

# IMPACTO DEL CRECIMIENTO ECONÓMICO INDUSTRIAL SOBRE LOS RECURSOS ENERGÉTICO E HÍDRICO EN COSTA RICA

Luisa M. Díaz Sánchez<sup>1</sup>, Pedro A. Morales-Carvajal

<sup>1</sup>Cámara de Industrias de Costa Rica, Apdo.10003-1000 San José, Costa Rica

Recibido 23 de mayo, 2010; aceptado 10 de noviembre, 2011

## Resumen

Se ha establecido una relación empírica entre el consumo de agua, el consumo de energía y el PIB industrial para el caso de Costa Rica. Esta relación puede ser útil para predecir las presiones ejercidas sobre los recursos naturales debidas al crecimiento del PIB del sector.

Estas predicciones permitirían establecer políticas públicas y sectoriales relacionadas con la gestión de agua y energía, que permitirán evaluar al sector en particular para alcanzar la meta de carbono neutralidad para el 2021. Adicionalmente se han establecido indicadores de intensidad energética ( $7,1 \pm 0,5$ ) TJ / millón de dólares de PIBi, intensidad hídrica ( $(1,0 \pm 0,4) 10^5$  m<sup>3</sup> / millón de dólares de PIBi) e intensidad de carbono (217 CO<sub>2</sub> kg equivalente / millón dólares de PIBi) para el sector industrial de Costa Rica los cuales pueden ser utilizados como referencias para la evaluación ambiental del sector en el futuro.

## Abstract

An empirical relationship between water consumption, energy consumption and industrial GDP was established, for the case of Costa Rica. This relationship may be useful in predicting the pressure exerted on natural resources by the effects derived from growth of GDP. These predictions will make possible to establish public and sectorial policies related to water and energy management, and assesses the sector in order to achieve the national goal of carbon neutrality by 2021. Additionally, indicators of energy intensity ( $7,1 \pm 0,5$ ) TJ / million dollars of GDP<sub>i</sub>), water intensity ( $(1,0 \pm 0,4) 10^5$  m<sup>3</sup> / million dollars of GDP<sub>i</sub>) and carbon intensity (217 CO<sub>2</sub> kg equivalent / million dollars of GNP<sub>i</sub>) for the industrial sector of Costa Rica were established and could be used as reference for environmental assessment of the industrial sector in the future.

**Palabras clave:** Indicador de intensidad energética, indicador de intensidad hídrica, intensidad de carbono, elasticidad hídrica y energética.

**Key words:** Energy intensity indicator, water intensity indicator, carbon intensity, water and energy elasticity.

## I INTRODUCCIÓN

La Estrategia Nacional de Cambio Climático<sup>[1]</sup> tiene como objetivo que la economía costarricense alcance la carbono neutralidad al 2021. Esto implica la acción comprometida de todos los sectores de la economía. En ese documento director, se han definido seis ejes de acción siendo los principales la mitigación y la adaptación, alrededor de los cuales giran los ejes de métricas, desarrollo de capacidades, financiamiento y sensibilización/educación.

Según la evaluación del inventario de emisiones de gases de efecto invernadero publicado en 2006 por el Ministerio de Ambiente Energía y Telecomunicaciones-MINAET<sup>[2]</sup>, el sector

---

· Autor para correspondencia: ldiaz@cicr.com

industrial costarricense ocupa la quinta posición entre los emisores de gases de efecto invernadero (GEI). Este sector contribuye con aproximadamente un 6% a las emisiones totales equivalentes de CO<sub>2</sub> en el país, precedido por la agricultura con un 7%, la gestión de residuos con un 12%, la ganadería con un 29%; mientras que la generación de energía es el mayor contribuyente con un 46%. Es por lo anterior que las acciones de mitigación se deben enfocar de manera primordial en estos sectores.

Por otra parte, según las estadísticas económicas del Banco Central de Costa Rica<sup>[3]</sup> el sector industrial costarricense contribuye con un 22% del PIB nacional, y con un 12% del empleo nacional. El PIB industrial (PIBi) ha mantenido durante los últimos años un crecimiento que ronda el 8%, con un decrecimiento estimado del 4,2% para el año 2009; sin embargo se espera que una vez superada la crisis económica internacional se acelere nuevamente.

Desde hace más de cuatro años, la administración central y los representantes de los sectores productivos han manifestado de manera clara la necesidad e interés que tiene el país de crecer, esto es de aumentar su producción y con ello el ingreso *per capita* pero con la condición de no comprometer los recursos para las generaciones futuras.

Este crecimiento económico se encuentra indudablemente asociado a un mayor consumo de recursos, que a su vez implica una mayor presión sobre el ambiente; lamentablemente, a pesar de tener claridad de que el desarrollo debe ser sostenible, este factor es pocas veces considerado en los procesos de definición y establecimiento de políticas para la promoción del mismo.

Un modelo de uso frecuente en el ámbito internacional son los denominados indicadores de estado, presión y respuesta. Estos indicadores permiten determinar de manera directa y con datos de fácil acceso, los impactos positivos y negativos que una acción sostenida en el tiempo tiene sobre los recursos. La relación entre la cantidad de recursos (agua o energía) utilizados para producir una cantidad determinada de riqueza en un momento dado, ya sea de economías en su totalidad, de subsectores o empresas en particular, se denomina indicador de intensidad<sup>[4] y [5]</sup>.

Otro tipo de indicador es el que mide la variación en el consumo de los recursos en el tiempo o tasa de variabilidad, el cual determina la rapidez de agotamiento de un recurso determinado en condiciones de crecimiento económico invariable. Estos indicadores han sido definidos por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE)<sup>[6]</sup> como Indicadores de Desarrollo Sustentable (DEI por sus siglas en inglés) cuya utilidad estriba en la posibilidad de determinar el acercamiento que una economía tiene al Desarrollo Sostenible.

En Costa Rica, solamente se han establecido macro-indicadores de emisiones de GEI, que únicamente cuantifican emisiones pero no las asocian a la productividad de los sectores, lo cual es un factor básico para la definición de políticas públicas y privadas de promoción de uno u otro tipo de actividad productora o tecnología de producción<sup>[7]</sup>.

Por otra parte, tampoco se han elaborado indicadores de presión e intensidad para los sectores y mucho menos, se han establecido correlaciones que permitan determinar la presión que una variación de la economía puede causar sobre los principales recursos del país: la energía y el agua.

Se busca en este trabajo mostrar las interacciones existentes entre la intensidad en el uso de estos recursos y el crecimiento económico industrial del país (medido por su producto interno bruto), para proponer un modelo que permita determinar los costos ambientales marginales (indicador de presión) asociados a un aumento en el PIBi. Este modelo estará basado en el concepto económico de la elasticidad, el cual establece las relaciones entre los costos unitarios (indicadores de intensidad) y los marginales (indicadores de presión).

Este instrumento busca facilitar la toma de decisiones en los procesos de definición de políticas, estrategias y acciones tanto del sector público como privado, para así facilitar el alcance del objetivo de C-neutralidad en 2021.

## II METODOLOGÍA

### *Determinación de los indicadores de intensidad energética e hídrica*

Para la determinación de los indicadores de intensidad hídrica y energética se realizaron cálculos de la energía total y el volumen de agua consumidos por el sector industrial por año. Para el caso del análisis energético se utilizaron los datos de consumo de energías primaria y secundaria reportada para el sector industrial por la Dirección Sectorial de Energía del MINAET<sup>[8]</sup>. En el cuadro 1 se muestran los consumos totales para el período 2005-2008.

**CUADRO 1**  
CONSUMO TOTAL ANUAL DE ENERGÍA EN EL SECTOR INDUSTRIAL / TJ.

	2005	2006	2007	2008
Energía secundaria	18714	19569	20499	20671
Energía Primaria	13476	14926	18999	18409
Energía total	32190	34495	39498	39080

Fuente: Memoria estadística del sector energía 1989-2008. Dirección Sectorial de Energía.

En el Cuadro 2 se resumen los consumos anuales de agua del sector industrial. Estos volúmenes se calcularon a partir de los reportes de caudales ( $L s^{-1}$ ) facturados por concepto del Canon de Aprovechamiento reportados por el Departamento de Aguas del MINAET, para los años 2005 a 2008<sup>[9]</sup>.

**CUADRO 2**  
CONSUMO TOTAL ANUAL DE AGUA EN EL SECTOR INDUSTRIAL /  $km^3$ .

2005	2006	2007	2008
0,757	0,717	0,617	0,527

Fuente: Construcción propia a partir de los reportes del Canon de Aprovechamiento del Departamento de Aguas-MINAET.

El valor anual del PIB<sub>i</sub> en millones de dólares se muestra en el cuadro 3. Estos valores se calcularon a partir de los datos en colones constantes del Banco Central de Costa Rica y las tasas de cambio reportadas por dicho organismo regulador, para el ciclo anual en estudio.

**CUADRO 3.**  
EVOLUCIÓN DEL PIB<sub>i</sub> EN MILLONES DE US\$.

2005	2006	2007	2008
3.914	4.397	5.044	5.506

Fuente: Banco Central de Costa Rica. Estadísticas económicas

A partir de los cálculos del consumo anual de energía y agua, cuadros 1 y 2 respectivamente, y con los datos de PIB<sub>i</sub> para los mismos años, se calcularon los indicadores de intensidad energética e hídrica del sector para cada uno de los años en estudio.

*Determinación de la intensidad de carbono*

Para la determinación del indicador de intensidad de uso de carbono (masa equivalente de CO<sub>2</sub>/millón de PIB<sub>i</sub>), se utilizó la metodología del IPCC (Panel Intergubernamental contra el Cambio Climático)<sup>[10]</sup>, con el objetivo de que la información obtenida sea comparable con la elaborada por la Estrategia Nacional de Cambio Climático y los reportes de los países ante los organismos internacionales que administran las convenciones relativas al cambio climático.

*Tasas de variabilidad de los recursos hídrico y energético*

Las tasas de variabilidad de los recursos y el crecimiento económico del sector industrial, también llamadas tasas de crecimiento proporcional  $k_z$ , se calcularon a partir de los datos de evolución de consumos y evolución del PIB<sub>i</sub> en el tiempo ( $t$ ), lo cual se puede expresar matemáticamente como sigue:

$$\frac{dz}{dt} = k_z z \quad (1)$$

que puede integrarse

$$\int \frac{dz}{z} = \int k_z dx \quad (2)$$

Se obtiene la expresión matemática de la ecuación 3 que permite calcular la tasa de variación para los consumos de energía y agua; así como para la intensidad de carbono del sector.

$$\ln z = k_z t + cte \quad (3)$$

donde:

$z$  : es la cantidad de recurso o PIB<sub>i</sub> en un momento dado

$t$  : es el tiempo

$k_z$  : es la tasa de variabilidad del recurso  $z$  o del PIB<sub>i</sub> en el tiempo.

Los valores de  $k_z$  se obtuvieron por simple ajuste de cuadrados mínimos de los pares  $\ln z$  y  $t$ .

### III RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### *Indicadores de intensidad energética e hídrica y determinación de la intensidad de carbono de la actividad industrial.*

Los datos mostrados en el Cuadro 1, evidencian que el consumo total de energía del sector industrial aumenta, tal y como se discutirá adelante, a una razón del 7% anual. Sin embargo al calcular la intensidad en el uso de este recurso, se encuentra que el sector ha mejorado su indicador de intensidad, pasando de  $8,2 \pm 0,5$  TJ por millón de dólares de PIB<sub>i</sub> a  $7,1 \pm 0,5$  TJ por millón de dólares de PIB<sub>i</sub>. La Figura 1 muestra esta tendencia decreciente.

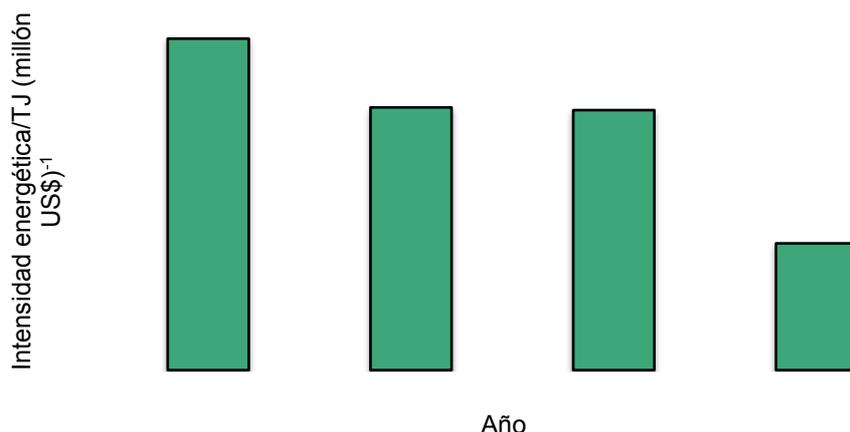


FIGURA 1. Intensidad energética del sector industrial para el período 2005-2008.

Sin embargo al calcular la intensidad de carbono del sector industrial, se encuentra que este indicador tiene un comportamiento inverso al de la intensidad energética, tal y como se muestra en la Figura 2. El sector pasó de una intensidad de carbono de 186 kg de CO<sub>2</sub> por cada millón de dólares del PIB; a generar 217 kg por la misma cantidad de PIB.

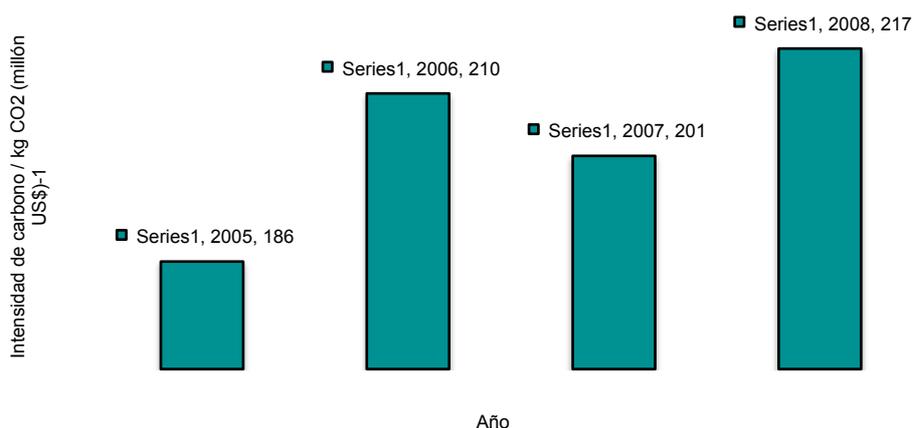


FIGURA 2. Intensidad de uso de carbono del sector industrial para el período 2005-2008.

Un análisis más detallado de los consumos de energía del sector industrial evidencia un aumento significativo del uso de la leña y el coque como fuentes energéticas primaria y secundaria en los procesos industriales. Las variaciones porcentuales anuales de ambos materiales con respecto al consumo total de energía se muestran en el Cuadro 4.

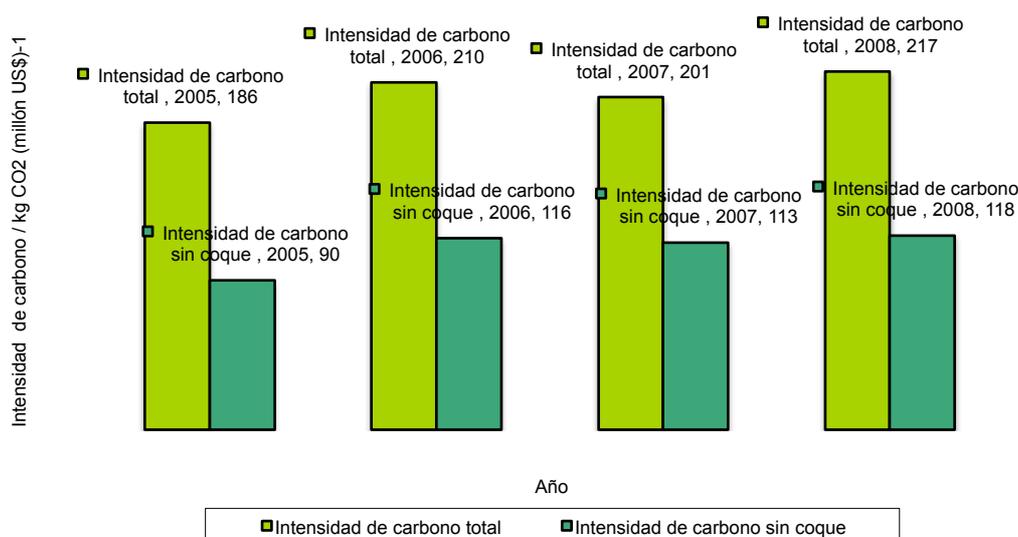
**CUADRO 4**  
VARIACIÓN PORCENTUAL ANUAL DE LAS PRINCIPALES FUENTES ENERGÉTICAS DEL SECTOR INDUSTRIAL.

Material	2005	2006	2007	2008
Coque	4,5	4,8	4,6	7,0
Leña	8,2	11,0	10,8	12,4
Bunker	18,1	17,0	15,0	14,1
Electricidad	19,3	19,3	17,8	17,6
Diesel	10,3	9,6	8,8	8,6

Fuente: Construcción propia a partir de los datos de DSE.

La composición de la matriz energética del sector industrial ha variado en los últimos años, pasando de cerca de un 12% de energía proveniente de fuentes de altas emisiones de CO<sub>2</sub> por julio (leña y coque) en el año 2005, a un poco más del 19% en el 2008. Para el caso de la electricidad y el diesel el consumo del sector se ha mantenido prácticamente constante en los últimos dos años. Por otra parte el consumo de Bunker ha disminuido del 18% al 14% en el mismo período.

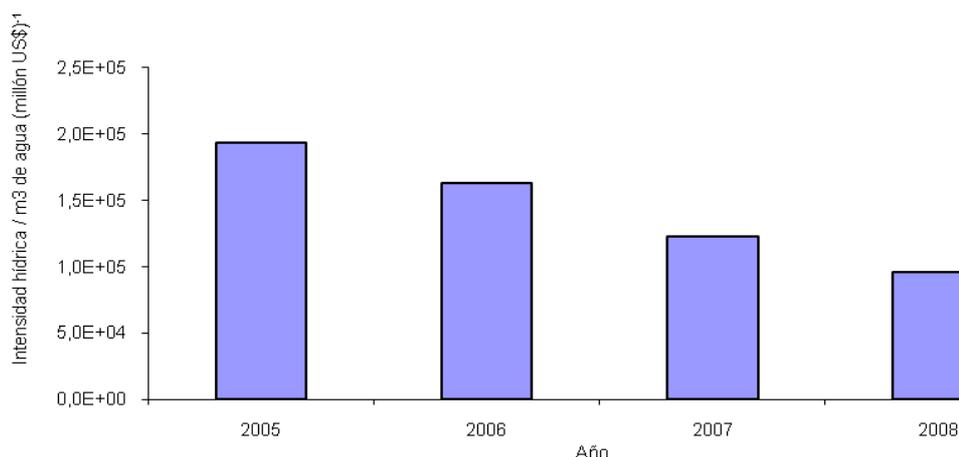
Se evidencia que la sustitución de materiales, principalmente de búnker, se está dando con coque y leña, combustibles que tienen unos factores de conversión a CO<sub>2</sub> equivalentes muy altos y que explican de alguna manera la aparente relación inversa entre la intensidad energética (TJ / millón dólares PIB<sub>i</sub>) y la intensidad de carbono (kg CO<sub>2</sub> eq / millón dólares de PIB<sub>i</sub>) del sector.



**FIGURA 3.** Comparativo de la intensidad de uso de carbono del sector industrial para el período 2005-2008, entre un escenario sin coque y la situación actual.

La Figura 3, muestra las diferencias en emisiones de CO<sub>2</sub> del sector considerando o no al coque en la matriz; en el caso de la leña no se realiza la estimación ya que se parte del supuesto de que este carbono pertenece al ciclo biogénico y ha sido compensado de previo. Se deja para un estudio posterior el análisis comparativo y de escenarios de sustitución de coque y leña por fuentes más limpias.

Para el caso del consumo de agua, se encuentra que el sector industrial ha mejorado su intensidad hídrica en los últimos años, pasando de  $(2,1 \pm 0,4) \times 10^5$  m<sup>3</sup> por millón de dólares de PIB<sub>i</sub> a  $(1,0 \pm 0,4) \times 10^5$  m<sup>3</sup> por millón de dólares de PIB<sub>i</sub>, es decir la intensidad en el uso del recurso hídrico en el sector ha mejorado e indica una tendencia hacia el uso más sostenible de este recurso.



**FIGURA 4.** Intensidad hídrica del sector industrial para el período 2005-2008.

Es importante notar que en el año 2006 entró en vigencia el Decreto Ejecutivo N° 32868 MINAE publicado en agosto de 2005, mediante el cual se ajustó la tarifa por canon de aprovechamiento a valores reales. Este decreto representó en promedio un aumento cercano al 500% del monto establecido hasta la fecha por caudal extraído, siendo el sector industrial al que mayor aumento porcentual se le aplicó en razón del uso consuntivo que hace del agua.

Una interpretación a esta disminución en el consumo de agua (de 0,78 km<sup>3</sup> en el 2005 a 0,53 en el 2008), con la consecuente disminución en la intensidad, se puede entonces basar en que el establecimiento de una regulación estricta ayuda a la conservación y uso racional de los recursos. Se requiere una observación de un período mayor que permita estabilizar el consumo, para poder evaluar el impacto de las acciones de ahorro y uso racional implementadas por el sector.

*Tasas de variabilidad de los consumos de energía, de agua y del PIB<sub>i</sub>*

De acuerdo a lo establecido en las ecuaciones 1 a 3, indicadas anteriormente se estimaron las tasas de variación para el consumo de energía, del consumo de agua y del PIB<sub>i</sub>. El cuadro 5 resume los valores calculados de  $k$  mediante un análisis de regresión lineal utilizando Excel®.

**CUADRO 5**  
RESUMEN DE LAS TASAS DE VARIACIÓN PARA LOS CONSUMOS  
DE RECURSOS Y EL PIB<sub>i</sub> EN EL PERÍODO 2005-2008.

Año	ln(Energía/TJ)	ln (Agua/ km <sup>3</sup> )	ln (PIB <sub>i</sub> /millón US\$)
2005	10,379	-0,278	8,272
2006	10,449	-0,333	8,389
2007	10,584	-0,483	8,526
2008	10,573	-0,641	8,614
$k_i/año^{-1}$	$(7 \pm 2) \times 10^{-2}$	$-(12 \pm 2) \times 10^{-2}$	$(11,6 \pm 0,6) \times 10^{-2}$

Las tendencias de las variaciones son acordes con lo mostrado en la variabilidad de los indicadores de intensidad energética e hídrica, donde en ambos casos se mostró una disminución en el consumo para la misma cantidad de dólares de PIB<sub>i</sub> generado por año.

Si se parte de la premisa de que para cualquier proceso en el cual se puedan establecer relaciones causa-efecto entre dos variables (ej.  $z$  y  $PIB_i$ ), es posible calcular la elasticidad de esa relación, que se define matemáticamente como:

$$\varepsilon = \frac{(\partial z/z)}{(\partial PIB_i/PIB_i)} = \frac{k_z}{k_{PIB_i}} \quad (4)$$

donde:

$z$ : recurso (energía o agua) en un momento dado.

La ecuación 4 se puede escribir como:

$$\varepsilon = \frac{(\partial z / \partial PIB_i)}{(z / PIB_i)} \quad (5)$$

Una vez obtenidas las tasas de variación en el tiempo para cada una de las variables, es posible calcular las elasticidades de los sistemas y de allí inferir la presión que un incremento porcentual del  $PIB_i$  puede causar sobre un recurso dado, o sea  $(\partial z/\partial PIB_i)$ .

Se debe tener en cuenta que la razón  $(z/PIB_i)$  es un valor que se obtiene para un momento dado, es decir representa la fotografía del momento de referencia, entonces la ecuación 5 se puede escribir como sigue,

$$\frac{\partial z}{\partial PIB_i} = \varepsilon \left[ \frac{z}{PIB_i} \right] \quad (6)$$

Para pequeños intervalos de tiempo ( $\sim 1$  año), la ecuación (6) puede escribirse como

$$\Delta z \approx \varepsilon \left[ \frac{z}{PIB_i} \right] \Delta PIB_i \quad (7)$$

La ecuación 7, constituye una expresión matemática directa mediante la cual se podría calcular la presión que el incremento del  $PIB_i$  en Costa Rica pueda causar sobre los recursos energía y agua, para el caso de que la estructura productiva nacional y la matriz energética del sector se mantengan constantes.

**CUADRO 6**  
DETERMINACIÓN DE LA CONSTANTE DE PRESIÓN SOBRE EL RECURSO  $K_p$   
PARA AGUA Y ENERGÍA

	H <sub>2</sub> O	Energía
$\varepsilon$	-1,034	0,603
<b>[Intensidad]<sub>2008</sub></b> (cantidad/millón $PIB_i$ )	$(1,0 \pm 0,4) \times 10^5$	$7,1 \pm 0,5$
$k_p$	$-(1,0 \times 10^5)$	4,3

Si se sustituyen en la ecuación 12 los valores de  $k_p$  obtenidos para cada caso se llega a las siguientes expresiones empíricas:

$$\begin{aligned} \text{Presión sobre recurso hídrico:} & \quad \Delta(H_2O) = -(1,0 \times 10^5) \Delta PIB_i \\ \text{Presión sobre recurso energético:} & \quad \Delta E = 4,3 \Delta PIB_i \end{aligned}$$

Para el caso del recurso hídrico significa que dadas las condiciones particulares del descenso de consumo por efecto de una regulación se espera que por cada incremento de una unidad del PIB del sector se disminuya en  $10^5$  veces la cantidad consumida de agua, sin embargo tal y como se mencionó anteriormente este es un resultado que requiere una revisión más detallada.

De suma importancia es la expresión obtenida para el caso de la energía pues, de acuerdo a esta expresión, por cada unidad porcentual de aumento del producto interno bruto industrial se requerirá un 4,3% más de energía. Este consumo extra genera no solo una presión en el esquema energético nacional, sino que de manera adicional, en las condiciones de estructura energética del sector mostrada, es probable que las fuentes de energía que se incrementen sean aquellas que generan una mayor cantidad de emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub> por terajulio.

Ante la perspectiva mostrada se requiere de una acción inmediata, ya sea de manera voluntaria, por parte del sector, para disminuir el consumo de fuentes de energía sucia y aplicar herramientas de producción limpia que busquen mejorar la eficiencia energética tanto de las empresas individuales como del sector en general; o el establecimiento de medidas obligatorias que regulen el uso de combustibles con altos índices de emisión de CO<sub>2</sub>, pero que deben también acompañarse de políticas nacionales claras para la facilidad de acceso a fuentes energéticas más limpias.

#### IV REFERENCIAS

1. Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones. *Estrategia Nacional de Cambio Climático*, Costa Rica, **2009**.
2. Instituto Meteorológico Nacional, *Inventario de Gases de Efectos Invernadero*, **2005**. Costa Rica. Consultado el 15 de julio de 2009.  
[http://clglobal.inm.ac.cr/pdf/gases/inventario\\_de\\_GEI\\_2005.pdf](http://clglobal.inm.ac.cr/pdf/gases/inventario_de_GEI_2005.pdf).
3. Banco Central de Costa Rica. *Indicadores Económicos*. Consultado el 15 de octubre de 2009.  
[http://indicadores\\_economicos.bccr.fi.cr](http://indicadores_economicos.bccr.fi.cr).
4. Vera, I., Langlois, L. Energy indicators for sustainable development. *Energy*. [www.elsevier.com/locate/energy](http://www.elsevier.com/locate/energy). **2007**, 32, 875-882. Consultado el 14 de diciembre de 2008
5. Velazquez, E. An input-output model of water consumption: Analysing intersectorial water relationships in Andalucía. *Ecological Economics*. [www.elsevier.com/locate/ecocon](http://www.elsevier.com/locate/ecocon). **2006**, 56, 226-240. Consultado el 26 de febrero del 2009.
6. OECD Environmental Performance and Information Division. *OECD Environmental Indicators: Development, Measurement and Use*. Reference paper. Paris. **2003**.
7. International Atomic Agency, United Nations Department of Economic and Social Affairs, International Energy Agency, Eurostat, European Environment Agency. *Energy indicators for sustainable development: guidelines and methodologies*. Viena, **2005**.

8. Alvarado, F., Fernández, D., Martínez, F., Picado, L., Ruiz, G. *Memoria estadística del sector energía de Costa Rica. 1989-2008*. DSE/MINAET San José, **2009**, 56-70.
9. MINAET, Departamento de Aguas, **2009**. Costa Rica. Consultado el 12 de Octubre de 2009.<http://www.drh.go.cr:8008/rp/reportDetail.action?reportId=24242>
10. Panel Intergubernamental contra el Cambio Climático-IPCC. *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, **2006**, Cap. 2.