constante interacción con otros, este intercambio de información y su estructura de comportamiento, especificada por la función de transición, posibilitan la metamorfosis evolutiva de los Autómatas Celulares, haciendo que sean una alternativa viable cuando se pretende simular sistemas que no obedece a reglas estrictas, infalibles y estáticas como son las de la vida y las del desarrollo de las ciudades, que corresponden más bien a la representación de fenómenos probabilísticos y cambiantes.
- Representación conveniente. La forma en que los Autómatas Celulares representan la realidad los hace muy adecuados para la simulación de comportamientos urbanos, por ejemplo se pueden mostrar los asentamientos humanos de una ciudad por medio de uno de ellos donde el color de una celda represente la densidad poblacional (ver Figura 1).

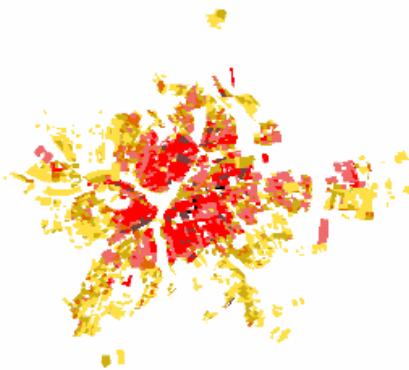


Figura 1. Densidad ocupacional ciudad de Bauru (1979)¹¹

2.1.3 Dinámica de Sistemas

La Dinámica de Sistemas es una metodología de modelamiento y análisis de sistemas complejos en los que juega un papel importante la realimentación, fue definida inicialmente por Jay Forrester (1961) y aplicada al estudio de los comportamientos industriales, de allí que fuera bautizada en principio como “Dinámica Industrial”¹².

Más que una metodología se puede decir que la Dinámica de Sistemas conforma la implementación de una forma de pensamiento denominado Sistémico, que pretende ver el mundo como un todo donde cada cosa posee un conjunto de partes y un juego de relaciones entre las mismas que definen la estructura del sistema y que, por otro lado, también caracterizan un comportamiento particular del mismo.

Tal como lo indica Aracil (1995) “la metodología sistémica pretende aportar instrumentos con los que estudiar aquellos problemas que resultan de las interacciones que se producen en el seno de un sistema, y no de disfunciones de las partes consideradas aisladamente”¹³, lo que constituye la principal diferencia respecto de la metodología reduccionista que como su nombre lo indica separa o reduce los componentes del sistema para realizar su análisis.

La ventaja ofrecida por la Dinámica de Sistemas en la simulación de cualquier problemática es que busca llegar hasta la esencia estructural de la misma, para ello modifica el punto de vista con el que tradicionalmente se aborda el análisis. En lugar de descomponer el sistema a estudiar para analizar cada parte por separado y tratar de explicarlo solo en función de los efectos o consecuencias generadas en un determinado momento del tiempo, adoptando una visión superficial del mismo; o de examinar los comportamientos llevados a cabo históricamente por el sistema para establecer una tendencia de funcionamiento, el enfoque dinámico-sistémico trata de establecer una estructura causal cuyo desempeño sea en alto grado similar al comportamiento del sistema estudiado, dicha estructura causal estará expresada en un modelo donde se especificarán también con cierto grado de detalle la mayoría de los componentes del sistema y la forma en que estos se influyen unos a otros cíclicamente a través del tiempo.

La construcción de un modelo en Dinámica de Sistemas es un proceso iterativo que va realizando sucesivas aproximaciones a la realidad que se quiere modelar, por lo tanto requiere un gran conocimiento del modelista

¹⁰ [10] AGUILERA ONTIVEROS, Antonio; Cirelli, Claudia; Capdeville G., Rubén. Desarrollo de Modelos de Dinámica Urbana basados en Autómatas Celulares. México. 1998. p 5.

¹¹ [11] Tomado de ALMEIDA, Claudia; Vieira M, Miguel; Câmara, Gilberto. Modelos de Dinámica Urbana. XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Belo Horizonte. 2003. p 20.

¹² [12] FORRESTER, Jay. Industrial Dynamics. Portland: Productivity Press. 1961.

¹³ [13] ARACIL, Javier. Dinámica de Sistemas. Madrid: ISDEFE. 1995. p 11.

tanto de la metodología como del problema a modelar; las fases de dicho proceso son:

- Definición del problema.
- Conceptualización.
- Formalización.
- Comportamiento.
- Evaluación.
- Explotación.

Este proceso no es secuencial, por el contrario requiere una continua evaluación y redefinición de cada paso, teniendo que regresar a pasos anteriores para refinar cada una de las acciones tomadas para la consecución del modelo.

2.2 Avances en el desarrollo metodológico

Se desarrolló la concepción de los principales paradigmas que cubren el espectro teórico de la investigación y la recolección de los datos que caracterizan el crecimiento de Pamplona, se está conformando la idea de desarrollo aplicable al entorno de las ciudades de países en vías de desarrollo y específicamente de las ciudades colombianas, y se inició la conceptualización del Modelo Dinámico Sistémico que caracteriza a la ciudad.

Dicho modelo se presenta a continuación:

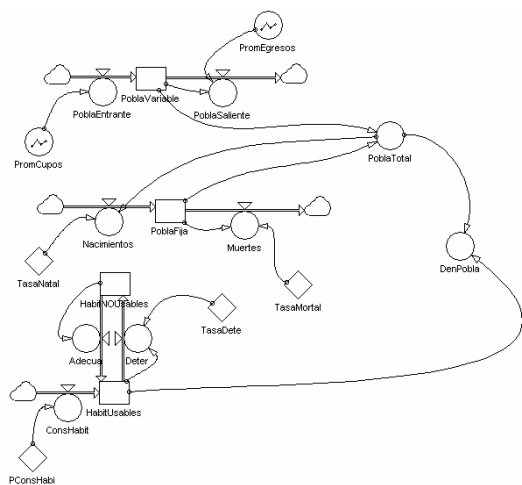


Figura 2. Modelo Dinámico Sistémico

El anterior modelo cubre solo la visión Dinámica Sistémica tocando los aspectos de población y disponibilidad de habitación en la ciudad donde las variables principales son población total y densidad de población. El componente relacionado con el análisis desde la óptica de los Autómatas celulares dará cuenta de un modelo más robusto y conciso, se plantea que este paradigma cubra los aspectos de servicios públicos y transporte.

2.3 Logros en relación con los objetivos

Se cubrieron en esta primera fase los siguientes objetivos:

- Documentar las características relevantes de la ciudad de Pamplona, la noción de desarrollo de sus administradores y los conceptos relacionados con su Plan Básico de Ordenamiento Territorial.
- Identificar los aportes de las siguientes disciplinas: Dinámica de Sistemas, Simulación de Sistemas Dinámicos Espaciales, Autómatas Celulares y Vida Artificial, que puedan ser útiles para modelar las problemáticas presentadas en la ciudad.
- Clasificar la información recolectada tanto de los conceptos como de la caracterización de la ciudad para establecer las variables a tener en cuenta en el diseño del Modelo Conceptual y posteriormente en la aplicación con fines de simulación.
- Especificar el Modelo Conceptual que caracterice el comportamiento de la ciudad de Pamplona a partir de ciertas variables que representen la dinámica urbana dada (cubierto parcialmente).

2.4 Dificultades

Las principales dificultades encontradas hasta el momento tienen que ver con la apropiación de las temáticas a abordar desde las Ciencias Computacionales, de igual forma la delimitación del alcance de la investigación junto con la definición clara de la idea de Desarrollo aplicable a la ciudad de Pamplona.

2.5 Actividades pendientes

- Refinamiento e implementación del modelo conceptual resultado de la investigación y validación del mismo.

3. CONCLUSIONES

El análisis y la planificación del crecimiento en las ciudades es una tarea compleja que puede ser mejorada por medio del uso de la tecnología ofrecida por las Ciencias Computacionales

Es necesario definir claramente todos los preconceptos que sobre el desarrollo urbano se tengan al momento de definir un modelo para simular dicho comportamiento.

La simulación constituye una ventaja para los procesos de toma de decisiones ya que permiten visualizar comportamientos complejos fruto de dicho proceso.

Es muy importante mantener una posición abierta respecto del conocimiento requerido para la conformación de un modelo de simulación, en pro del enfoque sistémico que dicho modelo debe tener.

4. BIBLIOGRAFÍA

- [1] ZEIGLER, Bernard P. Theory of Modelling and Simulation. Wiley & Sons. New York. 1976.
- [2] FISHWICK, Paul A. Simulation Model Design. Proceedings of the 1995 Winter Simulation Conference ed. C. Alexopoulos, K. Kang, W. R. Lilegdon, and D. Goldsman. 1995. p 209.
- [3] CHURCHMAN, C. West. An analysis of the concept of simulation. A. C. Hoggatt, F. E. Balderston, eds. Symposium on Simulation Models. South-Western Publishing Co. Cincinnati, OH. 1963.
- [4] ZEIGLER, Bernard P. Theory of Modelling and Simulation. Wiley & Sons. New York. 1976.
- [5] FISHWICK, Paul A. Simulation Model Design. Proceedings of the 1995 Winter Simulation Conference ed. C. Alexopoulos, K. Kang, W. R. Lilegdon, and D. Goldsman. 1995. p 209.
- [6] RÍOS INSUA, David; Ríos, Sixto; Martín, Jacinto. Simulación, Métodos y Aplicaciones. p 109.
- [7] SARKAR, Palash. A Brief History of Cellular Automata. ACM Computing Surveys, v 32. 2000. p 80.
- [8] JUÁREZ MARTÍNEZ, Genaro; Grados de Reversibilidad en Autómatas Celulares Lineales: UNAM. México. 1998. p 2.
- [9] BATTY, M.; Couclelis, H.; Eichen, M. Urban systems as cellular automata: Environment and Planning B, v.24, n.2. 1997. p.159-164.
- [10] AGUILERA ONTIVEROS, Antonio; Cirelli, Claudia; Capdeville G., Rubén. Desarrollo de Modelos de Dinámica Urbana basados en Autómatas Celulares. México. 1998. p 5.
- [11] Tomado de ALMEIDA, Claudia; Vieira M, Miguel; Câmara, Gilberto. Modelos de Dinámica Urbana. XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Belo Horizonte. 2003. p 20.
- [12] FORRESTER, Jay. Industrial Dynamics. Portland: Productivity Press. 1961.
- [13] ARACIL, Javier. Dinámica de Sistemas. Madrid: ISDEFE. 1995. p 11.