

## APPLICATION OF THE SYSTEM DYNAMICS METHODOLOGY FOR MODELING AND SIMULATION OF THE GREENHOUSE GAS EMISSIONS (GGE) IN CARTAGENA DE INDIAS (COLOMBIA).

Ángel Mena-Nieto<sup>P</sup> Carlos Meñaca-Guerrero; Antonio Barrero-Romero de la Osa; Manuel Bellido-Odriozola.

*Universidad de Huelva*

### Abstract

This communication shows the first results of the application of the System Dynamics methodology for the modeling and simulation of greenhouse gas emissions (GGE), especially carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) in the district of Cartagena de Indias (Colombia). In the developed model, the key variables responsible for emissions of greenhouse gases have been identified, as well as the representative variables of the identity KAYA (energy intensity, Gross Domestic Product-GDP, energy consumption and population) are considered. The tool used for simulation has been VENSIM, software widely used in System Dynamics.

Based on historical data, the results of the simulations in different scenarios, from a baseline scenario, show that CO<sub>2</sub> emissions present a trend of gradual increase over time, a very serious situation which would require special attention by both the environmental and urban planning authorities, establishing proactive environmental policies and strategies that will stabilize this growth. The Systems Dynamic modeling can become a very powerful and cheap tool that allows the improvement of their decision making.

**Keywords:** *System Dynamics, carbon dioxide, greenhouse gases, models, simulation, KAYA identity, Cartagena de Indias.*

### Resumen

En esta comunicación se presentan los primeros resultados de la aplicación de la Dinámica de Sistemas al modelado y simulación de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), en especial, dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en la provincia de Cartagena de Indias (Colombia). En el modelo desarrollado, se han identificado las principales variables responsables de dichas emisiones, así como las variables representativas de la identidad KAYA (intensidad energética, producto interno bruto, consumo energético y población). La herramienta utilizada para la simulación ha sido VENSIM, software muy utilizado en Dinámica de Sistemas.

Tomando como base datos históricos, los resultados obtenidos en las simulaciones en diferentes escenarios, a partir de un escenario base, muestran que las emisiones de CO<sub>2</sub> presentan una tendencia de crecimiento progresivo en el tiempo, situación que requeriría una atención especial por parte de las autoridades ambientales y de planificación urbanística, estableciendo estrategias y políticas medioambientales proactivas que mitigarán dicho crecimiento, apoyándose en la Dinámica de Sistemas para mejorar su toma de decisiones.

**Palabras clave:** *Dinámica de Sistemas, emisiones de dióxido de carbono, gases de efecto invernadero, modelos, simulación, identidad KAYA, Cartagena de Indias.*

## 1. Introducción

Existe una eminente preocupación por el paulatino calentamiento que se está presentando en la atmósfera y en la superficie de la tierra como consecuencia de las emisiones de gases de efecto invernadero provenientes de actividades antropogénicas, afectando al equilibrio natural del sistema climático.

En respuesta a esta necesidad, se planteó el análisis de la evolución del comportamiento de las emisiones de CO<sub>2</sub> en la ciudad de Cartagena aplicando la identidad de Kaya y utilizando la herramienta de la dinámica de sistemas, para entender y explicar la evolución las emisiones de CO<sub>2</sub> en el tiempo. Al mismo tiempo, se intentaba encontrar las principales razones de dicha evolución, con la finalidad de concienciar a la sociedad de la necesidad de implementar y apoyar políticas nacionales y regionales, en aras a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

## 2. El Distrito de Cartagena de Indias

En 1985, el Distrito Cultural y Turístico de Cartagena de Indias fue declarado patrimonio cultural de la humanidad por la UNESCO [1]. Tiene una extensión de 609.1 Km<sup>2</sup>, de los que 551.1 Km<sup>2</sup>, (el 91.14% del territorio), corresponden al área rural y los restantes 54 Km<sup>2</sup> (equivalentes al 8.86 %), conforman el área urbana. Por el contrario, el 8% de su población está en el área rural, mientras que 92% restante se localiza en el área urbana.

### 2.1 Localización y condiciones geográficas.

El Distrito de Cartagena de Indias está localizado al Norte de Colombia, sobre el Mar Caribe dentro de las coordenadas 10° 26' de latitud Norte y 75° 33' de longitud Oeste, como se aprecia en las figuras 1 y 2 respectivamente. Con una temperatura promedio anual de 28°C, una humedad relativa del 90% y una precipitación media anual de 1100 mm, es la capital del Departamento de Bolívar y se encuentra a una distancia de 1204 Km de Bogotá [1].

El territorio Distrital está compuesto por una serie de islas, penínsulas y cuerpos interiores de agua, que conforman el área insular y un área continental. Estas condiciones y la presencia de los cuerpos de agua, hacen de Cartagena una ciudad con características morfológicas especiales y un hermoso paisaje natural pero, al mismo tiempo, lo constituyen en un sistema de gran fragilidad ambiental [1,3].



Figura 1. Mapa de Colombia

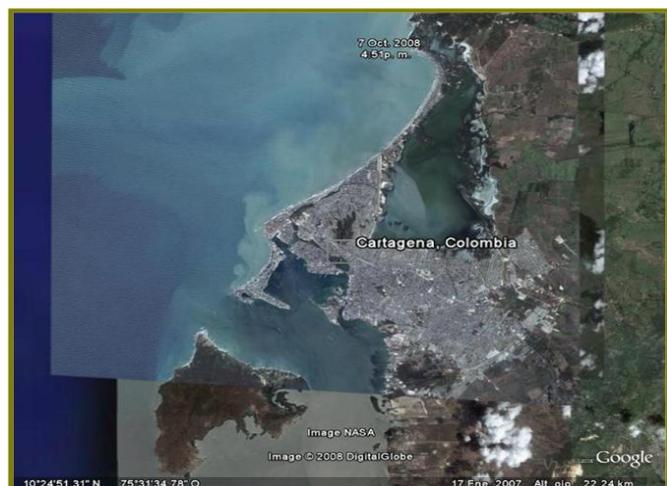


Figura 2. Mapa de Cartagena de Indias.

## **2.2 Población y dimensión económica**

En el año 2004, su población alcanzó 1.004.074 habitantes; 927.656 en la cabecera municipal (92.4%) y 76.417 habitantes (7.6%) en sus corregimientos. [1,4].

En los últimos años la economía de la ciudad ha experimentado un amplio proceso de terciarización, reflejado en aumentos de la participación de los sectores de comercio y servicios en el empleo. El dinamismo del puerto y el crecimiento de la actividad turística propiciaron el florecimiento de las actividades económicas de apoyo, que dieron origen a la terciarización. A pesar del auge y del dinamismo experimentado en la ciudad por las actividades mencionadas, el nivel de desarrollo alcanzado es sensiblemente inferior a los indicadores de bienestar socioeconómico logrados por las otras cinco ciudades principales de Colombia [2,3].

Dentro de esta actividad económica, destacan el comercio, el turismo (Comercio, Hotelería y restaurante), la logística para el comercio internacional, la administración pública (Gobierno), y la enseñanza. El sector de la construcción también hace un aporte importante a la economía de la ciudad

## **2.3 Medio Ambiente, procesos tecnológicos e Industriales**

El problema ambiental prioritario de la ciudad son sus cuerpos de agua; éstos han sido modificados sustancialmente, y en estos momentos, algunos de ellos como la Ciénaga de la Virgen y los caños interiores son ambientalmente frágiles. Los rellenos afectan los cuerpos de agua constituyéndose en unos de los principales males de éstos. El aire de la ciudad no presenta problemas agudos, aunque a largo o medio plazo si pueda llegar a ser un problema. No obstante, la falta de mediciones sistemáticas hace difícil analizar profundamente el problema [3]. En cuanto a la emisión de gases de efecto invernadero, hasta la fecha existen muy pocos estudios acerca de los mismos.

En Cartagena, generalmente las entidades administrativas no acostumbran intercambiar información formalmente. Parece ser que cada entidad hace referencia a fuentes específicas a veces autogenerada y pocas veces intercambiada. Esto genera competencia y dificulta la coordinación interinstitucional. Pese a existir dos autoridades ambientales en la ciudad Cardique y EPA que es la entidad ambiental distrital, la información recopilada no permite realizar un diagnóstico integral del medio ambiente en Cartagena. Este hecho debe constituirse en una verdadera preocupación porque difícilmente permitirá formular medidas preventivas y correctivas adecuadas, propiciando una gran incertidumbre al no precisar el impacto de las acciones emprendidas [6,7].

El EPA (Establecimiento Público Ambiental de Cartagena) es un organismo de carácter público del orden distrital, dotado de autonomía administrativa y financiera, patrimonio propio y personalidad jurídica, encargado de administrar, dentro del área de su jurisdicción, el medio ambiente y los recursos naturales y promover su desarrollo sostenible, de conformidad con las disposiciones legales y las políticas ambientales y nacionales, regionales y locales.

Para conocer el estado real del medio ambiente en Cartagena, a partir de octubre de 2006 se está preparando un informe sobre las Perspectivas del Medio Ambiente Urbano, denominado proyecto GEO Cartagena, promovido por un acuerdo entre el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y la Alcaldía Distrital de Cartagena a través del Establecimiento Público Ambiental (EPA), y adelantado por el Observatorio del Caribe Colombiano. Su propósito es el de identificar acciones y estrategias para solucionar los problemas ambientales de la ciudad y tiene como objetivo servir de instrumento base para la toma de decisiones por los gestores de la política pública y del ámbito privado [3]. El Informe GEO analiza los factores sociales, económicos, físicos, bióticos, climáticos y geográficos de la ciudad y hace un análisis de los factores de presión, estado, e impacto

sobre el ambiente, así como la respuesta de la sociedad, en lo público y lo privado, para hacerle frente a sus problemas ambientales.

La industria de Cartagena se localiza en el sector Industrial de Mamonal, cuenta con una ubicación estratégica al disponer de una extensa franja al frente de la bahía de Cartagena. Se extiende a lo largo de unos 14 kilómetros y cubre un área aproximada de unas 3.100 hectáreas. En este se ubican unas 100 empresas dedicadas a la transformación o producción de alimentos, plásticos, químicos, plaguicidas, abonos, curtimbres, cemento, petróleo, metalmecánicos, entre otros [1,6].

Las actividades industriales son las responsables de una buena parte de la contaminación en la zona marino costera de Cartagena. Desde la década de 1990, se registran los vertidos que la industria realiza a la bahía de Cartagena: nutrientes, residuos de combustibles y fertilizantes y la mayor parte de los vertimientos industriales, como carbonato de sodio, amoniaco, fenoles, aguas calientes, entre otros, los cuales producen un cambio en la calidad y uso del agua, bien sea acumulándose en los organismos o en los sedimentos [1]. Sin embargo hay que destacar el esfuerzo de la industria de Mamonal en la reducción de sus vertidos, con la firma e implementación del convenio de Producción más Limpia firmado en el año 1996 donde se han obtenido logros importantes de reducción de sus descargas.

#### **2.4 Consumo de energía eléctrica.**

En Cartagena el sector de la energía tiene mucha importancia, tanto desde el punto de vista de las expectativas de crecimiento económico, como del abastecimiento de la demanda que se requieren para mantener y consolidar dicho crecimiento y mejorar los niveles de bienestar de la población [1]. El sistema eléctrico del departamento Bolívar atiende su demanda interna de aproximadamente 270 MW (Megavatios), a través del sistema de interconexión nacional y de la generación de Termocartagena (180 MW). En la subestación Ternera que es operada por Transelca, el sistema de Bolívar se conecta a Sabanalarga y Termocartagena a un nivel de tensión de 220 Kv, conformando lo que se conoce como anillo a 220 Kv. En la ciudad de Cartagena, el sector residencial registra el mayor uso de energía eléctrica, (especialmente en los estratos medio y bajo, donde se concentra la mayor parte de la población de la ciudad), seguido por el sector oficial, comercial e industrial [6].

#### **2.5 Parque móvil**

El parque móvil de Cartagena está compuesto por unos 30.000 vehículos conformado por, autobuses, microbuses, motocicletas, taxis y vehículos particulares. Muchos de estos utilizan para su funcionamiento gasolina, gas natural vehicular (GNV) y aceite para motores diesel (ACPM) [3], representando un aporte significativo de emisiones de gases de efecto invernadero en la ciudad.

### **3. Los gases de efecto Invernadero (GEI)**

Los llamados gases de efecto invernadero (GEI) son aquellos componentes gaseosos de la atmósfera, tanto naturales como antropógenos, que absorben y reemiten radiación infrarroja. La atmósfera está compuesta en gran parte por nitrógeno y oxígeno; estos dos gases representan el 99% de su composición. Los gases de efecto invernadero se encuentran en el 1% restante y son los causantes del incremento en la temperatura promedio en la tierra [16,17]. Entre los principales gases se encuentran el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), metano (CH<sub>4</sub>), ozono troposférico (O<sub>3</sub>) y aerosoles (CFC's); la capacidad de contribuir al efecto invernadero de cada uno de los gases depende de su persistencia en la atmósfera y de la eficiencia con que retienen la radiación infrarroja emitida por la tierra [16,17].

El efecto invernadero origina un aumento de la temperatura media de la tierra, debido a un desequilibrio entre los flujos de energía entrante y saliente del sistema climático. Este desequilibrio, en el cual la energía que entra desde el sol a la atmósfera es mayor a la que

sale de ella, produce una acumulación de calor que, con un retardo, reflejado en un incremento en la temperatura de la superficie de la tierra, [18,19].

Se ha visto que las emisiones mundiales de CO<sub>2</sub>, lejos de estabilizarse, han experimentado un importante crecimiento en los últimos años. Claramente, uno de los factores que hay detrás del aumento de emisiones mundiales de CO<sub>2</sub> es el crecimiento de la actividad económica. No obstante, este crecimiento puede ser debido a una mayor prosperidad de los habitantes, o simplemente a un aumento de la población [25]. Existen múltiples factores que influyen en el nivel de emisiones de CO<sub>2</sub>, como son el desarrollo económico, el crecimiento demográfico, el cambio tecnológico, las dotaciones de recursos, las estructuras institucionales, los modelos de transporte, los estilos de vida y el comercio internacional [24,25].

La identificación de la magnitud y fuentes de emisión de gases invernadero de un país es una herramienta fundamental para la planificación de su desarrollo económico y ambiental [21]. En contraste, cuando un determinado país o región posee un fuerte crecimiento económico, este se basa en la utilización de una forma intensiva de la energía, y esta, en su mayor parte proviene de la quema de los combustibles fósiles. Esta fenomenología se debe principalmente, al modelo energético imperante en nuestros días, que se basa en el consumo intensivo de energías no renovables, cuyas características son su disponibilidad en el tiempo y en el espacio, y su relativamente fácil distribución [24,25,27].

<i>Año</i>	<i>Comercio</i>	<i>Industria</i>	<i>Rural</i>	<i>Urbano</i>	<i>Transporte</i>	<i>Electricidad</i>	<i>Transformación</i>	<i>Total (Millones de toneladas de CO<sub>2</sub>)</i>
<b>1996</b>	<b>0,33</b>	<b>22,41</b>	<b>2,15</b>	<b>1,85</b>	<b>21,42</b>	<b>5,41</b>	<b>12,81</b>	<b>66,37</b>
<b>1997</b>	<b>0,39</b>	<b>22,84</b>	<b>2,16</b>	<b>1,98</b>	<b>22,18</b>	<b>6,52</b>	<b>12,86</b>	<b>68,93</b>
<b>1998</b>	<b>0,43</b>	<b>23,41</b>	<b>2,17</b>	<b>2,13</b>	<b>23,07</b>	<b>8,14</b>	<b>13,05</b>	<b>72,40</b>
<b>1999</b>	<b>0,46</b>	<b>23,84</b>	<b>2,18</b>	<b>2,32</b>	<b>24,05</b>	<b>8,09</b>	<b>13,18</b>	<b>74,13</b>
<b>2000</b>	<b>0,49</b>	<b>24,22</b>	<b>2,20</b>	<b>2,57</b>	<b>25,13</b>	<b>9,64</b>	<b>13,43</b>	<b>77,70</b>
<b>2001</b>	<b>0,52</b>	<b>24,65</b>	<b>2,23</b>	<b>2,84</b>	<b>26,21</b>	<b>10,03</b>	<b>13,77</b>	<b>8,26</b>
<b>2002</b>	<b>0,54</b>	<b>25,09</b>	<b>2,26</b>	<b>3,12</b>	<b>27,34</b>	<b>11,34</b>	<b>14,14</b>	<b>83,84</b>
<b>2003</b>	<b>0,57</b>	<b>25,56</b>	<b>2,29</b>	<b>3,40</b>	<b>28,54</b>	<b>12,86</b>	<b>14,51</b>	<b>87,72</b>
<b>2004</b>	<b>0,59</b>	<b>25,96</b>	<b>2,31</b>	<b>3,65</b>	<b>29,8</b>	<b>14,32</b>	<b>14,87</b>	<b>91,50</b>
<b>2005</b>	<b>0,62</b>	<b>26,39</b>	<b>2,34</b>	<b>3,90</b>	<b>31,11</b>	<b>18,70</b>	<b>15,26</b>	<b>98,30</b>
<b>2006</b>	<b>0,64</b>	<b>26,83</b>	<b>2,37</b>	<b>4,14</b>	<b>32,44</b>	<b>20,26</b>	<b>15,64</b>	<b>102,34</b>
<b>2007</b>	<b>0,67</b>	<b>27,30</b>	<b>2,39</b>	<b>4,39</b>	<b>33,84</b>	<b>24,51</b>	<b>16,04</b>	<b>109,13</b>
<b>2008</b>	<b>0,70</b>	<b>27,79</b>	<b>2,41</b>	<b>4,65</b>	<b>35,29</b>	<b>24,97</b>	<b>16,46</b>	<b>112,27</b>
<b>2009</b>	<b>0,73</b>	<b>28,30</b>	<b>2,43</b>	<b>4,92</b>	<b>36,81</b>	<b>30,42</b>	<b>16,90</b>	<b>120,50</b>
<b>2010</b>	<b>0,76</b>	<b>28,33</b>	<b>2,46</b>	<b>5,19</b>	<b>36,39</b>	<b>33,43</b>	<b>17,36</b>	<b>126,41</b>

Figura 3. Emisiones de CO<sub>2</sub> por sectores económicos en Colombia

Existe una tendencia creciente en las emisiones y se espera que para el año 2010 estas superen los 120 millones de toneladas, es decir, para finales de la próxima década se tendrán el mayor crecimiento en las emisiones se espera para el sector eléctrico [28,29]. En

1996 este sector fue responsable del 8% de las emisiones de CO<sub>2</sub> totales, para el 2002 dicho porcentaje aumentará al 14% y para el 2008 alcanzará el 22%.

Para describir las emisiones de los gases causantes del efecto invernadero a la atmósfera en especial el CO<sub>2</sub>; se ha propuesto el modelo de la Identidad de Kaya, que será descrito a continuación.

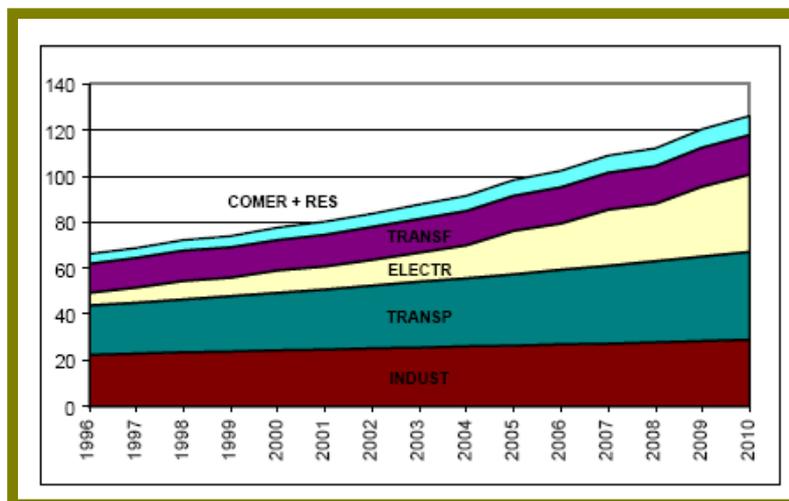


Figura 4. Emisiones de CO<sub>2</sub> por sectores económicos (Millones de toneladas anuales)

#### 4. Identidad de KAYA

Es una herramienta analítica utilizada frecuentemente para explorar cuáles son las principales fuerzas motrices causantes de este comportamiento contaminante del dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) [24,25,30]. Según esta identidad, las emisiones de un país se descomponen en el producto de cuatro factores básicos (influenciados por otros factores): índice de carbonización o intensidad de carbono de la energía (definida como el CO<sub>2</sub> emitido por unidad de energía consumida, CO<sub>2i</sub> / E<sub>i</sub>), la intensidad energética (definida como la energía consumida por unidad de PIB, E<sub>i</sub>/PIB<sub>i</sub>), la renta económica (definida como el PIB per cápita, PIB<sub>i</sub>/P<sub>i</sub>) y la población P<sub>i</sub> [24,25,27,30]. El cálculo de la emisión de CO<sub>2</sub> en Cartagena, en este trabajo es representado por la ecuación 1:

$$CO_2 \text{ (ton)} = \text{Vector Producción (CO}_2\text{/Kwh)} \times \text{Intensidad de Energía (Kwh/USD\$)} \times \text{PIB (USD\$)} \quad (1)$$

El primer componente refleja la combinación de combustibles o fuentes energéticas de un país, el segundo está asociado a la eficiencia energética en la provisión de diferentes bienes y servicios, pero también a otros factores, teniendo especial relevancia el modelo de transporte y la estructura sectorial de la economía, mientras que el tercero es una medida de renta económica. A su vez, el producto de los dos primeros factores nos muestra la intensidad de emisiones del PIB [24,25].

Este modelo a utilizar es genérico y adaptable a un periodo y entorno geográfico determinado. Además permite introducir diferentes escenarios del PIB, mejoras en la eficiencia de la Intensidad Energética como en las emisiones de CO<sub>2</sub> por Kwh producido de las diferentes fuentes de energía [30].

En contraste, para mitigar las emisiones de CO<sub>2</sub>, el ciclo global del C es reconocido como uno de los principales ciclos biogeoquímicos debido a su papel en la regulación de la concentración en la atmósfera de CO<sub>2</sub>, [31,32]. Las concentraciones crecientes de CO<sub>2</sub> en la atmósfera son una contribución importante al cambio climático. Los bosques desempeñan un papel primordial en el ciclo global del C porque almacenan grandes cantidades de C en la

vegetación y el suelo, intercambian C con la atmósfera a través de la fotosíntesis y la respiración, son fuentes de C atmosférico cuando son perturbados por causas humanas o naturales (incendios forestales, utilización de malos sistemas de aprovechamiento, corta y quema para transformación en usos no forestales) y se convierten en sumideros de C atmosférico (es decir, transferencia neta de CO<sub>2</sub> desde la atmósfera a la tierra) durante el abandono de las tierras y su regeneración tras la perturbación. Los seres humanos tienen potencial, a través de la ordenación forestal, para alterar las reservas y flujos del C forestal alterando con ello su papel en el ciclo del C y su potencial para cambiar el clima [31,32].

La absorción del CO<sub>2</sub> se produce mediante el proceso natural de la fotosíntesis. En este proceso, las plantas absorben, además del CO<sub>2</sub>, otras sustancias para producir nutrientes necesarios para su subsistencia, mientras regulan la concentración del dióxido de carbono en la atmósfera. Este hecho ubica a la vegetación en un lugar importante en el ciclo del carbono [16,32].

## 5. Metodología

La metodología empleada en este trabajo, para simular y modelar emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) concretamente el CO<sub>2</sub>, en la ciudad de Cartagena, se inició con actividades como recopilación de información primaria sobre proyección de población, producto interno bruto PIB, consumo de energía, consumo de combustible por el parque automotor., etc.), el análisis de relación entre las diferentes variables problemas que inciden en las emisiones de GEI, realización del diagrama causal, hipótesis y escenarios de funcionamiento del modelo, la simulación del modelo utilizando el software Vensim®. Por último, la interpretación de los resultados de la simulación.

La Dinámica de Sistemas es una metodología de modelado, simulación y análisis de sistemas complejos, formulada inicialmente por Jay Forrester, para entender cómo los sistemas cambian a través del tiempo [8,9]. Un sistema es definido como la colección de elementos que continuamente interactúan en el tiempo, para formar un todo [9]. El objetivo básico de la Dinámica de Sistemas es llegar a comprender las causas estructurales que provocan el comportamiento del sistema. [10]

Esta metodología usa conceptos del campo del control realimentado para organizar la información en un modelo de simulación por computador, donde se representan las variables del mundo real. La simulación resultante revela implicaciones del comportamiento del sistema representado por el modelo. Así pues, la Dinámica de Sistemas permite la construcción de modelos tras un análisis cuidadoso de los elementos del sistema. [9,11,12].

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 [9].

Los datos de los variables para modelar y simular las emisiones de gases de efecto invernadero en la ciudad de Cartagena, provienen de entidades oficiales y privadas ubicadas en la ciudad. El grupo de instituciones que proporcionaron esa información la conforman: Alcaldía de Cartagena, Cámara de Comercio de Cartagena, Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (DANE), Establecimiento Publico Ambiental (EPA) y Electrocosta S.A.

Las principales variables que permiten explicar la evolución de las emisiones de CO<sub>2</sub> en Cartagena son: PIB, población, consumo de energía, parque automotor y la relación entre consumo de energía y PIB (intensidad energética). Estas variables son introducidas en el modelo para simular su dinámica.

## 5.1 Población

Para el caso de Cartagena, el aumento de la población es un factor preocupante, ya que genera un aumento en la demanda, que incrementa la presión sobre los recursos de vivienda, energía, agua, alimentos y medio ambiente. Esta demanda no encuentra una oferta lo suficientemente abundante para permitir la sostenibilidad del ecosistema urbano. La figura 5 muestra el comportamiento histórico de la población proyectada del Distrito, basado en las estimaciones del DANE (Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas).

<b>Años</b>	<b>Población</b>
1995	713.570
1998	782.205
2000	829.476
2001	853.566
2002	877.980
2003	902.688
2004	927.657
2005	952.855
2006	978.309
2007	1.004.015
2008	1.029.994
2009	1.056.231
2010	1.082.712
2011	1.112.712

Figura 5. Proyección de población de Cartagena. Fuente: DANE–Secretaría de Planeación Distrital

## 5.2 Producto interno bruto (PIB)

El PIB representa el resultado final de la actividad productiva de las unidades de producción residentes. Se mide desde el punto de vista del valor agregado, de la demanda final o de las utilizaciones finales de los bienes y servicios y de los ingresos primarios distribuidos por las unidades de producción residentes [4]. Las emisiones de CO<sub>2</sub> están muy relacionadas con variables como el PIB o la población. En cuanto a la evolución del producto Interno Bruto, Cartagena tuvo una participación en el PIB Nacional de 3.91% en el año 2003. De igual forma ha presentado incrementos y, en algunos casos, disminución del mismo, como se muestra en la figura 6.

<b>AÑO</b>	<b>PIB CARTAGENA CONSTANTES DEL 2003 MILLONES DE PESOS</b>	<b>PIB CARTAGENA CONSTANTES DEL 2003 MILLONES DE DOLARES</b>
1998	2623	1,146
1999	2499	1,091
2000	2675	1,168
2001	2744	1,198
2002	2969	1,297
2003	3122	1,364
2004	3271	1,429
2005	3434	1,500
2006	3588	1,567

Figura 6. Evolución del PIB en Cartagena. Fuente: DANE - Cuentas Regionales, Cálculos Unidad de Investigaciones “Cartagena de Indias Puertas de las Américas”.

### 5.3 Consumo de energía

Dado que las emisiones de CO<sub>2</sub> están muy relacionadas con el consumo de energía para cada región en particular. A continuación se muestran en la figura 7, los registros del consumo energético en Cartagena.

La intensidad energética se calcula como el cociente entre el consumo interior bruto de energía y el PIB y mide la energía consumida para producir la misma cantidad de PIB. Las diferencias en la intensidad energética pueden explicarse principalmente por dos situaciones: por las diferencias en la eficiencia en el uso de la energía (al utilizar diferentes cantidades de energía para obtener la misma producción), o bien porque la actividad económica se asiente sobre sectores más o menos intensivos en el uso de energía [35].

Para este caso en particular la intensidad energética para la ciudad de Cartagena, fue calculada entre los cocientes de los promedios históricos del consumo de energía (Kwh) y

PIB (USD\$), obteniéndose un valor de 85,71  $\frac{Kwh}{USD\$}$ .

<b>Año</b>	<b>Consumo de energía Kwh</b>
<b>2000</b>	<b>92.837.612</b>
<b>2001</b>	<b>95.747.933</b>
<b>2002</b>	<b>100.393.811</b>
<b>2003</b>	<b>105.945.752</b>
<b>2004</b>	<b>111.497.967</b>
<b>2005</b>	<b>117.049.634</b>
<b>2006</b>	<b>122.796.697</b>
<b>2007</b>	<b>127.975.523</b>
<b>2008*</b>	<b>131.812.791</b>

Figura 7. Consumo energético de Cartagena. Fuente: Electrocosta S.A., E.S.P.

\* Consumo hasta noviembre de 2008

### 5.4 Estructura parque automotor

Desde las dos últimas décadas, el parque automotor o móvil de Cartagena se ha incrementado como se muestra en la figura 8. Ello ha contribuido al aumento de la contaminación atmosférica como resultado de los gases que son emitidos a través de los tubos de escape. Sin embargo, la mayoría de los automóviles no emiten las mismas cantidades de gases contaminantes, ya que su grado de contaminación obedece a varias razones, algunas de ellas son: la clase de motor que usan, el tipo y la calidad del combustible empleado y las características geográficas de ubicación [20].

Año	Total
1990	3.172
1991	4.367
1992	5.757
1993	8.330
1994	12.074
1995	15.501
1996	18.198
1997	20.774
1998	23.034
1999	24.152
2000	25.057
2001	25.830
2002	26.548
2003	27.354
2004	29.326
2005	25.817
2006	29.763

Figura 8. Parque automotor de Cartagena. Fuente: Departamento Administrativo de Tránsito y Transporte - DATT

## 6. Diagrama Causal de la emisión de CO<sub>2</sub>

Para representar los agentes causantes de las emisiones de CO<sub>2</sub> de manera jerarquizada, es necesario comprender independientemente cada elemento, sus incidencias y las causas que determinan su comportamiento. Una vez identificadas las principales causas de las emisiones de CO<sub>2</sub> en Cartagena, se examinan las relaciones naturales de causalidad entre cada una de las variables, obteniendo el modelo causal diagramado. Las variables que forman parte de este diagrama causal, se nombran a continuación: población, consumo de energía, emisión de CO<sub>2</sub>, absorción natural de CO<sub>2</sub>, masa forestal, consumo de comestibles.

### 6.1 Hipótesis de funcionamiento del Modelo

Mediante este trabajo se pretende estudiar las emisiones de CO<sub>2</sub> en la ciudad de Cartagena; gas principal causante del aumento medio de la temperatura terrestre y por consiguiente del cambio climático.

El modelo describe la dinámica general de las emisiones de CO<sub>2</sub> en Cartagena, considerando un periodo de simulación de 20 años, desde el año 2000 hasta el año 2020.

Las hipótesis con las que se realiza el modelo son las siguientes:

- La población humana depende de la natalidad y la mortandad.
- Esta población humana con su actividad genera riqueza para alcanzar su nivel de bienestar, el cual mediremos a través del PIB.
- Para realizar estas actividades se consume energía.
- La cantidad de consumo de energía depende de la tecnología que se está utilizando. Este factor lo medimos a través de un indicador denominado: Intensidad energética. (Consumo de energía/PIB).
- La tecnología es representada a través del vector energético. El vector energético es el conjunto de energías primarias que se utilizan para cubrir la demanda energética. En este modelo se han considerado dos: gas natural y fuel oil.
- Las emisiones por consumo de energía dependen de la proporción de combustibles fósiles que se utilizan para cubrir la demanda energética y el factor de emisión de estos.

- El consumo de combustibles fósiles utilizado por el parque automotor de la ciudad genera grandes cantidades de emisiones de CO<sub>2</sub>.
- La cobertura vegetal (hectáreas) en la ciudad absorbe CO<sub>2</sub> presente en la atmósfera.

## 6.2 Definición de variables

A partir de estas hipótesis se han seleccionado las variables de nivel del modelo, así como las variables de flujo de cada una de las variables de nivel, parámetros., etc. A continuación, se detallan cada una de ellas.

*Variables de Nivel:* emisiones de CO<sub>2</sub> y población.

*Auxiliares:* emisiones, nacimientos, muertes, producto interno bruto (PIB), consumo energético, emisión gas natural, emisión fuel oil, emisión ACPM, emisión gasolina y emisión GNV.

*Parámetros:* absorción natural de CO<sub>2</sub>, tasa de natalidad, tasa de mortandad, PIB per cápita, intensidad energética, factor de emisión gas natural, factor de emisión fuel oil, consumo ACPM, consumo gasolina, consumo GNV, factor de emisión gasolina, factor de emisión ACPM y factor de emisión GNV.

## 6.3 Simulación del modelo

La programación del modelo se realiza en el software Vensim®, el método de integración utilizado es Runge Kutta y el paso de tiempo es de un año. El periodo de simulación comprende desde el año 2000 hasta el año 2020. En la figura 9, se presenta el modelo construido en dinámica de sistemas.

## 7. Resultados y discusión

En esta sección serán presentados los resultados de las relaciones funcionales de las variables problemas, (población-PIB, consumo energético-PIB, nacimientos-población), el análisis del diagrama causal y el comportamiento de las emisiones de CO<sub>2</sub> en Cartagena obtenidas a través del modelado y simulación con el programa Vensim.

### 7.1. Análisis de las Relaciones Funcionales

Las relaciones funcionales entre las diferentes variables de flujo y variables de nivel han sido analizadas y comparadas con las fuentes de información pública y privadas consultadas. Estas relaciones funcionales inciden directamente en las emisiones de CO<sub>2</sub> en Cartagena.

#### 7.1.1. Relación PIB-Población.

Para la ciudad de Cartagena se muestra una relación directa entre los datos del PIB y la población, como se ilustra en la figura 6. Este comportamiento se explica por una mejora del crecimiento de la economía en Colombia a través de los años. Lo cual incrementa el uso de energía y por consiguiente, en un aumento progresivo de emisiones de CO<sub>2</sub> en la ciudad.

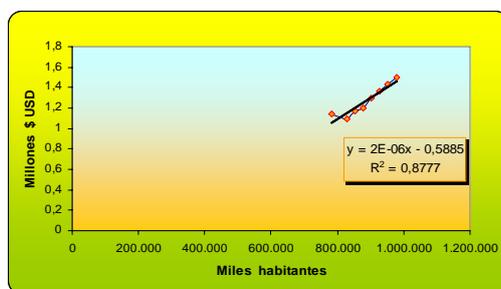


Figura 10. Relación PIB – población

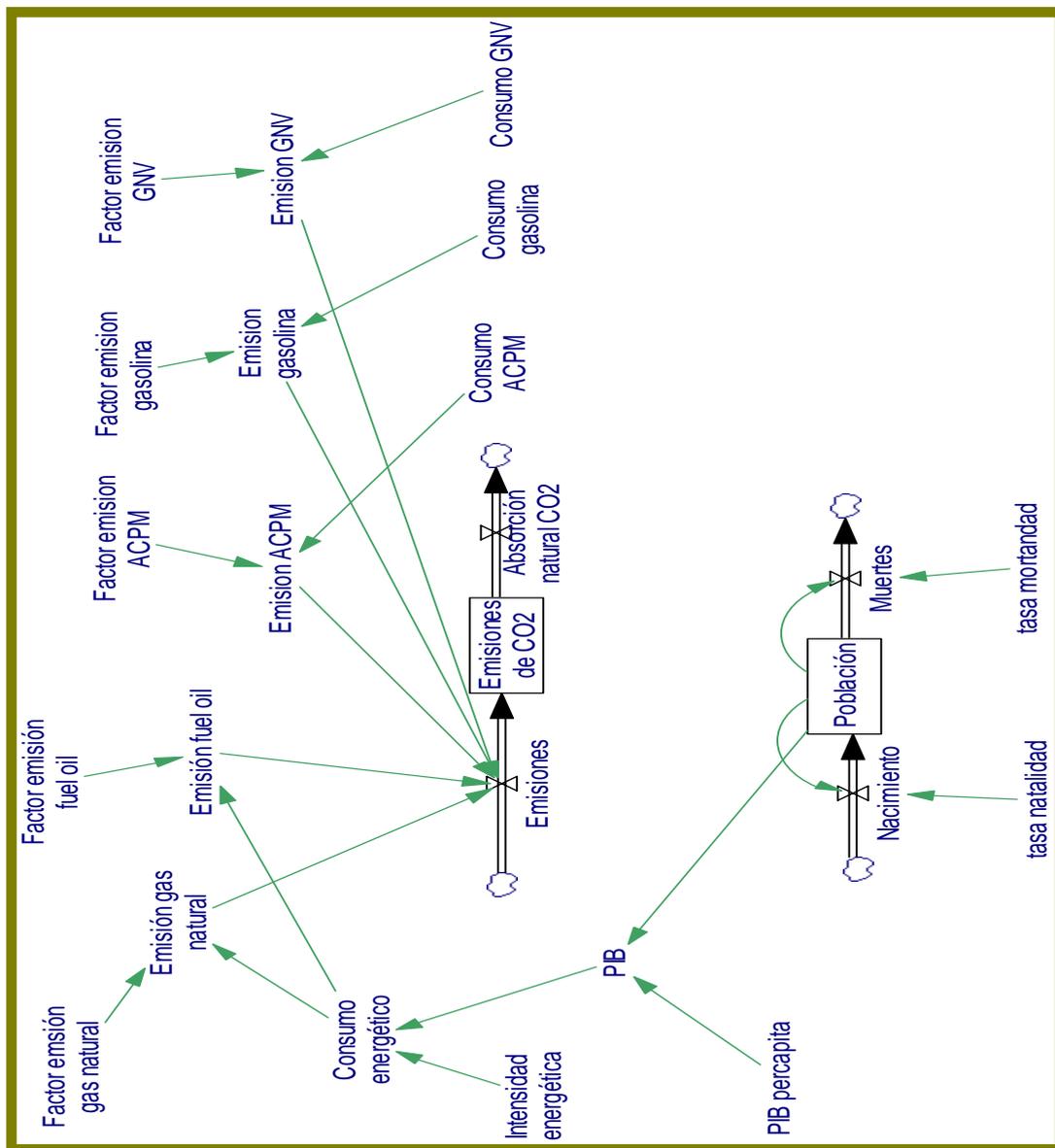


Figura 9. Modelo de emisión y absorción de CO2 en Cartagena de Indias

### 7.1.2. Relación PIB- consumo de energía.

Entre el año 2000 al 2008 se ha producido un crecimiento del consumo de energía. Al explicar la evolución del consumo energético en relación con la evolución del PIB, se observa que la población de Cartagena con su actividad económica genera riqueza para alcanzar su nivel de bienestar, demandando consumo de energía. Para este caso en particular el valor de intensidad energética es de  $85,71 \frac{Kwh}{USD\$}$ . La figura 11 muestra el fenómeno descrito con anterioridad.

### 7.1.3. Relación Población – Nacimientos

El crecimiento poblacional es el principal factor de presión en la ciudad de Cartagena, sumado a la poca disponibilidad de tierra en el área urbana actual. Esto ha traído como consecuencia cambios en el uso del suelo que han disminuido la cobertura vegetal de la

ciudad. Se prevee un crecimiento progresivo en los próximos años de mantenerse las condiciones socioculturales actuales en la ciudad.

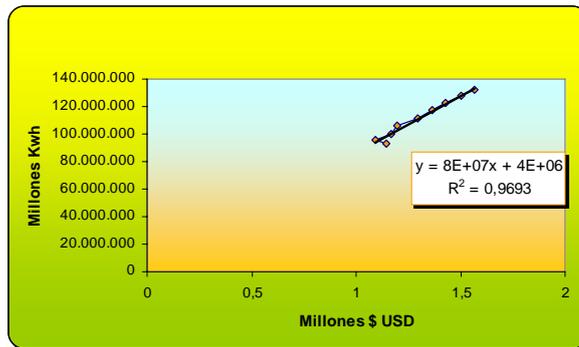


Figura 11. Relación PIB – consumo de energía

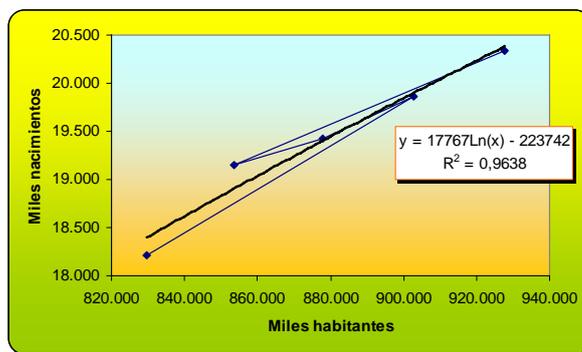


Figura 12. Población - nacimientos

## 7.2. Análisis del Diagrama Causal de emisiones de CO<sub>2</sub> en Cartagena

Con base en el diagrama causal mostrado en la figura 13, es observado que las emisiones de CO<sub>2</sub> emitidas a la atmósfera enmarcan varias relaciones que serán descritas a continuación. El crecimiento poblacional demanda un consumo de energía para realizar diferentes actividades, estas actividades requiere de consumo de combustibles. La quema de combustibles genera emisiones de CO<sub>2</sub>, como mecanismos de reducción de estas emisiones la masa forestal de la ciudad por medio de la fotosíntesis absorbe el CO<sub>2</sub> emitido a la atmósfera. La utilización de suelos por el crecimiento poblacional, disminuye la masa forestal, por tanto, es disminuida la capacidad de absorción de CO<sub>2</sub> en la atmósfera.

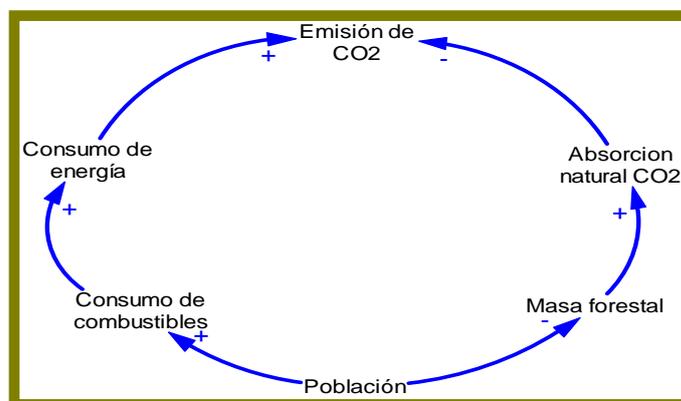


Figura 13. Diagrama causal emisión de CO<sub>2</sub>

### 7.3 Resultados de la simulación de las emisiones de CO<sub>2</sub>

Los resultados obtenidos consideran el análisis del escenario base. El cual representa la evolución del comportamiento actual de las emisiones de CO<sub>2</sub> en Cartagena de Indias. A continuación se detallaran los resultados más representativos de este estudio.

El panorama actual de las emisiones de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) en Cartagena, como se muestra en la figura 16, está ligado directamente con el crecimiento poblacional, con el producto interno bruto (PIB), consumo energético y el consumo de combustibles fósiles (gas natural, fuel oil, gasolina, gas natural vehicular, aceite para motores diesel). Ello demuestra que la identidad de Kaya es una herramienta de planificación ambiental urbana.

Con base en estos resultados es visualizado qué en Cartagena se proyecta aumentar sus emisiones de CO<sub>2</sub> en los próximos 20 años, evidenciando su deseo de potenciar su economía. En contraste con este escenario base, la implementación obligatoria de Mecanismos de Desarrollo Limpio (MLD) y el Uso Racional de la Energía, en todos los procesos productivos de la ciudad permitirá reducir consumos, costos energéticos y la producción de gases de efecto invernadero.

Todo esto conlleva a la mejora de la eficiencia en la gestión de sus recursos energéticos que amortigua la generación de dióxido de carbono. Por otra parte, la cantidad de CO<sub>2</sub> emitida en Cartagena podría estar regulada por la cobertura vegetal de la ciudad mediante el proceso de la fotosíntesis.

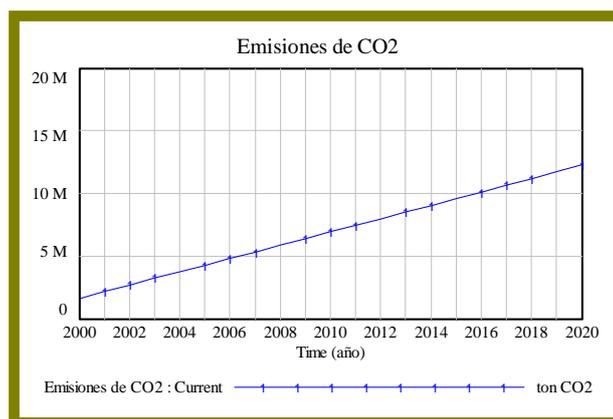


Figura 14. Simulación de las emisiones de CO<sub>2</sub> en Cartagena

En cuanto a la población de Cartagena (figura 15), se observa el rápido proceso de urbanización que ha vivido en general el país, y además, se confirma un fenómeno demográfico importante, a tener en cuenta para planificaciones futuras.

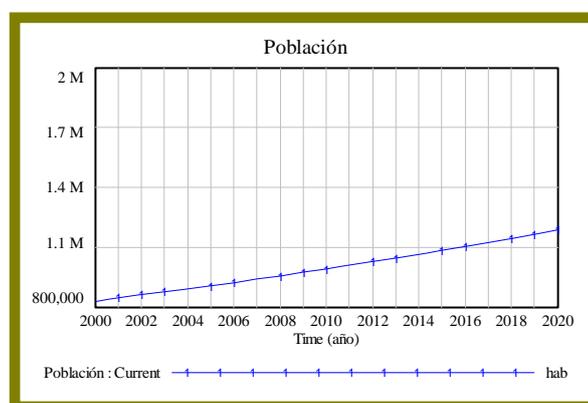


Figura 15. Simulación población de Cartagena

Para el caso del PIB y el consumo energético representados en las figuras 16 y 17 respectivamente. Es observado que estos aumentan progresivamente, por la dependencia con la dinámica de crecimiento poblacional.

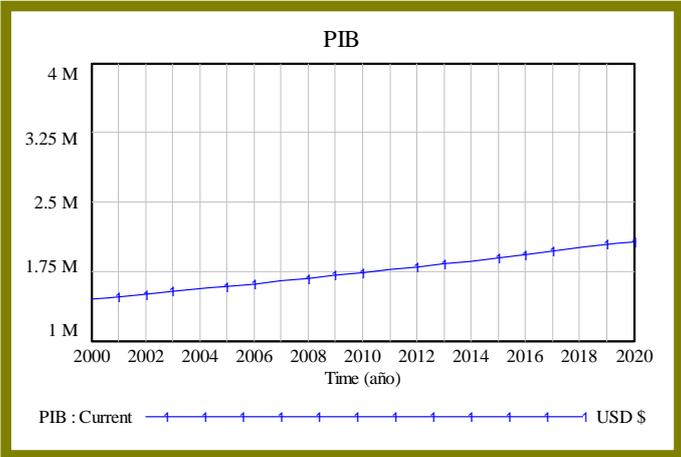


Figura 16. Simulación PIB en Cartagena

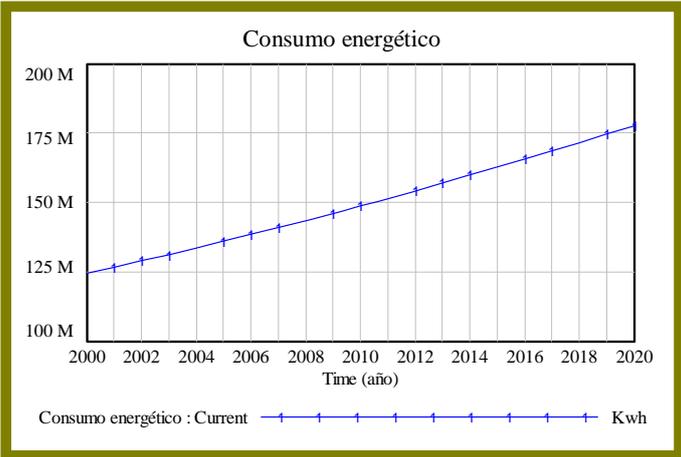


Figura 17. Simulación consumo energético de Cartagena

**8 Conclusiones**

Los resultados generados en este trabajo mediante el uso de la dinámica de sistemas para estudiar la evolución de las emisiones de CO<sub>2</sub> en la ciudad de Cartagena permitió estudiar la forma de interactuar de las principales variables del sistema, con una buena aproximación al sistema real ambiental de la ciudad.

Las estimaciones de las emisiones de CO<sub>2</sub>, a partir del escenario base, muestran un aumento progresivo de este gas, situación que ha de tenerse en cuenta en la planificación urbana y ambiental de la ciudad, para adoptar políticas que conlleven a la disminución de estas emisiones.

Indiscutiblemente las emisiones de gases de efecto invernadero se pueden reducir considerablemente en la ciudad, si se utiliza el potencial de las energías renovables, como la energía solar fotovoltaica y la solar térmica. Considerando la ventaja climatológica que posee la ciudad para los parámetros de radiación solar y brillo solar, situación que es desaprovechada por las autoridades de gobierno distrital para mitigar el efecto invernadero.

Los datos de los parámetros aplicados en la dinámica de sistemas del sistema estudiado, provienen de entidades oficiales y privadas de Cartagena, pero esa búsqueda de información fue bastante difícil en algunos casos.

## Referencias

1. *Alcaldía de Cartagena, Decreto N° 0977 de 2001*. Plan de Ordenamiento Territorial del Distrito Turístico y Cultural de Cartagena de Indias.
2. *Alcaldía de Cartagena de Indias y Cámara de Comercio de Cartagena*. Cartagena en síntesis 2006.
3. Indicadores Sociales de Cartagena. I Semestre de 2007 N° 11. *Banco de la República, Cámara de Comercio de Cartagena, Observatorio del Caribe Colombiano, Universidad Jorge Tadeo Lozano – Seccional del Caribe, Universidad Tecnológica de Bolívar*.
4. Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (DANE). <http://www.dane.gov.co/>
5. Panorama Económico Cartagena – Bolívar. Información Regional. <http://www.proexport.gov.co/VBeContent/NewsDetail.asp>
6. Establecimiento Público Ambiental (EPA - CARTAGENA). Evaluación, actualización e implementación del plan de gestión ambiental del distrito de Cartagena. 2005.
7. Establecimiento Público Ambiental (EPA - CARTAGENA). Plan de acción 2008-2011. 2008.
8. Begueri, Graciela. La Dinámica de Sistemas: Un Nuevo enfoque. Congreso de Informática, Argentina 2001. <http://www.unsjuim.edu.ar/portalzonda/Congreso/papers/2001/UI04.pdf>.
9. Ortiz, F., y Maneiro, N. Dinámica de Sistemas: Otro enfoque para modelación y simulación en ingeniería. En: <http://servicio.cid.uc.edu.ve/ingenieria/revista/n1/1-1.pdf>
10. García, Juan Martín. Teoría y Ejercicios Prácticos de Dinámica de Sistemas. Barcelona, 2003.
11. Sotaquirá R., y Ariza, G. Mejorando la reutilización de modelos de simulación de dinámica de sistemas. *Revista Ingeniería y Competitividad*. 7: 80-89. 2005. Universidad del Valle.
12. Barbosa José A. Modelamiento, modelo, simulación e identificación. *Revista Ingeniería e Investigación*. 9: 52-62. 1984. Universidad Nacional de Colombia.
13. Rueda, L., y Rico, D. Modelamiento inicial de las ciudades de países en vía de desarrollo, utilizando dinámica de sistemas. *Scientia et Técnica* 34:421-426. 2007. Universidad Tecnológica de Pereira.
14. Vensim®. Ambiente de simulación Ventana. Versión 5. Guía del Usuario. 2002.
15. Simulación de la dinámica de sistemas. <http://cerezo.pntic.mec.es/~falda/modelos/vensimtut.pdf>.
16. Franco, C., Baena, A., y Becerra, D. Dinámica del calentamiento atmosférico producido por gases de efecto invernadero. En: *Reflexiones y aplicaciones de la D.S en Colombia*. Sexto encuentro Colombiano de Dinámica de Sistemas 2008.
17. Intergovernmental Panel On Climate Change (IPCC). 2001. Tercer Informe de Evaluación: Cambio climático 2001. <http://www.ipcc.ch/pdf/climate-changes-2001/synthesis-syr/spanish/wg1-summaries.pdf>
18. Intergovernmental Panel On Climate Change (Ippc). 1997. Estabilización de los gases atmosféricos de efecto invernadero: implicaciones físicas, biológicas y socioeconómicas.

<http://www.ipcc.ch/pdf/technical-papers/paper-III-sp.pdf>

19. Republica de Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Cambio climático global. <http://www.minambiente.gov.co/contenido/contenido.aspx?catID=135&conID=252>
20. Echeverri Londoño Carlos A. Estimación de la emisión de gases de efecto invernadero en el municipio de Montería (Córdoba, Colombia). *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*. 9:85-96. 2006.
21. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). 2001. El medio Ambiente en Colombia: Emisiones al ambiente en Colombia. <http://www.ideam.gov.co/publica/medioamb/cap13.pdf>
22. Figueruelo, J., y Dávila, M. Química física del ambiente y de los procesos medioambientales. Editorial Reverté, S.A. 2004. pp. 355-361.
23. Harrison, R.M. El medio Ambiente: Introducción a la química medioambiental y a la contaminación. Editorial Acribia, S.A. 2003, pp. 15-17.
24. Alcántara, V., y Padilla, E. Análisis de las emisiones de CO<sub>2</sub> y sus factores explicativos en las diferentes áreas del mundo. : <http://www.ecap.uab.es/RePEc/doc/wpdea0507.pdf>
25. Duro, J.A., y Padilla, E. Análisis de los factores determinantes de las desigualdades internacionales en las emisiones de CO<sub>2</sub> per cápita aplicando el enfoque distributivo: una metodología de descomposición por factores de Kaya. [http://www.ief.es/Publicaciones/PapelesDeTrabajo/pt2005\\_25.pdf](http://www.ief.es/Publicaciones/PapelesDeTrabajo/pt2005_25.pdf)
26. Sarica, Kemal and Karali, Nihan. Modeling of the interactions between sectoral CO<sub>2</sub> emissions and energy efficiency under CO<sub>2</sub> emission restriction policies. *The 2008 International Conference of the System Dynamics Society*. Greece; 2008.
27. Fiddaman, Thomas S. Exploring policy with a behavioral climate-economy model. *System Dynamics Review*. 2: 243-267. 2002.
28. González, F., y Rodríguez H. Gases de Efecto invernadero en Colombia. *Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. [http://www.accefyn.org.co/WebGEI\\_\(actualizada\)/Archivosgei/pdf\\_inventario.htm](http://www.accefyn.org.co/WebGEI_(actualizada)/Archivosgei/pdf_inventario.htm).
29. González, F., et al. Inventario preliminar de gases de efecto invernadero en Colombia. Fuentes y sumidero. *Revista Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. 21: 107-117. 1997.
30. Herrera Mérida, Grover. Simulador de Emisiones de CO<sub>2</sub> de Brasil. <http://www.salle.url.edu/eng/elsDET/Catedra/biblioteca/0072.htm>
31. Abellas, Maria. Un modelo de simulación del CO<sub>2</sub> en la atmósfera. <http://www.dinamica-de-sistemas.com/revista/1207b.htm>
32. Bosques y cambio climático y la función de los bosques como sumideros de carbono. [http://www.fao.org/forestry/docrep/wfcxi/publi/PDF/V1S\\_T4.PDF](http://www.fao.org/forestry/docrep/wfcxi/publi/PDF/V1S_T4.PDF)
33. García, Héctor. Generación de energía termoeléctrica en Colombia y contaminación del aire. *Revista AINSA*. 5: 13-24. 1985.
34. Mastrángelo, Sabino. Conceptos de Generación Termoeléctrica: Combustibles Utilizados e Impactos Ambientales. <http://www.cnea.gov.ar/xxi/energe/b10/autores03.pdf>

35. Cancelo, M<sup>a</sup> Teresa., y Díaz, M<sup>a</sup> del Rosario. Emisiones de CO<sub>2</sub> y crecimiento económico en países de la UE. *Revista Estudios Económicos de Desarrollo Internacional*. 2: 69-91. 2002. Universidad Santiago de Compostela.

**Correspondencia** (Para más información contacte con):

Ángel Mena Nieto.

Área de Proyectos de Ingeniería – Escuela Politécnica Superior

Campus Universitario de La Rábida 21819. Palos de la Frontera

Phone: +34 959217444

E-mail : [mena@uhu.es](mailto:mena@uhu.es)