

## **4. Capítulo 4. Metodología. Hacia valoraciones integradas con herramientas de apoyo a la toma de decisiones**

### **4.1 Introducción**

En este capítulo presentaremos la metodología utilizada para abordar el problema de las emisiones y absorciones; posteriormente la herramienta informática de apoyo a la toma de decisiones utilizada, denominada Globesight, y finalmente se presentarán y justificarán los modelos utilizados en esta Tesis Doctoral.

### **4.2 Antecedentes metodológicos en que se enmarca la presente Tesis Doctoral**

El problema medioambiental producido por las emisiones antropogénicas, es uno de los clásicos problemas en donde se interrelaciona el sistema global tierra y el sistema humanidad. La característica principal de esta interrelación es que la humanidad está cambiando el medio ambiente, cambio éste, que provoca simultáneamente cambios en la propia humanidad. Es una continua relación de retroalimentación entre el medio ambiente y la humanidad, como subsistemas de un sistema complejo. Cualquier intento de análisis humano del sistema, implica simplificaciones de su complejidad que, entonces, impone una *incertidumbre* fundamental, que pone otro límite a la predicción o conocimiento objetivo del tema (Xercavins, 2000).

Por tanto a este problema en particular, al tener tales características intrínsecas: complejidad, derivada de ella, la incertidumbre y ser un problema que interrelaciona el sistema natural con el sistema humanidad; podemos aplicar los conceptos y la metodología desarrollados por M.D. Mesarovic y J. Xercavins, en el ámbito de la representación de sistemas globales de estas características, a través de modelos sencillos jerárquicos multinivel (Mesarovic, 1970, 1972; Xercavins, 2000) y su implementación a través de herramientas de apoyo a la toma de decisiones; en nuestro

caso con una desarrollada por los anteriores autores y otros, denominada “GlobeSight” (Sreenath, 1999; Mesarovic et al. 1997-99; Mesarovic, 1985) .

### 4.3 Aplicación de la metodología

Siguiendo dicha metodología hemos desarrollado un modelo jerárquico multinivel para representar el problema de las emisiones de gases que producen efecto invernadero debido a actividades antropogénicas; en si mismo es un modelo complejo, por poseer varios niveles jerárquicos, porque los sistemas complejos suelen ser sistemas jerárquicos multinivel, por tanto puede representar un problema que intrínsecamente posee una alta complejidad (Xercavins, 2000).

El esquema del modelo jerárquico multinivel desarrollado en el presente trabajo aparece en la figura 4.1

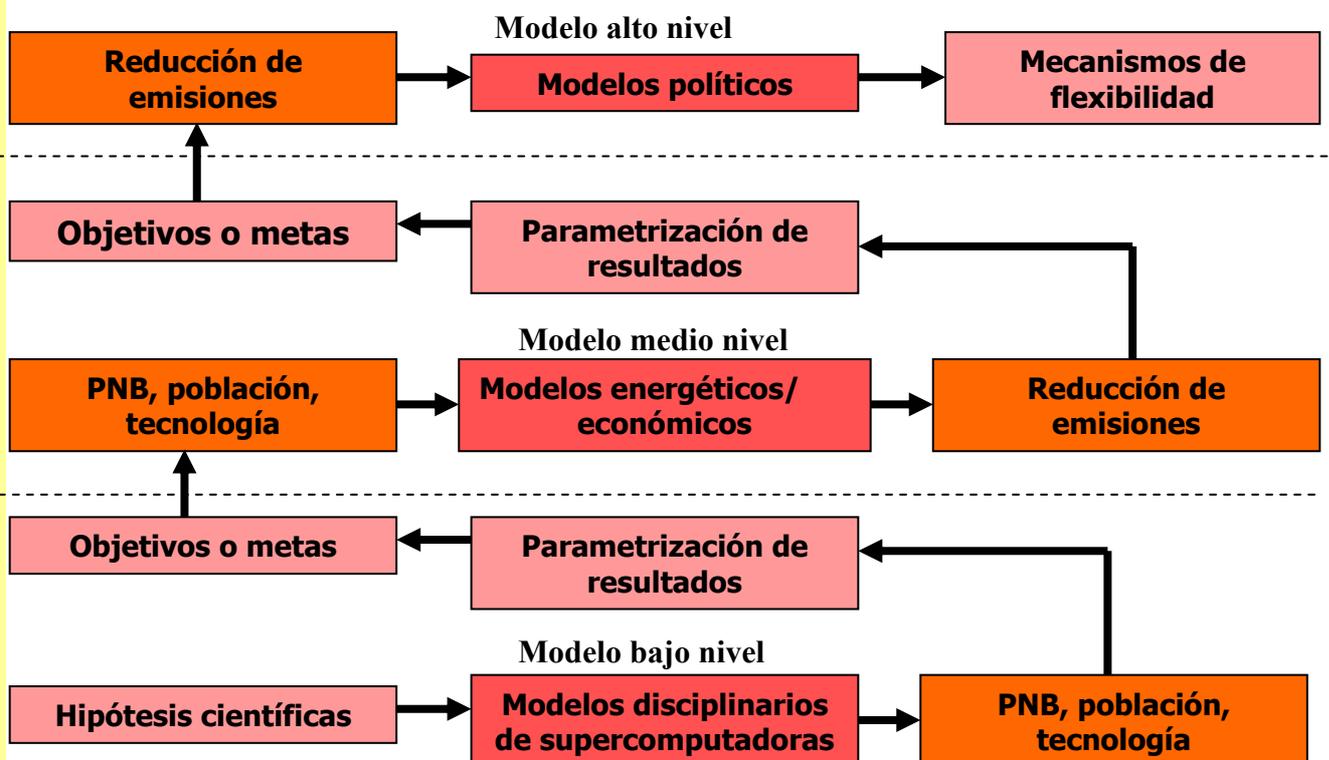


Figura 4.1: Esquema del modelo multinivel jerárquico utilizado en este trabajo.

Es un modelo jerárquico multinivel de tres niveles. De los cuales en la presente Tesis desarrollamos los dos de nivel superior.

El modelo de nivel inferior o de bajo nivel estaría formado por un conjunto de modelos disciplinarios, económicos, físicos, biogeológicos, etc., que bajo hipótesis científicas bien contrastadas, se implementan a través de programas en supercomputadores, y nos dan como resultado una serie de variables o indicadores y sus valoraciones temporales de las diferentes disciplinas. Podemos asemejarlos a los grandes modelos integrados atmosféricos oceánicos, que se utilizan para predecir las variaciones climáticas e utilizados por los organismos internacionales (IPCC, Grupo de Trabajo III, 2000) y otros modelos de este tipo pero de diferente disciplina como los de tipo económico tecnológico (Le Moige, 1995).

Las salidas o resultados de estos modelos, parametrizados, nos servirán como variables de entrada para el modelo de nivel medio. Este modelo en función de las variables de entrada calculará tanto las emisiones, como las absorciones de dióxido de carbono por las fuentes especificadas, las emisiones netas y por tanto el nivel de reducción de emisiones con respecto a las metas u objetivos del Protocolo de Kyoto. Los modelos utilizados son del tipo energético económico. Estos modelos energéticos económicos son sencillos. Relacionan una serie de indicadores representativos del problema en cuestión, relacionados a través de un tipo de identidad, siguiendo los criterios de la igualdad de  $I=PAT$  (Ehrlich & Holdren, 1971; Clark, 1989). Específicamente como veremos posteriormente en este capítulo, utilizaremos la igualdad de Kaya (Kaya et al., 1989). Por ejemplo, un grado de reducción de la intensidad energética o el cambio del vector energético, se evaluarán en este nivel en función del objetivo de reducción fijado.

Los resultados del modelo de nivel medio, nos servirán como entrada al modelo de nivel superior o alto nivel, el cual es esencialmente un modelo político, en donde los resultados de emisión nacional son determinados con la asunción de mecanismos de coordinación y flexibilización (comercio de derechos de emisiones, fondos de mitigación, etc.), usando indicadores adecuados (ej. por unidad de coste de reducción de emisión como una función del tiempo y de la propia cantidad), y de otros indicadores, outputs de otros modelos de nivel inferior (ej. PIB, etc.). Este modelo nos producirá un conjunto de posibles resultados, denominadas en este trabajo, las emisiones políticas.

Emisiones no reales, pero computables según el Protocolo de Kyoto, y aplicables al primer periodo de compromiso.

#### **4.4 Globesight: Herramienta de apoyo a la toma de decisiones y modelos utilizados**

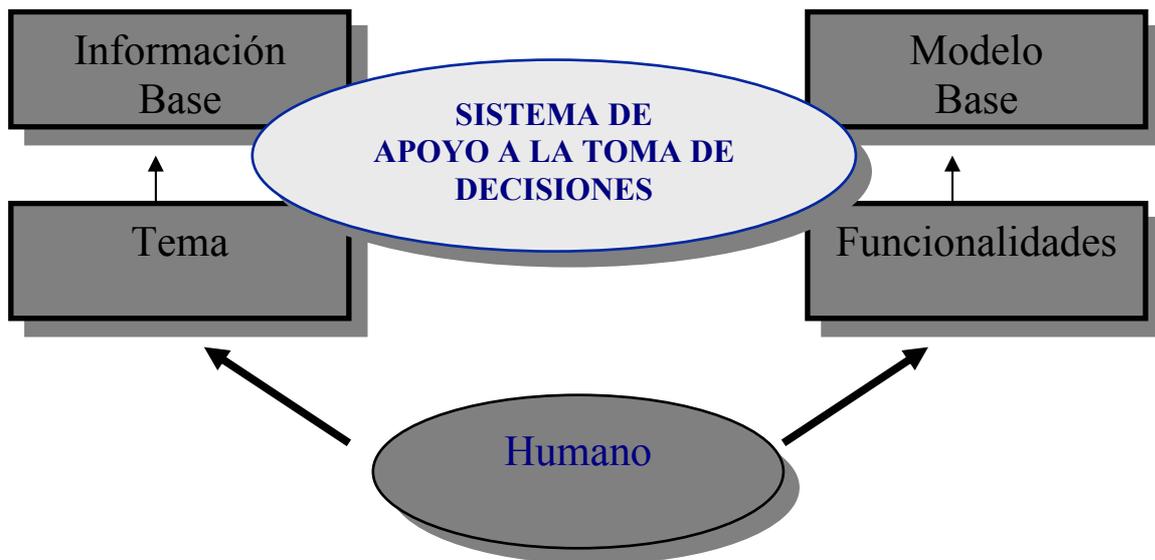
En este apartado presentamos la herramienta de apoyo a la toma de decisiones que hemos utilizado para construir y simular, nuestros modelos y escenarios de futuro de emisiones y absorciones, aplicados según el paradigma referenciado en los puntos anteriores de este capítulo.

##### **4.4.1 GLOBESIGHT: HERRAMIENTA DE APOYO A LA TOMA DE DECISIONES**

Nosotros hemos desarrollado un modelo integrado multinivel jerárquico, que hemos implementado a través de un prototipo de un sistema de soporte a la valoración integrada denominado GlobeSight, el cual ha sido utilizado en diferentes circunstancias bajo GENIE (Global Problematique Education Network Initiative), programa de la UNESCO, con el liderazgo del Profesor Mihajlo D. Mesarovic de la “Case Western University de Ohio” (Cleveland, USA).

“El GlobeSight representa el papel de monitor y de consultor en los procesos en donde se analiza el pasado, se evalúa el presente, y se realizan proyecciones de diferentes futuros posibles. Esta herramienta requiere del ser humano para representar la subjetividad y los aspectos cualitativos que pueden intervenir en las relaciones, junto con el conocimiento de datos, procedimientos y modelos” (Mesarovic et al., 2000).

La arquitectura del GLOBESIGHT es mostrada en la figura 4.2. El software de apoyo al razonamiento GLOBESIGHT está disponible sobre hardware SUN así como hardware de PC. Las versiones de SUN Solaris y LINUX también están disponibles. Normalmente las plataformas de soporte son WINDOWS 95/98 y WINDOWS NT. Son programas basados en lenguaje Visual C++/Visual Basic apoyados por bases de datos tipo MS Access.



**Figura 4.2: Estructura del GlobeSight, figura extraída y adaptada del libro GENIE, UPC, 2000**

Esta herramienta de apoyo a la toma de decisiones o de valoración integrada, no es ni más ni menos que un interface informático a través del cual se pueden analizar problemas de carácter global en función del tiempo (Tema, en la figura 4.2). Por tanto nos permiten hacer simulaciones y con ellas, crear escenarios de futuro. El propio interface posee como variable interna el propio concepto de tiempo; la unidad básica de tiempo es el año.

Este interface permite interaccionar el modelo matemático de la problemática global en cuestión (Modelo Base en la figura 4.2) y el usuario (Humano en la figura 4.2). Este modelo es desarrollado e introducido por el propio usuario en lenguaje de programación C++. El interface permite compilarlo, y ensamblarlo a diferentes bases de datos en donde se escriben y /o leen, tanto los datos de las variables de entrada como de salida, también es el encargado de que el modelo calcule los datos de las variables de salidas para cada año de la simulación. A su vez, esta diseñado, para permitir un entorno de datos de salida “amigable”, haciendo posible visualizar éstos a través de diversos gráficos y tablas (Funcionalidades de la figura 4.2).

Posee otra funcionalidad más, un sistema de información geográfico, que sirve de apoyo para consultas de las problemáticas estudiadas, es lo que en la figura 4.2 se denomina Información Base.

Este software ha sido desarrollado por el grupo de trabajo del doctor M. D. Mesarovic, bajo la filosofía de su metodología y por consiguiente es ideal para la implementación de modelos sencillos jerárquicos multinivel, que permiten una interacción entre el usuario, que aporta la visión subjetiva, a través de la modificación de parámetros y el ordenador (modelo) que aporta la visión objetiva del problema. “El escenario es el resultado de la relación simbiótica entre el humano y la computadora, en la cual la parte objetiva (numérica) y subjetiva (visión humana) se unen para dar la posible evolución futura” (Mesarovic, et al., 2000). Esta característica es la que da a este software la calificación de herramienta de apoyo a la toma de decisiones o de valoración integrada.

#### 4.4.2 BASE DE LOS MODELOS DE GLOBESIGHT

Primero de todo, nosotros intentamos realizar modelos que combinen la integridad científica y la transparencia. Por ello, para cumplir con la primera premisa, se recurre a modelos reducidos derivados de modelos complejos, que se encuentran contrastados por la comunidad científica, y por tanto con un alto grado de fiabilidad.

Otro aspecto que debe cumplir los modelos implementados a través del GlobeSight es que sean lo suficientemente transparentes y sencillos para que sean fácilmente entendidos por el público en general, sobre todo a los decisores políticos, y de esta manera poder convertirse en una importante herramienta de apoyo a la toma de decisiones. Esto se consigue a través de la utilización de modelos sencillos jerárquicos multinivel.

No modelamos los aspectos humanos del problema en los modelos que se utilizan en el “GlobeSight”. Esta relación o mejor dicho interrelación entre el mundo natural y la humanidad se tiene en cuenta en el proceso posterior de crear los escenarios con la interacción del usuario y el modelo a través del software como explica M.D. Mesarovic en el libro GENIE (Mesarovic, et al., 2000). Esto es lo que permite que sea una buena herramienta para poder realizar análisis políticos.

Esta manera de representar los problemas a través de modelos sencillos jerárquicos multinivel e implementados a través del GlobeSight nos permite de una manera original jugar con la complejidad y la incertidumbre, como veremos a continuación.

Cuanto mayor es la complejidad disminuye la incertidumbre del modelo, y cuando menor es aquella mayor es ésta. Al utilizar este último tipo de modelos, modelos sencillos, parece que la incertidumbre se incrementa hasta límites intolerables, pero analizando el problema, la mayor fuente de incertidumbre es el comportamiento del sistema humanidad, por eso, este sistema no es modelado, y todo el comportamiento e influencia de este se lo dejamos al usuario en la posterior interrelación que tienen con el modelo para crear escenarios, gestionando estas incertidumbres a través de unas variables sobre las tasas de crecimiento de las variables del modelo denominado “multiplicador” ó “parámetro”. No pretendemos pronosticar la evolución del sistema. Sino la de visualizar distintas posibles evoluciones del sistema, en función de los posibles comportamientos del subsistema humanidad.

#### 4.4.3 BASE DE LA EVOLUCIÓN DINÁMICA TEMPORAL DE LAS VARIABLES DE LOS MODELOS DE CÁLCULO EN EL GLOBESIGHT

Todas las variables que se consideran que intervienen en el problema están en función del tiempo, de su evolución temporal. La representación del valor de esta evolución temporal en los modelos construidos a través de la metodología descrita, e implementados en la herramienta informática “GlobeSight”, se realiza de una manera particular. Así, tomando las relaciones del indicador de riqueza PIB (Producto Interior Bruto), que en el modelo lo denominaremos “gnp”, sus siglas en inglés, “Gross National Product” como ejemplo, y como primera parte del análisis político de este estudio, el modelo de la evolución del indicador de riqueza del primer nivel consiste en una simple ecuación de velocidad o tasa de crecimiento.

$$\text{gnp}_t = \text{gnp}_{t-1} \cdot \left[ 1 + \frac{\text{rgnp}_{t-1}}{100} \right] \quad \text{Relación n}^\circ 1$$

donde:

$\text{gnp}_t$ : El índice de riqueza PIB de la región en el año “t”

rgnp: la velocidad de crecimiento del PIB en porcentaje.

En otras palabras, la ecuación anterior dice que el PIB del año siguiente es el PIB del año en curso más el PIB que se incrementa durante ese año de acuerdo con su tasa de evolución. Tal representación no es inadecuada, pero podría ser altamente incierta con todas las incertidumbres que envuelven la velocidad de crecimiento.

Por tanto, la incertidumbre se concentra en la tasa de crecimiento del indicador, de la cual, a nivel histórico sabemos su valor, pero es impredecible su evolución futura, ya que en ella juega un papel fundamental el comportamiento del sistema humano. Para manejar esta incertidumbre en esta variable introducimos el denominado multiplicador, para el cálculo de esta tasa de crecimiento en el futuro. Tal como se muestra en la siguiente relación.

$$\text{rgnp}_t = \text{rgnpd}_{t-1} * \text{rgnpm}_{t-1} \quad \text{Relación n° 2}$$

En donde la tasa de crecimiento del indicador se calcula en función del producto de la tasa histórica de crecimiento de la variable (rgnpd) y la variable multiplicador (rgnpm). Si esta última tiene el valor de 1, toda la evolución de la variable “gnp”, se calcula como si tuviese una tasa de crecimiento idéntica a la histórica. Esto nos creará un escenario BaU (Business and Usual), normalmente tomado como escenario de referencia. Si este multiplicador es diferente de 1 implica un análisis distinto de cómo puede variar esta tasa de crecimiento en el futuro. Produciendo un escenario alternativo diferente construido bajo otras hipótesis derivadas de asunciones que hace el ser humano que interactúa con el modelo a través del “GlobeSight”.

Esto también permite realizar estudios sensitivos de las diferentes variables que componen el modelo.

Las ecuaciones (1 y 2) parecen simples y pueden ser intuitivamente y fácilmente entendibles. Pero a menudo nosotros subestimamos el concepto subyacente.

Desde el punto de vista matemático es una ecuación integrada que representa la variación dinámica temporal de la variable  $gnp_t$  (nosotros podemos olvidar que esto es el PIB y ser cualquier otro concepto). Esto es obvio. Pero, ¿por qué es esto? Porque la evolución de esta variable en el tiempo depende del valor inicial –la cantidad inicial- de esta variable y entonces, matemáticamente hablando, la forma universal de la descripción de esta evolución dinámica (para toda clase de fenómenos en cualquier tipo de evolución temporal de las variables, que dependen de la cantidad inicial de la variable) es una ley exponencial, cuya forma integrada es la forma que nosotros estamos usando aquí y en general, en nuestros modelos (por supuesto sí las variables que nosotros queríamos representar siguen esta clase de evolución).

Nosotros usamos los multiplicadores, ej. parámetros, ej.  $rgnpm_{t-1}$ , con el fin de tener en cuenta la posible o normal variación en el tiempo de la constante dependiente del tiempo (la velocidad) que define la intensidad de la variación. Así es como introducimos la posible interacción humana en la evolución de nuestras variables.

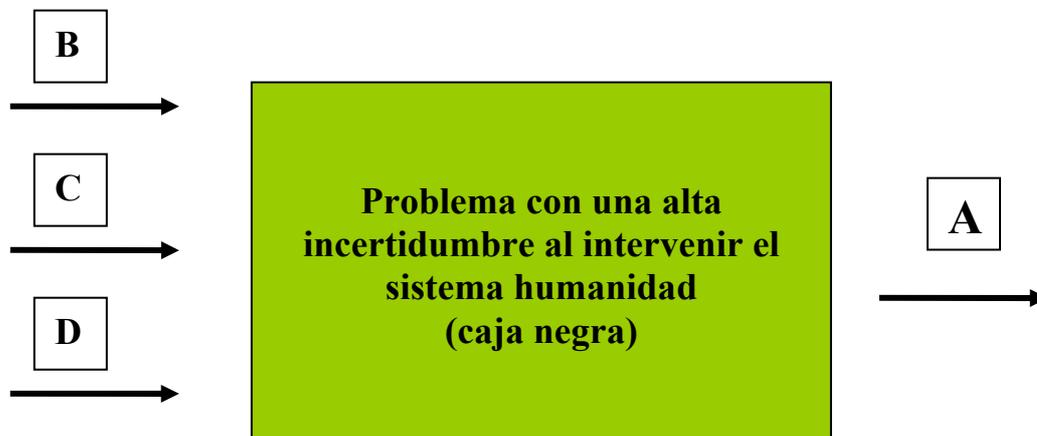
En este trabajo nosotros usaremos esta clase de aproximación para el cálculo de todas las variables de los modelos que nos calcularán las emisiones y absorciones para diferentes escenarios de futuro.

#### 4.4.4 LOS MODELOS REDUCIDOS SENCILLOS Y LA APLICACIÓN DE LA IDENTIDAD DE KAYA

Los modelos reducidos sencillos que desarrollaremos en esta Tesis Doctoral, se basan en la aplicación de la identidad de Kaya (Kaya et al., 1989) al problema de las emisiones y absorciones.

La identidad de Kaya se puede aplicar a cualquier tipo de problema del cual conocemos su efecto (salida) y alguna, varias o todas las causas (entradas). Pero desconocemos totalmente que tipo de relación hay entre ellas debido a la intervención en el problema del sistema humanidad (enorme incertidumbre debido al comportamiento no lineal del ser humano).

Así, si a nivel general conocemos, la variable de salida del problema, y la denominamos A, y a las variables que suponemos depende A, las llamamos B, C y D. Podemos representarlo gráficamente como, ver figura 4.3.



**Figura 4.3: Estructura del problema al que aplicamos la igualdad de Kaya**

Para poder estudiar el fenómeno o problema podemos relacionar las entradas (B, C, D), con las salidas (en este caso sólo A), de tal manera que obtengamos una identidad ( $A = A$ ), y que en la identidad formada podamos identificar las diversas fuerzas causantes del fenómeno. Así, a nivel de ejemplo, podríamos crear la siguiente identidad.

$$A \equiv \frac{A}{B} * \frac{B}{C} * \frac{C}{D} * D \quad \text{Relación n° 3}$$

Este tipo de identidad es totalmente cierto, ya que ( $A \equiv A$ ). Pero cada relación formada,  $\frac{A}{B}, \frac{B}{C}, \frac{C}{D}$ , en si misma son indicadores (si nos dan información relevante del problema), que poseen su propia evolución temporal. Estos indicadores (variables) y su evolución temporal son las que implementamos en el GlobeSight, tal como hemos comentado en el punto anterior (4.4.1.2), para calcular las variables de salida. En nuestro caso las emisiones y absorciones de CO<sub>2</sub>.

Por otra parte, tal como hemos comentado, estas relaciones identitarias con indicadores deben dar información relevante del problema, por tanto su selección, requiere un cuidadoso estudio, para determinar si efectivamente las variables que forman estos indicadores sean acopladas, es decir que realmente nos puedan proporcionar información a partir de la visualización de su evolución. En general, se escogen indicadores que representen diferentes subsistemas del sistema humanidad, como indicadores del subsistema económico, tecnológico, y/o social, así como indicadores del sistema natural o ambiental (Ehrlich & Holdren, 1971; Clark, 1989).

#### 4.4.5 MODELOS DESARROLLADOS Y UTILIZADOS EN LA PRESENTE TESIS DOCTORAL

Tal como hemos planteado en este capítulo de la Tesis Doctoral, ahora desarrollaremos dos modelos, para implementarlos en la herramienta de valoración integrada y de apoyo a la toma de decisiones “GlobeSight”. Con esta herramienta podremos confeccionar un escenario de futuro de referencia, y tres escenarios de futuro alternativos bajo diferentes hipótesis de comportamiento, con objeto de analizar las políticas sobre los factores considerados, y su efecto en alcanzar las metas descritas en el Protocolo de Kyoto.

Ambos modelos se encuentran jerarquizados, uno de nivel medio, que denominaremos modelo de segundo nivel, que a partir de las fuerzas motoras de las emisiones y absorciones calcula las emisiones netas de las regiones y países considerados, creando un escenario de futuro (año 2015) de referencia, bajo el criterio de mantenimiento de las tasas de crecimiento futuro, con el mismo valor que las históricas consideradas. Los datos de salida de este modelo, nos servirán como datos de entrada al segundo modelo, modelo de orden jerárquico superior, que denominaremos modelo de primer nivel, en donde modelizaremos los Mecanismo de Desarrollo Limpio descritos en los documentos de la octava Conferencia de las Partes, Nueva Delhi (2002). En este modelo de alto nivel podemos determinar las reducciones en emisiones debidas a la aplicación de las técnicas de mitigación previstas en el epígrafe de los Mecanismos de Desarrollo Limpio, a partir de la inversión necesaria, calculada como un porcentaje sobre el Producto Interior Bruto para una reducción real de emisiones, utilizando el precio de la tonelada de dióxido de carbono no emitida. Con ello podremos analizar si estos Mecanismos pueden servir eficazmente a los objetivos para los que se han creado.

#### 4.4.5.1 Fuerzas motoras de las emisiones y absorciones

En este apartado profundizaremos en las denominadas fuerzas conductoras o mejor dicho, en los factores causantes, tanto de las emisiones como de las absorciones de dióxido de carbono. Para poder realizar el modelo jerárquico de segundo nivel correspondiente.

Estos factores son de índole estrictamente humana, y a pesar de los esfuerzos en el ámbito científico para discernir la influencia y relaciones entre ellos; hoy en día estamos lejos de comprenderlos y por tanto de modelarlos con exactitud (IPCC, Documento Técnico II, 1997).

La principal causa de las emisiones es la actividad económica, ligada al modelo económico capitalista - liberal. La relación entre la causa y su efecto, las emisiones, nos viene modulada por una serie de factores de tipo tecnológico, como la eficiencia de la tecnología utilizada para generar este crecimiento económico y factores de tipo político, que nos representan la influencia social, o la dimensión humana del problema de las emisiones. Otro gran factor que se considera en la bibliografía especializada es la propia población (IPCC, Grupo de Trabajo III, 2001).

Las emisiones de dióxido de carbono antropogénicas que calcularemos con el modelo que presentaremos a final de este capítulo son las debidas a la quema de combustibles fósiles, y al sector de la fabricación de cemento y/o clinka, las cuales se encuentran relacionadas directamente, existe una clara proporcionalidad, con el crecimiento económico y grado de desarrollo de los países o regiones. 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, a partir de aquí y concatenada con este fenómeno crece generalmente la producción y consumo de la clinka y el cemento, como un factor anexo al crecimiento económico (IPCC, Grupo de Trabajo II, 2001). Esta fenomenología se debe en su mayor parte, 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. También depende del propio modelo económico neoliberal, una de cuyas premisas es la

no regulación o restricción del consumo (IPCC, Grupo de Trabajo III, 2001), propiciando la producción masiva de productos, y para poder realizarlo, es necesaria la industrialización, transporte y distribución, dimensión que consume grandes cantidades de energía. Se sustituye la energía de origen animal, o humana, o renovable, o fuentes de energía de baja densidad, discontinuas en el tiempo y altamente aleatorias (energías renovables) por energías de alta densidad, de alta disponibilidad, abundantes y con altas tasas de reposición (que generalmente son las energías no renovables) y de precio barato (EIA, USA, 2003).

Por otra parte, las emisiones debidas a la deforestación, se encuentran claramente ligadas de manera inversamente proporcional al grado de desarrollo de un país o región, y proporcionalmente a la presión demográfica, así como a la cantidad de bosques que poseen.

Cuando más pobres o menos desarrollados económica y socialmente son los países, los bosques son uno de los recursos básicos que se utilizan para la propia subsistencia, así también, los bosques son utilizados como concesiones a la industria maderera para el pago de la deuda externa de estos países o regiones. Estos hechos provocan deforestaciones importantes, y consecuentemente, se produce una liberación de carbono a la atmósfera en forma de emisiones.

Este fenómeno, las emisiones por deforestación, posee una proporcionalidad con la cantidad de bosques que poseen, así, países ricos en bosques y en vías de desarrollo poseen tasas de emisiones por deforestación relativamente más elevadas que otros países con características similares, tanto en aspectos económicos como sociales, pero que poseen menos cantidades relativas de bosque. Es más oneroso la explotación maderera en bosques diseminados que en grandes masas de boscosas (FAO, 2002).

Las absorciones se deben sobre todo a dos fenómenos, por un lado a la propia extensión de bosque de los diferentes países o regiones, es decir, las hectáreas de los diferentes tipos de zonas boscosas que poseen, y por otro al grado de fijación del CO<sub>2</sub>, que depende a su vez de la edad y tipología del bosque (IPCC, Libro de Trabajo, 1997).

Así bosques jóvenes, en crecimiento, fijan más carbono que bosques viejos y maduros, en donde prácticamente existe un equilibrio entre las emisiones y absorciones. Los bosques nuevos que han aparecido en las tierras de labor abandonadas, son bosques generalmente del hemisferio norte, que coincide geográficamente con los países industrializados, estos bosques tienen un alto grado de fijación del carbono, que disminuye aproximadamente con la latitud, así los bosques templados nuevos tienen un mayor grado de fijación que los bosques boreales nuevos (IPCC, Libro de Trabajo, 1997).

A nivel mundial, quedan definidos por tanto, dos tipos diferentes de absorciones, las principales que fijan aproximadamente una cuarta parte del carbono total emitido por fuentes antropogénicas, que son debidas a las zonas boscosas, y que se concentran en las zonas tropicales y en menor medida las boreales, que coinciden con países en vías de desarrollo y países en transición económica (La Federación Rusa), y las absorciones debidas a la reforestación o forestación natural que con un peso del 10 % de todas las absorciones, se concentran en el hemisferio norte, en los países industrializados (Cielsa, 1996).

Como hemos comentado existe una relación entre las absorciones, la renta, y la cantidad de bosques de los diferentes países y regiones consideradas, por eso, también existe un condicionante geográfico determinado por la climatología y la bondad de ésta para la existencia de bosques. También estos factores nos determinan las emisiones por deforestación, y las absorciones por reforestación o forestación.

#### 4.4.5.2 Modelo de segundo nivel

Como hemos comentado en los objetivos de la presente Tesis Doctoral, capítulo 3, tenemos que realizar un modelo matemático de segundo nivel, que nos relacione las diferentes variables, tanto económicas como tecnológicas, así como medio ambientales, que nos permita predecir las diferentes posibles evoluciones de las emisiones de gases efecto invernadero en el planeta en el futuro, teniendo en cuenta los sumideros que, a nivel político se han definido en la Cumbre de Marrakesh (COP 7, 2001).

Como factores o variables relevantes en el problema de las emisiones, o fuerzas motoras de estas, hemos considerado cuatro, las de más impacto, definidas por el IPCC (IPCC, Grupo de Trabajo I, 2001), la primera fuerza motora de las emisiones de CO<sub>2</sub> por causas antropogénicas es la quema de combustibles fósiles, la segunda es debida a la deforestación, y la tercera a la fabricación de cemento o clinka para la construcción. Por otra parte, los sumideros de CO<sub>2</sub> definidos por la séptima reunión de las partes, y que redirige su cálculo al documento del IPCC “Buenas prácticas y dirección de la incerteza de los inventarios nacionales de los gases efecto invernadero”, en el apartado “modulo 5, Uso de la tierra, cambios en el uso de la tierra y silvicultura” del año 1996, es el último factor que utilizamos en nuestro modelo, para el cálculo de las emisiones netas.

Este modelo de segundo nivel, es un modelo reducido, que se basa en la identidad de Kaya, y nos viene definido a través de una identidad, y por tanto, siempre es cierto.

Inicialmente, en la bibliografía, este modelo se ha aplicado al cálculo de las emisiones procedentes de la quema de combustibles fósiles (Sreenath, 1999). En el presente trabajo de investigación aplicaremos la tipología de este tipo de modelo a otros factores que dominan el fenómeno.

Podemos subdividir el modelo en tres submodelos que explicaremos a continuación:

- Modelo de segundo nivel para las emisiones brutas
- Modelo de segundo nivel para las absorciones
- Modelo de segundo nivel para las emisiones netas

#### 4.4.5.2.1 Modelo de segundo nivel para las emisiones brutas

Este submodelo reducido lo desarrollamos siguiendo los modelos descritos en la bibliografía, con la inclusión de otras fuentes de emisiones de CO<sub>2</sub>. En nuestro caso hemos incluido una nueva fuente de emisiones, la debida a la fabricación de la clinka y del cemento. Con ello calcularemos las emisiones brutas o simplemente emisiones de CO<sub>2</sub>.

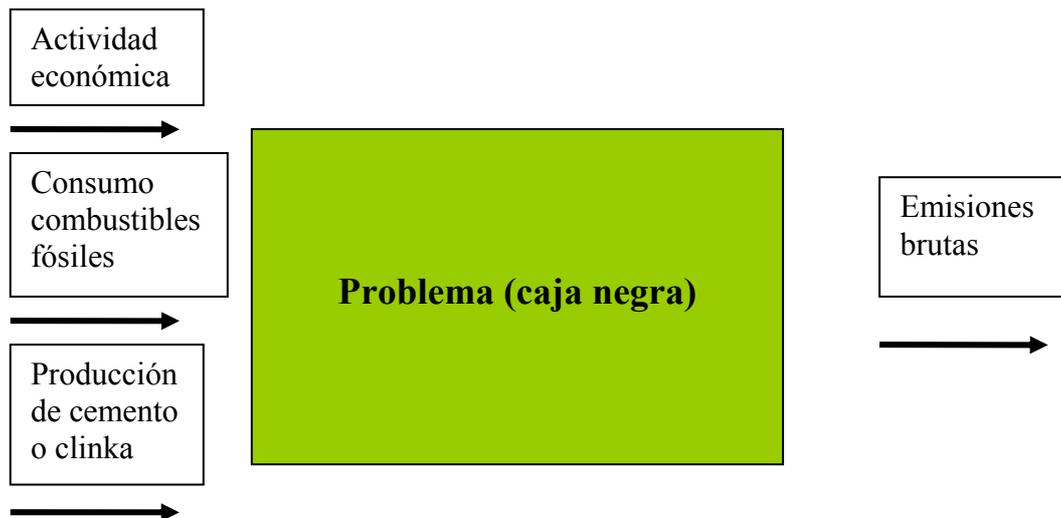
De esta parte del problema en cuestión, nosotros, para la creación de nuestro modelo conocemos la variable de salida, las emisiones brutas, y de las variables que consideramos que dependen de ella, la economía, el consumo de combustibles fósiles y la producción de clinka y/o cemento.

El consumo de combustibles fósiles depende del vector energético del país o región, es decir de los diferentes tipos de energía primaria que se consumen. En este trabajo consideramos seis diferentes fuentes de energía primaria: el carbón, el petróleo, el gas natural, la energía nuclear, la energía hidráulica, y las energías renovables, que corresponde a toda otra fuente de energía no mencionada dentro del vector; las tres primeras son los denominados combustibles fósiles.

La composición del vector energético depende en gran medida de las políticas energéticas emprendidas por los países o regiones. Por otra parte el consumo total energético se debe sobre todo al tipo de tecnologías energéticas que se utilizan para cubrir la demanda energética de los países o regiones.

La producción de clinka y/o cemento se debe en gran medida a las políticas y/o tendencias en urbanismo imperantes en los diferentes países o regiones, así como de la actividad económica.

De este problema sabemos de su dependencia pero no así de sus relaciones intrínsecas. Gráficamente lo representamos como en la figura 4.4.



**Figura 4.4: Estructura del modelo de segundo nivel para las emisiones brutas**

Para poder crear el modelo tenemos que interrelacionar las entradas y salidas del problema a través de indicadores que sean a su vez representativos de las fuerzas motoras del problema, y representarlos a través de una igualdad.

En nuestro caso aplicaremos por separado a las dos fuentes de emisiones la igualdad de Kaya, y una vez obtenidas las emisiones de cada fuente las sumamos.

Para cada fuente calculamos las emisiones de CO<sub>2</sub>, como:

$$\text{Emisiones CO}_2 = \text{Coeficiente emisiones} * \\ * \frac{\text{consumo energía/producción cemento}}{\text{PIB}} * \text{PIB}$$

En donde el problema de las emisiones queda relacionado con la actividad económica por el indicador PIB, la utilización de la tecnología energética y/ o grado de urbanización por una intensidad, y el coeficiente de emisiones que implícitamente contiene las políticas sobre el vector energético, y el propio coeficiente de emisiones de la producción de cemento y/o clinka.

Desarrollando esta igualdad para sus dos componentes obtenemos la siguiente identidad de cálculo de las emisiones de CO<sub>2</sub>, que consiste en:

$$\text{Emisiones brutas} = \left( \sum \frac{\text{emisiones}}{\text{tipo de energía utilizada para cubrir la demanda energética}} * \frac{\text{energía}}{\text{PIB}} * \text{PIB} \right) + \left( \text{Factor de Emisión de CO}_2 * \frac{\text{Producción cemento}}{\text{PIB}} * \text{PIB} \right)$$

#### Relación nº 4

En el primer factor tenemos en cuenta el sumatorio de emisiones en función del tipo de energía utilizada para cubrir la demanda energética. Este último término, también, denominado “vector energético”, es una constante física, ya que cada tipo de energía proveniente de los combustibles fósiles conlleva una determinada cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub>. Lo único que puede variar en este sumatorio es la proporción misma de los diferentes tipos de energía dentro del vector energético, en el transcurso del tiempo, como resultado de políticas energéticas estatales o regionales, adoptadas para cada región. Nosotros lo consideramos como la componente política de las emisiones debido a la quema de combustibles fósiles.

El segundo producto, dentro de este primer factor, corresponde a la variable denominada “intensidad energética”, y representa la cantidad de energía que hace falta para producir una unidad del Producto Interior Bruto (PIB). En general, en los países desarrollados tiene un valor bajo, ya que al poseer una mayor tecnología, existe un mejor aprovechamiento de la energía; mientras que en los países en vías de desarrollo o no desarrollados este factor tiene un valor elevado, debido a su falta de tecnología y por tanto a un mayor despilfarro energético. Es necesario el consumo de más energía para producir una unidad de crecimiento económico medido con el PIB. Este factor representa el impacto del desarrollo tecnológico frente a las emisiones.

Por último, dentro del primer término, tenemos el PIB como índice representativo de la actividad económica, como motor de las emisiones de CO<sub>2</sub>.

El producto de la intensidad o eficiencia energética por el PIB, es la denominada “demanda energética”.

El siguiente término es parte de la contribución de este trabajo de investigación para ampliar el modelo, que existe en la bibliografía dentro de este ámbito.

El segundo gran término, representa las emisiones realizadas por la producción de cemento y clinka, tal como contempla el “Inventario de Gases Efecto Invernadero”, IPCC, 1996. Las emisiones en la fabricación de estos productos, se calcula mediante una igualdad con los siguientes términos. El primero es el PIB, que es el indicador de la actividad económica del que depende la producción de estos productos; multiplicado por la intensidad en la producción de cemento o/y clinka, que nos indica el grado de urbanización de un determinado territorio (teniendo en cuenta que parte de estas producciones son dirigidas al comercio internacional). Exactamente nos da los millones de toneladas producidas por unidad de crecimiento económico, lo cual nos indica en cierto grado, que tipo de relación existe entre el grado de urbanismo y el crecimiento económico, este indicador tiene una tasa elevada en los países desarrollados y baja en los países en vías de desarrollo; y a su vez se multiplica por el factor de emisión de dichos productos, dando como resultado los millones de toneladas de CO<sub>2</sub>, que son emitidas a la atmósfera por esta actividad.

El cálculo de las emisiones brutas o emisiones de CO<sub>2</sub> se calcula como la suma de las emisiones de estos dos factores.

#### 4.4.5.2.2 Modelo de segundo nivel para las absorciones

Este submodelo de cálculo de las absorciones tiene tres términos, uno que nos calcula la absorción producida por el crecimiento de masas forestales que existían con anterioridad al año 1990; y por tanto, no se tiene en cuenta en la contabilidad de emisiones y absorciones con objeto de la aplicación del Protocolo de Kyoto; y los otros dos términos que nos calculan las absorciones de bosques nuevos, contabilizados a partir del año 1990, y que por tanto se contabilizan con objeto de la aplicación del Protocolo de Kyoto y las emisiones debido a la deforestación que se han producido

desde el año 1990 y por tanto, también, son incluidas en la contabilización con objeto de la aplicación del Protocolo de Kyoto.

Como en el caso del submodelo anterior, primero determinaremos que variables son de salida del modelo, en nuestro caso las absorciones o emisiones debido a las variaciones de las masas forestales; y las variables de entrada que para este fenómeno, nosotros consideraremos dos: los tipos de sumidero y el área de cada tipo de sumidero. La variable de entrada “actividad económica o riqueza”, la hemos obviado, debido a que no existen estudios que nos permitan relacionar la problemática de la forestación o reforestación y deforestación con ella.

Relacionándolo tal como lo hemos hecho en el submodelo visto en el punto anterior, podemos desarrollar la identidad de cálculo de las absorciones de CO<sub>2</sub>, que consiste en:

$$\begin{aligned}
 \text{Absorciones} = & \left( \sum \frac{\text{Factor de reabsorción de CO}_2}{\text{Tipo de sumidero} * \text{Area}} * \text{Tipo de sumidero} * \text{Area} \right) + \\
 & + \left( \sum \frac{\text{Factor de reabsorción CO}_2}{\text{Tipo de sumidero} * \text{Crecimiento de Area}} * \text{Tipo de sumidero} * \text{Crecimiento de Area} \right) - \\
 & - \left( \sum \frac{\text{Factor de emisión CO}_2}{\text{Tipo de sumidero} * \text{Decrecimiento de Area}} * \text{Tipo de sumidero} * \text{Decrecimiento de Area} \right)
 \end{aligned}$$

#### Relación nº 5

En esta identidad, el primer término, es el referente a los sumideros de CO<sub>2</sub>, existentes con anterioridad al año 1990, que calculamos para tener una referencia de la absorción total de la masa forestal, a pesar que no se contemple su contabilidad en los tratados internacionales, en donde, dependiendo del tipo de sumidero (bosques, pastos, silvicultura, etc.), le corresponde un determinado factor de absorción anual de CO<sub>2</sub> por hectárea, que multiplicada por el área de cada tipo de sumidero nos dará el montante total de CO<sub>2</sub> absorbido por estos sumideros. Como esta primera identidad del modelo calcula año a año las absorciones por el crecimiento natural de la vegetación de una determinada área forestal, si ésta decrece debido a la deforestación, las absorciones también decrecen. Por tanto este término incluye “la pérdida por absorción de la masa vegetal”.

Por otra parte, el segundo término corresponde a las absorciones debido a los efectos dinámicos sobre el suelo y la vegetación; reforestación, forestación y cambio de los usos del suelo. Este último término, se calcula según las variaciones anuales positivas sobre los diferentes tipos de bosques y vegetación, multiplicados por su correspondiente factor de remoción de carbono. Este término es el que se tiene en cuenta en la contabilidad para la aplicación del Protocolo de Kyoto.

El tercer término, como el anterior, se tiene en cuenta en la contabilidad para la aplicación del Protocolo de Kyoto, y corresponde al cálculo de las emisiones por deforestación de la masa forestal a partir de 1990. Se calcula, según las variaciones anuales negativas (decrecimiento) sobre los diferentes tipos de bosque y vegetación, multiplicados por su correspondiente factor de emisión de carbono.

El cálculo de estas emisiones se realiza siguiendo los criterios expuestos en el módulo 5 “Cambios del uso de la tierra y silvicultura” de las “Directrices del IPCC para los inventarios de gases de efecto invernadero, versión revisada 1996: Libro de Trabajo”, IPCC, París, 1997”. Dentro de este módulo, aplicamos concretamente, el punto 3, cálculo de “Emisiones de CO<sub>2</sub> procedentes de la conversión de bosques y praderas”. En cuya introducción (punto 5.3.1, pag. 9) se dice lo siguiente: *“La conversión de bosques y praderas a tierras de cultivo o pastos permanentes ocurre principalmente en los trópicos. La tala de los bosques tropicales supone generalmente el desbroce del sotobosque y la tala de árboles, actividades que van seguida de la quema de la biomasa in situ o de su aprovechamiento como leña. En este proceso, parte de la biomasa se quema y otra parte permanece en el campo, donde se descompone lentamente (por lo general a lo largo de un período de 10 años en los trópicos). Una parte del material quemado (5 – 10 %) se convierte en carbón vegetal, que resiste a la descomposición más de 100 años, y el resto se libera inmediatamente a la atmósfera en forma de CO<sub>2</sub>”*. A partir de esta concepción de que toda la biomasa de una zona deforestada, a la larga es una emisión de CO<sub>2</sub>, es decir o es una emisión in situ por combustión de la biomasa, o diferida por descomposición de la propia biomasa, o por descomposición a través de compuestos intermedios, nosotros en nuestro modelo, consideramos que todo el contenido de carbono de la biomasa deforestada es emitida en forma de CO<sub>2</sub>, en el año de cálculo. Aproximación que por una parte nos permite evaluar en el año en curso, cualquier emisión diferida en el tiempo debido a los diversos procesos de descomposición.

Además, es coherente con la metodología de cálculo que se expone en el mismo documento (Metodología 5.3.3, página 10), en donde se especifica la metodología empleada para el cálculo de emisiones “*Para obtener las emisiones de CO<sub>2</sub> procedentes de la conversión de bosques y praderas se emplean tres tipos de cálculo:*

- *El dióxido de carbono emitido durante la quema de la biomasa aérea (emisiones inmediatas, que ocurren en el año de la conversión).*
- *El dióxido de carbono liberado durante la descomposición de la biomasa aérea (emisiones diferidas, que ocurren a lo largo de un período de diez años).*

.....”

En donde el propio IPCC, calcula conjuntamente para computar en el año de conversión, tanto las emisiones in situ, como las diferidas.

Paralelamente, el modelo nos calcula un indicador, que denominaremos *intensidad de incremento de área forestal*, que nos viene dado por la relación para una determinada región, del incremento o decremento anual de área forestal, por unidad de Producto Interior Bruto (PIB). Con este indicador, intentamos determinar si la generación de riqueza de una determinada región depende, o no, del consumo o generación de recursos forestales.

El cálculo de este indicador se realiza para ver si existe un acoplamiento entre el aumento o disminución de la masa forestal y el indicador de riqueza PIB. Si es cierto, podríamos representar el segundo submodelo de cálculo de las absorciones y emisiones por variación de las masas forestales de igual manera que en el cálculo del submodelo de las emisiones brutas. Es decir en forma del producto del PIB por una intensidad y por los correspondientes factores de absorción o emisión. Con lo que se podría unificar la forma de todos los submodelos de segundo nivel.

$$\text{Emisiones y absorciones CO}_2 = \text{Coeficiente emisiones y/o absorciones} * \frac{\text{aumento y/o disminución masa forestal}}{\text{PIB}} * \text{PIB}$$

## 4.4.5.2.3 Modelo de segundo nivel para las emisiones netas

Este otro submodelo perteneciente al modelo de segundo nivel o nivel medio, nos calcula las emisiones netas, que se contabilizan para la aplicación del protocolo de Kyoto.

Esta identidad de cálculo de las emisiones netas de CO<sub>2</sub>, consiste en:

$$\begin{aligned}
 \text{Emisiones netas} = & \left( \sum \frac{\text{emisiones}}{\text{tipo de energía utilizada cubrir la demanda energética}} \right) + \\
 & * \frac{\text{energía}}{\text{PIB}} * \text{PIB} \\
 & + \left( \text{Factor de Emisión de CO}_2 * \frac{\text{Producción cemento}}{\text{PIB}} * \text{PIB} \right) \pm \\
 & \pm \left( \frac{\text{Factor de absorción emisión de CO}_2}{\sum \text{Tipo de sumidero} * \text{Crecimiento o decremento de Área}} * \text{Tipo de sumidero} * \text{Crecimiento o decremento de Área} \right)
 \end{aligned}$$

**Relación nº 6**

O lo que es lo mismo:

$$\text{Emisiones netas} = (\text{Emisiones brutas} - \text{Absorciones})$$

**Relación nº 7**

La suma de todos los términos nos producen las emisiones netas de CO<sub>2</sub>, para tres fuentes antropogénicas de dicho gas (energía, deforestación y fabricación del cemento), y las absorciones por el crecimiento de diferentes tipos de vegetación existentes con posterioridad a 1990.

Para crear un modelo que nos calcule un escenario de futuro, nos hace falta saber como varían estos factores con el tiempo:

- PIB.
- Intensidad energética.
- Proporción de los diferentes tipos de energía dentro del vector energético.
- Producción de cemento.
- Área de los sumideros por tipos.

Todas las tasas de crecimiento se calculan a partir de la tasa de crecimiento histórica y de los multiplicadores. La tasa de crecimiento histórica viene determinada por el crecimiento en los años anteriores al inicio del cálculo, y posteriores, en donde tengamos datos estadísticos contrastados internacionalmente. En este caso, con estas tasas de crecimiento históricas, realizamos un escenario de futuro partiendo del año 1990, año de referencia en la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> acordadas en la Cumbre de Kyoto. Con ello obtenemos para cada país o región el montante neto de emisiones, desde ese año hasta el año final de simulación escogido (2015).

A partir de este tipo de modelo simple de segundo nivel, del que ya se han publicado algunos de sus resultados (Congreso Global Warming XII 2001), desarrollaremos un modelo de primer nivel, en el cual se tenga en cuenta la influencia de las decisiones políticas, es decir los "Mecanismos de Flexibilidad", particularmente el Mecanismo de Desarrollo Limpio, propuesto en las diferentes Cumbres, consecuencia del Protocolo de Kyoto del año 1997.

Sólo consideramos este Mecanismo de Flexibilidad, ya que como hemos visto en el capítulo 3, en los países del Anexo B del Protocolo de Kyoto, en conjunto exceden sus emisiones de sus objetivos de reducciones, en tiempo histórico. Por tanto, aún teniendo en cuenta que existen países con importantes reducciones, otros poseen aumentos lo suficientemente importantes como para absorber estas reducciones sobre las metas propuestas en Kyoto, mediante los Mecanismos de Implementación Conjunta y Comercio de Reducción de Emisiones. Siendo el único Mecanismo que queda para reducciones adicionales, el comentado "Mecanismo de Desarrollo Limpio".

#### 4.4.5.3 Modelo de primer nivel o de emisiones políticas

Este modelo de primer nivel se desarrolla bajo la hipótesis de la aplicación de los Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDN). Acuerdo entre un país sin necesidad de reducción y que no sea parte del Protocolo de Kyoto, o país Parte del Protocolo pero necesariamente no incluido en el Anexo B de dicho Protocolo; y otro que sí necesite reducir sus emisiones y por tanto, un país parte del Protocolo de Kyoto (incluido en la lista del Anexo B de dicho Protocolo), en donde el segundo invierte en los primeros, en procesos productivos que den lugar a menos emisiones de las previstas, siendo esta diferencia contabilizada como reducción al segundo país.

Estos procesos productivos que den lugar a menos emisiones de las previstas, son los indicados en el documento “Primer Informe de la Ejecutiva del Mecanismo para un Desarrollo Limpio (2001 – 2002)” (COP 8, 2002), más las tipologías particulares para casos de implementaciones a gran escala.

Se contemplan tres tipologías de mecanismos para su implementación a pequeña escala:

- *Actividades de proyectos de energías renovables con una capacidad de producción máxima de hasta 15 megavatios (o un equivalente apropiado).*
- *Actividades de mejoramiento de la eficiencia energética para reducir el consumo de energía, por el lado de la oferta o de la demanda, hasta el equivalente de 15 gigavatios por hora año.*
- *Otras actividades de proyectos que redujeran las emisiones antropogénicas por las fuentes, y emitieran directamente al menos 15 toneladas equivalentes de dióxido de carbono por año.*

El modelo desarrollado, valora las reducciones de emisiones que pueden considerar como suyas los países Partes del Protocolo de Kyoto (Anexo B), en proyectos de reducción de emisiones en países del resto del mundo (MDL), en función de dos parámetros: la inversión en tanto por ciento del Producto Interior Bruto de los países del Anexo B del Protocolo que dediquen a la inversión en medidas de mitigación, expuesto en el tercer Informe del Cambio Climático (IPCC, Grupo de Trabajo III, 2001), bajo la hipótesis de que se dedica íntegramente en la inversión en el desarrollo de actividades

del susodicho Mecanismo de Desarrollo Limpio; y del coste de la reducción de emisiones de estos mecanismos, en dólares USA 1995 por tonelada de dióxido de carbón no emitido.

Tanto el coste de reducción de emisiones, como la inversión en tanto por ciento de PIB, son los datos que introduciremos como usuario, extrayendo estos datos de las publicaciones especializadas (EIA, 2001).

De esta manera podemos estimar la cantidad total de toneladas de carbón o su equivalente dióxido de carbono, que se podrían contabilizar como reducciones en sus propias emisiones los países Partes del Protocolo de Kyoto, o que pertenezcan al Anexo B. Con ello obtendremos para cada país o región, las denominadas *emisiones políticas*.

Estos proyectos de reducción de emisiones inciden tanto en la economía, como en las propias emisiones de los países afectados (resto del mundo), sobre todo en el valor de su intensidad energética, ya que esta es la variable que parece ser más afectada por la tipología de proyectos descritos anteriormente (de aumento de eficiencia energética). De momento, no se sabe que tipo de repercusión tendrá en las emisiones, si será un bucle de retroalimentación positiva (provoca un mayor desarrollo económico y consecuentemente más demanda energética y más emisiones, incluso que las evitadas) o un bucle de retroalimentación negativa (aumento de la eficiencia energética, sin un consiguiente aumento del crecimiento económico por esta causa, produciendo globalmente una disminución de las emisiones, las emisiones evitadas). La bibliografía especializada y el sentido común, nos dicen, que el caso más probable que se de, es el primero (EIA, 2001) (fenómeno de desbordamiento).

En nuestro modelo, sin embargo adoptamos una posición optimista. Consideraremos que estos proyectos no generarán un aumento de las emisiones en los países en donde son implantados (países del resto del mundo o del Anexo 2, sin obligaciones en cuanto a reducciones de emisiones), siendo el caso más desfavorable, que las emisiones se mantengan tal como aparecen en el escenario de referencia o escenario BaU, construido a partir de las tasas históricas de crecimiento de los diferentes factores que intervienen en las emisiones.

Con ello podremos calcular las emisiones reales, suma de las emisiones netas de los países que hemos denominado del Anexo 1 (países que pertenecen al Anexo B del protocolo de Kyoto) y Anexo 2 (resto de países del mundo), y las compararemos con las emisiones políticas, suma de las emisiones políticas de los países del Anexo 1, y las emisiones netas de los países del Anexo 2. Esto nos producirá un abanico de posibilidades, siendo la más extrema, la más negativa, un mundo en donde se mantienen las emisiones según el escenario BaU o de referencia, y la más positiva, aquella en la cual existe una reducción efectiva de las emisiones mediante la aplicación de estos mecanismos de flexibilidad respecto al escenario de referencia o BaU. De esta manera, el modelo nos permitirá analizar que efectos sobre las emisiones reales tendrán tales Mecanismos de Flexibilidad en el futuro, bajo un punto de vista optimista.

El modelo en sí, es el siguiente:

$$\begin{aligned}
 \text{Emisiones políticas} &= \text{Emisiones netas} - \text{Reducción de emisiones}; \\
 \text{Reducción de emisiones} &= \frac{\text{gnp disponible para inversión}}{\text{Coste reducción}}; \\
 \text{gnp disponible para inversión} &= \text{gnp} * \% \text{ reducción sobre el gnp};
 \end{aligned}$$

#### Relación nº 8

Las salidas del modelo de segundo nivel (emisiones netas y PIB) se utilizan como datos de entrada para este otro modelo, dejando al usuario definir tanto el porcentaje del PIB que se dedicará a inversión en técnicas de mitigación, bajo la hipótesis de que se invierta en Mecanismos de Desarrollo Limpio, como el precio o coste de reducción de las emisiones por unidad no emitida, siempre según la literatura consultada.

En el Apéndice A.1 (Anexos), se encuentra el listado correspondiente al programa en lenguaje C++ que contiene ambos modelos.

