

Petróleo y sostenibilidad energética: caso colombiano

*Sergio Hernando Lopera Castro*¹

Aportes, Revista de la Facultad de Economía, BUAP, Año X, Número 28, Enero -Abril de 2005

Introducción

En este trabajo aportamos elementos para avanzar hacia un modelo de extracción de petróleo que conduzca a una política energética sostenible. Es necesario avanzar inicialmente con dos elementos que son en esencia contradictorios. De un lado, a partir de los lineamientos propuestos por el Consenso de Washington² los contratos petroleros han venido siendo cambiados, con el argumento de hacerlos más competitivos en un contexto globalizado. Así, la no existencia de obstáculos a la inversión traerá, según el Consenso, inversión, crecimiento y

desarrollo. En este sentido, se ha argumentado que el aumento de exportaciones de crudo permitirá pagar la deuda externa de los países de forma más rápida.³ De otro lado, es cada vez más evidente la necesidad de hacer una explotación de petróleo que tome en cuenta su carácter agotable⁴ y los efectos de su combustión sobre el medio ambiente, es decir pensar su gestión desde una perspectiva sostenible.

¹ Profesor Asociado Universidad Nacional de Colombia, Grupo de Economía y Medio Ambiente-Instituto de Energía, email: shlopera@perseus.unalmed.edu.co

² Este consenso propone las siguientes medidas: –disciplina presupuestaria; –cambios en las prioridades del gasto público (de áreas menos productivas a sanidad, educación e infraestructuras); –reforma fiscal encaminada a buscar bases imponibles amplias y tipos marginales moderados; –liberalización financiera, especialmente de los tipos de interés; –búsqueda y mantenimiento de tipos de cambio competitivos; –liberalización comercial; –apertura a la entrada de inversiones extranjeras directas; –privatizaciones; –desregulaciones; –garantía de los derechos de propiedad.

³ En el caso colombiano, por sólo citar uno, las cifras hablan por sí solas y hoy el país se encuentra con una mayor deuda, creciendo a una tasa bastante modesta y en condiciones de desarrollo similares a las de hace 20 años. Veamos: En 1990, el 33% del presupuesto total del Estado era destinado a inversiones, en el 2000 solamente se destina el 15%. Contrariamente, en 1990 se destinaba el 10% del presupuesto total del Estado al servicio de la deuda, en el 2000 se destinaba del orden del 33%. Lo paradójico es que la deuda pública ha pasado de 12'453.442 millones de pesos en 1991 a 75'443.058 millones de pesos en 1999. Es decir, ha aumentado el 625% en 9 años. [Cabrera y González, 2000].

⁴ Recordemos que Hotelling propone [1931] una gestión según la cual la cantidad del recurso puede ser asimilado a un stock de capital bajo tierra. Así, el objetivo del propietario del recurso será maximizar el valor presente neto de su stock. De esta manera, si el propietario extrae rápidamente las reservas de la mina, hará caer el precio a cero.

En el primer caso los resultados empíricos son bastantes reveladores, pues no obstante los países han abierto sus fronteras a la inversión y flexibilizado sus modelos contractuales, sus deudas han aumentado incluso en aquellos casos donde las exportaciones de materias primas han aumentado de forma sensible. La Tabla 1 muestra el aumento de la deuda externa de 1990 a 2001 para algunos países.

Es evidente que el proceso de apertura económica no ha conducido a un alivio de la deuda externa de la mayoría de los países, por el contrario ésta se ha incrementado de forma bastante importante empujada prin-

cialmente por el endeudamiento privado. Es de anotar que muchos de los países en desarrollo exportadores de materias primas siguen dependiendo de forma importante de las exportaciones de este tipo de productos y sus deudas externas siguen en aumento, incluso en el caso en el cual los volúmenes de exportación han aumentado de forma importante.

Consideramos importante recordar que el Club de Roma⁵ había planteado el problema del agotamiento de recursos naturales como un freno al crecimiento, lo cual llevó a repensar la relación entre agotamiento de recursos naturales y crecimiento económico,⁶ Por otro

Contrariamente, si extrae las reservas lentamente, el precio se hará mayor y por ende los ingresos serán más importantes. De otro lado, como según el modelo de Hotelling para propietario de las reservas éstas no son otra cosa que un capital bajo tierra, su tasa de producción estará determinada por la tasa de interés del mercado. Así, para el propietario de las reservas será más atractivo extraerlas a una tasa de interés alta con fin de obtener capital que pueda colocar en el mercado financiero. De otro lado si la tasa de interés es baja, para el propietario de reservas es más atractivo dejar las reservas bajo tierra y así la tasa de producción será baja.

⁵ El Club de Roma fue un grupo compuesto por empresarios, científicos y políticos que en 1970 encargó a un grupo de investigadores del Massachusetts Institute of Technology bajo la dirección del profesor Dennis L. Meadows, la realización de un estudio sobre las tendencias y los problemas económicos que amenazan a la sociedad global. Los resultados fueron publicados en marzo de 1972 bajo el título «Los Límites del Crecimiento». Aquí utilizamos algunas veces la expresión *El Club de Roma* y otras *El Informe de Meadows* para hacer referencia al mismo estudio.

⁶ Es claro que la crítica a la gestión de recursos agotables va más allá de la discusión de la introduc-

TABLA 1
VARIACIÓN DE LA DEUDA EXTERNA DE 1990 A 2001 PARA ALGUNOS PAÍSES

País	Deuda 1990 (Millones dólares)	Deuda 2001 (Millones dólares)	Aumento porcentual respecto a 1990
Brasil	119 877	226 067	88%
Argentina	62.730	140 681	123%
México	104 431	154 447	48%
Chile	19 227	38 520	100%
Colombia	17 993	33 180	84%
Filipinas	29 955	52 164	74%
India	83 800	98 400	17%

lado los impactos ambientales y sus respectivas consecuencias económicas y sociales han llevado a pensar en la necesidad de garantizar un medio ambiente limpio.⁷ En este sentido la discusión sobre sostenibilidad de recursos naturales esta al orden del día y podríamos decir que de cierta manera va en contravía con los lineamientos del Consenso de Washington.

En lo que concierne a la explotación de recursos naturales y agotables, no existe una idea unificada.⁸ Así, para Goodland y Ledec [1987], citados por Pezzey [1986], el desarrollo sostenible implica que los recursos minerales no renovables sean explotados de tal forma que no se impida el acceso a ellos por parte de las generaciones futuras. Así el desarrollo sostenible implica que la extracción de los recursos energéticos no renovables sea realizada a tasas lo suficien-

ción de ajustes al modelo en el modelo de gestión óptima. La discusión implica un cambio de paradigma, ya que como nos enseñó N.Geurgescu-Roegen [1971], que todo proceso económico es un proceso de transformación de materia y energía.

⁷ Los economistas neoclásicos han buscado resolver los problemas planteados por el Club de Roma introduciendo los recursos naturales en los modelos económicos. Su objetivo ha sido encontrar modelos de crecimiento óptimo con recursos naturales suponiendo que existe sustitución perfecta entre los diversos factores de producción. Así, según Solow [1974a] la posibilidad de sustituir otros factores por recursos naturales puede permitir que el mundo pueda continuar su camino sin recursos naturales, pues su agotamiento no es más que un evento y no una catástrofe [Solow, 1974: 29-46].

⁸ En general el informe Brundtland nos habla de manera implícita sobre el uso de los recursos cuando nos propone la siguiente definición de desarrollo sostenible: "Development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs."

temente bajas, de tal forma que se garantice la transición ordenada a fuentes de energía renovable. [Pezzey, 1989: 56-57]

Según Solow [1986], citado por Pezzey [1989], para garantizar un consumo constante en el tiempo, una sociedad debe invertir las rentas obtenidas de la explotación de recursos agotables en capital reproducible. Esto se puede interpretar como el ahorro de una cantidad definida de capital (definido de manera apropiada) que es mantenido intacto. Por otro lado, el consumo se puede interpretar como la tasa de interés sobre el patrimonio. [Pezzey, 1989: 59].

Para Pearce [1998] el criterio de sostenibilidad requiere que las condiciones de acceso al recurso sean iguales para cada generación. Según este autor el desarrollo sostenible implica a) Limitar las tasas de extracción de recursos de tal manera que se mantengan por debajo de las tasas de regeneración natural, en el caso de un recurso renovable; y, por debajo de las tasas de sustitución en el caso de un recurso no renovable.⁹ b) La utilización del medio ambiente de tal manera que las tasas de emisión de desechos sean inferiores a las tasas de asimilación del ecosistema.¹⁰

⁹ Según Pearce [1998] deben cumplirse tres condiciones: 1) que la elasticidad de sustitución entre el capital natural y el capital manufacturado sea mayor que uno, ó 2) que la elasticidad de sustitución sea igual a 1 y que la parte del capital manufacturado en el PNB sea mayor que la del capital natural, ó 3) que el cambio técnico sea de tal magnitud que su efecto sobre la tasa de descuento pueda despreciarse.

¹⁰ Según Pearce [1976] es difícil lograr tasas sostenibles en el caso de los recursos agotables, ya que los "seguidores de la sostenibilidad" tienden a pensar en términos de la sustitución de un stock de un recurso agotable por uno renovable. Se piensa

A continuación proponemos una metodología para implementar un modelo de extracción de petróleo que conduzca a una gestión energética sostenible. En este caso proponemos una metodología para calcular la sustitución de petróleo por electricidad obtenida de fuentes renovables y por aceite de palma africana. También proponemos los montos a invertir por barril con el fin de garantizar la descontaminación del aire, el pago de los impactos ambientales y la protección del capital natural crítico.

Como explotar el petróleo de tal forma que se logre una política energética sostenible
Coincidimos con Victor [1991], Costanza y Daly [1992] y Pearce [1998] en que para lograr una política sostenible en el caso de recursos agotables es necesario garantizar que sus tasas de extracción sean menores o a la sumo iguales a las tasas de sustitución de estos por recursos renovables. Veamos como un modelo de extracción sostenible de un recurso renovable puede ser asimilado a uno no renovable.

Los modelos de explotación sostenible para un recurso renovable exigen mantener unas tasas de explotación por debajo de una cota impuesta por la tasa de renovación del recurso. Así, en el caso de una población de peces, la tasa de crecimiento natural debe ser:

$$r = b - m$$

Donde

igualmente que la sostenibilidad es algo positivo, y que por tanto se debe optimizar la tasa de uso. Pearce concluye que en estos términos la sostenibilidad puede implicar el uso de los servicios ambientales en un gran espacio de tiempo y en teoría de forma infinita. [Pezzey, 1989: 59]

r : tasa de crecimiento natural
b : natalidad
m : mortalidad

Si X es el tamaño de la población, entonces el cambio de la población en el tiempo será:

$$X' = dx/dt = r * x$$

Entonces

$$X(t) = X(0)e^{rt}$$

Empíricamente encontramos que:

$$X' = r(x) * X$$

Donde: r(x) disminuye si X aumenta ya que $r(x) = X'/X$

Así, el cambio de la población en el tiempo será:

$$X' = r * X(1 - X/K)$$

Donde:

K: capacidad de carga o nivel de saturación

En el caso de recursos agotables es evidente que la tasa de crecimiento del recurso es cero;¹¹ sin embargo, si existen recursos sustituibles, se puede hablar de tasa de sustitución. En el caso del petróleo,

¹¹ Aquí se supone que estamos hablando de unas reservas conocidas y definidas. Sin embargo, las reservas pueden aumentar más no puede pensarse que esto implique una tasa de crecimiento del recurso diferente de cero. Esto debido, a que desde el punto de vista físico nada ha sido creado.

la aplicación del cuarto principio operacional propuesto por la escuela termodinámica¹² tiene como propósito garantizar que la tasa de extracción no rebase ni la tasa de sustitución por otras formas de energía renovables, ni la tasa de asimilación del ecosistema. Así, la tasa de extracción puede escribirse de la siguiente manera:

$$dq/dt \leq dE_{re}/dt \quad \text{y} \quad dq/dt \leq dq_{ac}/dt$$

Donde,

- q : volumen extraído.
- E_{re} : Energía renovable equivalente.
- q_{ac} : volumen de asimilación crítico.

Para el caso de yacimientos de petróleo, una política energética sostenible debe considerar al menos los cuatro elementos siguientes:

- a) Invertir parte de la renta petrolera en la sustitución de petróleo por una forma de energía renovable E_{re} .
- b) Garantizar la protección del capital natural crítico.¹³ Para garantizar el

respeto de las funciones medioambientales críticas, es decir, aquellas funciones ambientales que sirven de soporte a la vida.

- c) Establecer unos criterios para garantizar el pago de los *servicios ambientales* tales como la contaminación del aire causada por las emisiones de gas contaminante, del suelo y de las aguas causadas por los desechos líquidos y sólidos.
- d) Establecer las retribuciones por impactos causados por la explotación del recurso sobre la economía y las condiciones de vida locales.

Para avanzar en el desarrollo de una metodología que permita proponer una explotación de petróleo en el marco de una política sostenible debemos construir un indicador para caracterizar la explotación con el fin de saber que tan lejos estamos de la sostenibilidad en el sentido de conservación de la cantidad de recurso. En este sentido proponemos construir un *indicador de sostenibilidad* para determinar si el proceso de extracción de petróleo conduce a una política energética sostenible o no. De esta manera, proponemos utilizar el resultado de la *ley de Hartwick* [1977].¹⁴ Esta *ley* puede escribirse de la manera siguiente:

¹² Cuando hablamos de la escuela termodinámica de la economía nos referimos a aquella corriente teórica que tiene sus orígenes en los trabajos de N. Georgescu-Roegen, F. Soddy y S. Poldisky entre otros. De esta corriente es la revista *Ecological Economics* en la cual publican autores como H. Daly, R. Costanza y J.M. Aljer entre otros.

¹³ Para Noël y O'connor [1998] el capital natural crítico es definido como el conjunto de recursos medioambientales que a una escala geográfica dada asegura las funciones medioambientales importantes y para las cuales no existe ningún sustituto en términos de capital manufacturado o humano. Para Ekins [2003] el capital natural crítico es la cantidad de capital, que realiza estas funciones

críticas, que no puede ser sustituida por otras cantidades de medio ambiente o de otros capitales que realicen las mismas funciones Ekins [2003: 174]. [Lopera, 2003].

¹⁴ Hartwick propone invertir los ingresos de los recursos agotables en capital productivo, si se quiere garantizar un consumo constante per capita. Matemáticamente, se puede escribir: $dC/dt = -\delta_x K$; donde: x: producción total, C: Consumo, K: Capital, $f_{k=}$ dx/dk , δ : Depreciación del capital.

$$S(t) - \delta K(t) \geq 0 \quad (1)$$

Donde,

$S(t)$: Ahorro
 $\delta K(t)$: depreciación del capital total¹⁵

Partiendo de la ecuación (1) proponemos construir un indicador de tipo microeconómico basado en el principio de conservación del capital natural total, que permita caracterizar la extracción de petróleo con el propósito de saber que tan lejos se encuentra ésta de una política energética

¹⁵ El capital es un concepto que ha suscitado bastantes controversias, así, una definición general de capital será: *Conjunto de bienes producidos en el pasado que intervienen en la producción presente y futura de otros bienes* [Guerreen, 1996]. Para Herfindahl y Kneese [1974] el capital es un elemento que aporta un flujo de servicios productivos con el tiempo y que dirige el proceso de producción. Estos autores anotan que esta definición no concierne solamente al capital manufacturado sino que la tierra y el trabajo también satisfacen esta definición. Para Marx, el Capital designa ante todo una relación social, la relación entre los propietarios de los medios de producción y los que no los poseen.

Para los Neoclásicos el capital no es otra cosa que un factor de producción, el cual puede ser introducido en la función de producción neoclásica de tipo Cobb-Douglas como un agregado que representa el conjunto de entradas (materias primas, energía, servicios prestados por los equipos fijos, etc.). Recordemos que esta representación del capital fue objeto de la llamada polémica de Cambridge que se refería al significado del capital como argumento de la función de producción neoclásica y sobre las conclusiones que pueden obtenerse a partir de esta representación. El cuestionamiento de fondo era el hecho de intentar representar los aspectos macroeconómicos a partir de razonamientos de tipo macroeconómico, sin preocuparse por el problema de la agregación.

sostenible. Este indicador se construye como la diferencia entre cuatro tipos de ahorro y cuatro depreciaciones. Veamos:

$$Z = ((E_1 + E_2 + E_3 + E_4) / Y_1) - (\delta_{N1} K_{N1} / Y_1 + \delta_{N2} K_{N2} / Y_1 + \delta_{N3} K_{N3} / Y_1) - \delta_h K_h(t) / Y_1 \quad (2)$$

Donde,

E_1 : Ahorro en forma de reservas bajo tierra

E_2 : Ahorro en forma de energía renovable.

E_3 : Ahorro en forma de capital manufacturado.

E_4 : Ahorro en forma de capital humano.

Y_1 : Valor de las reservas totales del yacimiento.

δ_{N1} : Depreciación del capital natural por efecto de agotamiento de reservas.

δ_{N2} : Depreciación del capital natural por impacto de las emisiones de CO_2 .

δ_{N3} : Depreciación del capital natural por otros impactos sobre el medio ambiente.

δ_h : Depreciación del capital humano.

K_{N1} : Valor del capital natural representado por reservas agotadas.

K_{N2} : Valor de la calidad del aire antes

Este punto fue reconocido por los defensores de tal representación (Solow y Samuelson) quienes zanjaron la controversia proponiendo tomar tal representación como "una forma aproximativa" de modelar la realidad.

El capital también es tomado como un conjunto de activos, que toma la forma de títulos, derechos de propiedad, detentados por individuos (o por la sociedad). Este tipo de capital es el origen de remuneraciones específicas tales como intereses, dividendos o ganancias.

las emisiones de CO₂ y otros gases tóxicos.

K_{N3} : Valor de la calidad ambiental antes de la realización del proyecto.

K_h : Valor del Capital humano antes de la realización del proyecto.

Este indicador nos permite evaluar si los recursos (naturales, de capital, humanos, tecnológicos etc.) que son utilizados en el proceso de producción se están compensando total o parcialmente. Así, si $Z = 0$ los recursos utilizados estarán siendo compensados totalmente. De esta manera, habría un ahorro que pasará a las generaciones futuras sea bajo la forma de otros recursos, sea bajo la forma de capital. Si $Z < 0$ se estará creando un déficit en los recursos que le corresponderían a las generaciones futuras. Finalmente, si $Z > 0$ la actual generación estaría actuando de forma altruista y estará dejando a las generaciones futuras mayor cantidad de recursos de los que recibió de la generación anterior.

Nuestro problema es entonces encontrar los montos a invertir con el fin de sustituir el capital agotado o el recurso agotado según sea el caso, esto no implica necesariamente que se esté suponiendo que existe sustitución entre capitales en el sentido que lo entienden los economistas neoclásicos. Y que por ejemplo, invertir una parte de la renta petrolera para sustituir la energía agotada por energía renovable no implica sustitución entre capitales manufacturado y natural. Igual sucede con el pago de los servicios ambientales en aquellos casos en que el deterioro sea reversible. Para lograr esto es necesario determinar los valores de $\delta_M, \delta_{N1}, \delta_{N2}, \delta_{N3}, \delta_h$. Estos valores pueden ser obtenidos a partir de un proceso de simulación del flujo de caja para la explotación de un yacimiento de petróleo.

Una aplicación práctica: una política de producción petrolera enmarcada en un modelo de sostenibilidad energética.

Para analizar la aplicación de esta política, primero debemos calcular el indicador de sostenibilidad propuesto en la ecuación 2. Proponemos hacer este cálculo para el caso de dos yacimientos: uno gigante (700 MMB) y otro pequeño (44,7 MMB).

Para calcular el indicador de sostenibilidad proponemos introducir los costos y las depreciaciones presentados antes en el flujo de caja del proyecto petrolero. Así, para el cálculo de la depreciación del petróleo extraído proponemos utilizar la ecuación siguiente:

$$\delta_{N1} K_{N1} / Y_1 = \sum_{i=1}^n ((\delta_{N1i} * VE_i) / Y_1),$$

$$\text{con } \delta_{N1i} = (1 / ((1 + t_{vp})^{ni+1}))$$

Si consideramos que las reservas de petróleo agotadas pueden ser sustituidas por electricidad de fuentes renovables y por aceite de palma africana, el monto total de reservas sustituidas puede ser calculado asumiendo los criterios siguientes:

— Eficiencia del proceso de conversión energético del combustible medido en kWh (h) igual a 27%.

— Costos de electricidad renovable:¹⁶
· Tecnología de bajo costo = 0,0083 dólares/kWh.

¹⁶ Estos valores son asumidos después de estudiar varios reportes en los cuales se presentan costos para producción de energía eléctrica por diversas fuentes renovables. Entre estos reportes invitamos al lector consultar las siguientes fuentes: Birraux M. C. y Le Deaut J.Y. [2001] y Iberdrola Ingeniería Consultoria [1998]

- Tecnología de mediano costo = 0,055 dólares /kWh.
- Tecnología de alto costo = 0,167 dólares/kWh.¹⁷

El cálculo de la sustitución de reservas se hace a partir de la ecuación siguiente:

$$R_{\text{Sub}} = (100/\text{Rextr}) * K * (1/C_{\text{ER}}) * (1/\text{bet})$$

Donde:

R_{Sub} : Porcentaje de reservas substituidas con respecto a las reservas de petróleo inicial.

Rextr: Reservas producidas.

K: Capital invertido en la substitución.

C_{ER} : Costo de implementación del kW de energía renovable en un proyecto con 30 años de vida útil.

bet: equivalencia entre kW y barriles de petróleo y cuyo valor es igual a 450 kWh por barril de petróleo.

Así la ecuación para sustitución de reservas quedará de la forma siguiente:

$$R_{\text{Sub}} = 0,222 * K / (R_{\text{extr}} * C_{\text{ER}})$$

En la tabla 2 presentamos los resultados concernientes a las reservas substituidas y la cantidad de energía total para dos tamaños de yacimiento. Entendemos por reservas substituidas, el potencial de energía expresado en kWh implementado con las inversiones realizadas gracias al precio de depreciación del petróleo agotado. La cantidad energético total designa la suma de las

¹⁷ Todos estos valores se calcularon tomando como base un número total de horas igual a 262 800, que equivalen a 30 años.

reservas de petróleo substituidas y las reservas de petróleo bajo tierra para un horizonte de producción de 30 años. Los resultados que encontramos son los que aparecen en la Tabla 2.

Para el cálculo de las depreciaciones de los restantes capitales naturales y del capital humano proponemos introducir bajo la forma de costo un valor igual a 0,3453 dólares/barril.¹⁸

Si calculamos el flujo de caja del proyecto petrolero introduciendo estos valores obtendremos que las inversiones necesarias para lograr una política energética sostenible son las siguientes (véase Tabla 3).

En la tabla 3 se observa claramente que la inversión mayor y la que afectaría de forma importante la rentabilidad del proyecto serían las inversiones en sustitución de reservas. La cifra entre paréntesis de la tabla 2 corresponde a la inversión necesaria en dólares por barril. Se puede constatar, a excepción del monto destinado a sustitución del petróleo agotado, que dichos montos son bastante bajos, pues se mantiene por debajo de 10 centavos de dólar por barril para todos los casos.

Estos resultados permiten ver que es posible implementar una producción de petróleo enmarcada en una política energética dependiendo de:

- a) Los precios internacionales del petróleo.

¹⁸ Recordemos que este valor corresponde a la suma de inversión en capital humano $C_{\text{SESB}} = 0,015$ dólares/barril, Costo de protección del capital natural crítico = 0,11, Costo de descontaminación por efecto de emisión de gases producto de la combustión del petróleo extraído $C_{\text{gases/bpe}} = 0,0033$ dólares por barril, Otros costos ambientales $C_{\text{oca}} = 0,217$ dólares por barril. [Lopera, 2004].

TABLA 2
PORCENTAJE DE RESERVAS DE PETRÓLEO SUSTITUIDAS POR ELECTRICIDAD RENOVABLE
Y POR ACEITE DE PALMA PARA DOS TAMAÑOS DE YACIMIENTOS.

Yacimiento pequeño (44,7 MMB, costo de levantamiento 6,5 dólares/barril)	
Tipo de recurso sustituto	Reservas de petróleo sustituidas (Porcentaje)
Electricidad renovable de alto costo (0,167)	14%
Electricidad renovable de mediano costo (0,055)	43%
Electricidad renovable de bajo costo (0,0083)	284%
Aceite de Palma	18%
Yacimiento Grande (670 MMB, costo de levantamiento 6,5 dólares/barril)	
Tipo de recurso sustituto	Reservas de petróleo sustituidas (Porcentaje)
Electricidad renovable de alto costo (0,167)	10%
Electricidad renovable de mediano costo (0,055)	32%
Electricidad renovable de bajo costo (0,0083)	212%
Aceite de Palma	13%

TABLA 3
MONTOS A INVERTIR PARA LOGRAR UNA PRODUCCIÓN DE PETRÓLEO QUE PERMITA
UNA POLÍTICA ENERGÉTICA SOSTENIBLE¹⁹

Tamaño de Yacimiento	Monto a invertir (millones de dólares y en dólares/barril)				
	Sustitución de Petróleo por una Energía Renovable	Descontaminación Atmosférica	Protección Ambiental	Protección del Capital Crítico	Protección del Capital Humano
Yacimiento Pequeño (44,7 MMB)	160 (3,57 US\$/bl)	0,1341 (0,003 US\$/bl)	9,834 (0,22 US\$/bl)	4,917 (0,11 US\$/bl)	0,671 (0,015 US\$/bl)
Yacimiento Gigante (670 MMB)	1314 (1,944US\$/bl)	1,791 (0,003 US\$/bl)	130,597 (0,22 US\$/bl)	65,299 (0,11 US\$/bl)	8,9042 (0,015 US\$/bl)

¹⁹ Para dos tipos de yacimientos y un costo medio de levantamiento de petróleo igual a 6,5 dólares por barril.

- b) Los costos de instalación de un kWh de energía renovable
- c) Los criterios fiscales de los países
- d) El potencial de fuentes de energía renovable de estos mismos países.

El costo de inversión necesario para garantizar una explotación de petróleo en el marco de una política energética sostenible se puede implementar a partir de la creación de una tasa tal como la propuesta por Costanza [1992]. Este resultado nos muestra que si se aplica este criterio, es decir si se introduce la tasa de agotamiento y los costos de reparación de los daños causados por el uso de los servicios ambientales, en el precio internacional del petróleo, los países más favorecidos serán aquellos que pueden sustituir las reservas de petróleo por una fuente de energía renovable de bajo costo, tal como la electricidad de grandes proyectos hidroeléctricos o por otra fuente cuyo costo de sustitución sea lo suficientemente bajo. En este sentido, los países para los cuales las únicas opciones posibles son las energías renovables costosas, tales como la fotovoltaica, serán los más afectados ya que el sobre costo que deben pagar será muy elevado. En el escenario actual e precios internacionales del petróleo es posible que fuentes energéticas de mediano costo puedan ser utilizadas en la sustitución de cada barril de petróleo agotado. Según nuestros cálculos en un escenario de precios de 54 dólares/barril es posible sustituir un 90% de la reservas de petróleo agotadas, de un yacimiento gigante (700 millones de barriles), por energía renovable cuyo costo sea de hasta 55 centavos de dólar/kWh. Esto implica una inversión del orden de 6,8 dólares/barril.

En el caso colombiano, un proceso de

extracción durable es posible si se reemplazan las reservas de petróleo agotadas por energía eléctrica de grandes hidroeléctricas teniendo en cuenta que el potencial hidroeléctrico colombiano, según la UPME, es de 93 GW. Este es un potencial que de ser desarrollado permitiría un consumo por habitante equivalente al que tiene Francia hoy, el cual es aproximadamente ocho veces mayor que el de Colombia.

Por último, es necesario precisar que los países latinoamericanos deben tratar de avanzar en la implementación de una gestión petrolera que se enmarque en una política energética sostenible que tome en cuenta no sólo la protección del medioambiente y la atenuación de los impactos económicos y sociales, sino también la sustitución de las reservas agotadas por fuentes de energía renovable. En este sentido podemos dividir los países de la región en dos grupos: países como México y Venezuela poseedores de importantes reservas y el resto de países cuyas reservas son modestas.

En el caso de los países poseedores de grandes reservas, una política de explotación sostenible de los mismos es necesaria en aras de garantizar que la actual riqueza agotable pueda ser sustituida por otra que sea renovable. De otro lado, una política de este tipo estaría encaminada a hacer la economía del país lo menos dependiente posible del recurso petrolero. En el escenario actual de precios los países exportadores de petróleo pueden ya iniciar una política de extracción de petróleo enmarcada en una política energética sostenible si destinan una parte de su renta a proyectos de energía renovable. Teniendo en cuenta que tanto Venezuela como México tienen la industria petrolera organizada en

forma vertical,²⁰ ellos estarían en condiciones de disponer de una parte de la renta para financiar proyectos de sustitución del petróleo agotado por energías renovables.

En el caso de los países que disponen de reservas modestas, es fundamental tratar de mantener la política de extracción petrolera dentro de unos límites razonables; es decir, no pretender que las economías sean cada vez más dependientes de las exportaciones petroleras. Sería un gran error hacer de un recurso escaso y agotable el pivote central de la economía tal como la ha pretendido los últimos años el gobierno colombiano.²¹ Es necesario que la política petrolera de los países con reservas modestas se enmarque en una política energética global que tome en cuenta los criterios de sostenibilidad que hemos enunciado antes.

Finalmente, queremos señalar que aquel sueño de los años 70, de sembrar el petróleo, es posible hoy en el marco de una política energética sostenible tal como la que hemos presentado en esta ponencia. Es bastante evidente que una política petrolera basada en el paradigma del mercado puede ser óptima desde el punto de vista económico, pero puede llegar a ser bastante nefasta

²⁰ Recordemos que PDVSA dispone de estaciones de servicio incluso al interior de los Estados Unidos y que PEMEX mantiene el monopolio de la distribución de productos al interior de México.

²¹ En efecto, como consecuencia del hallazgo de importantes reservas concentradas en pocos yacimientos, la política petrolera colombiana de los últimos 10 años se ha encaminado en este sentido. El gobierno central y la empresa estatal consideran que en un escenario optimista el país podría estar produciendo 1 500 000 barriles diarios para el año 2010, por esta razón han encaminado todos los esfuerzos a la flexibilización del modelo contractual colombiano, buscando atraer mayor capital privado a la actividad exploratoria en el país.

desde el punto de vista social, ambiental y de economía local.

Conclusiones

En este trabajo hemos desarrollado una discusión sobre la posibilidad de implementar un programa de extracción de petróleo en el marco de una política energética sostenible desde el punto de vista de la conservación de la cantidad de energía. De otro lado, hemos propuesto un indicador de sostenibilidad a partir del cual se puede determinar si un programa de extracción de petróleo obedece a una estrategia energética sostenible. En este sentido proponemos las siguientes conclusiones:

1. Es posible realizar un proyecto de extracción de petróleo basado en el cuarto principio operacional propuesto por Costanza y Daly [1992] si se cumplen las condiciones siguientes:

- Que el precio internacional del petróleo sea suficientemente alto para que garantice que el valor pagado por el costo de uso del petróleo agotado permita sustituir una parte importante de las reservas producidas.
- Que el costo de implementación del kWh de electricidad renovable sea suficientemente bajo como para garantizar la mayor sustitución de reservas posible.
- Que la utilización del medioambiente sea pagada, y que se hagan las inversiones necesarias para garantizar la protección del capital natural crítico.

2. Si se mantienen los niveles de los precios actuales es evidente que se tienen las condiciones necesarias para la implementar una política petrolera enmarcada en un programa de sostenibilidad energética para

energías renovables cuyos costos sean del orden de 60 centavos de dólar/kWh.

3. La aplicación del «principio de precaución» al agotamiento de recursos naturales puede expresarse como *el que agota paga la sustitución del recurso agotado*. Así, la aplicación de una tasa de agotamiento al petróleo buscará hacer efectivo el cuarto principio operacional de Costanza y Daly [1992] que consiste en limitar la extracción del petróleo a la tasa de creación de sustitutos energéticos.

4. La energía hidroeléctrica de grandes centrales es, técnicamente hablando, la mejor opción en el caso colombiano, desde el punto de vista económico, para sustituir las reservas de petróleo agotadas, debido a que su costo de instalación es el más bajo. Así, para que las energías eólica y fotovoltaica sean opciones posibles, sus precios de instalación del kWh deben situarse alrededor 0,01 dólares. De otro lado, es importante aclarar que es necesario analizar el impacto que sobre el medioambiente pueden tener

cada una de estas fuentes de energía, pues nuestro análisis toma en cuenta el solamente el aspecto económico. Así, el análisis del impacto sobre el medio ambiente puede llevar a que la opción más económica no sea la mejor.

5. En el caso de los países latinoamericanos es pertinente analizar las condiciones bajo las cuales se puede implementar un esquema de explotación petrolero enmarcado en una política energética sostenible. Este esquema debe permitir que aquellos países que son grandes productores puedan garantizar la sustitución de las reservas agotadas por energías renovables en el largo plazo. De otro lado, los países poseedores de reservas modestas deben evitar que éstas sean extraídas en un lapso de tiempo corto a fin de evitar que sus economías sean cada vez más dependientes de un recurso escaso y agotable. En este sentido, para estos países cobra vigencia aquella vieja consigna de sembrar el petróleo.

BIBLIOGRAFÍA

- Alvarez C. G. (2000) *Economía y Política Petrolera*, INDEPAZ/USO/UNIVERSIDAD NACIONAL, Santa fé de Bogotá, 207 pp.
- Amix J, Bass D. M. y Whiting R.L. (1960) *Petroleum Reservoirs Engineering : physical properties*. New York Toronto London, McGraw-Hill, 610 p.
- Birraux M. C. y Le Deaut J.Y. (2001) *L'état actuel et les perspectives techniques des énergies renouvelables*, Rapport No 3415 ASAMBLEE NATIONALE, No 94 SENAT. 348
- Cabrera G.M. y Gonzalez J.I. (2000) *El desmadejo de la deuda pública : informe preparado para la contraloría general de la República*, julio, 41 p.
- Costanza R. (1992) "Three General Policies to Achieve Sustainability, Second Conference of the International Society for Ecological Economics (ISEE)", *Investing in Natural Capital*, Stockholm, Sweden, Agosto 3.
- Costanza R. y Daly H. E. (1992) *Natural Capital and sustainable development* Conservation Biology, vol 6. No 1, p 37-46.
- Daly H.E. (1986) "Thermodynamique and Economic concepts as related to resource use policies", *Land Economics* Vol. 62 (3), 319-322.
- Ekins P. y Simon S. (2003) "An illustrative application of the CRITIC framework to the U.K.", *Ecological Economics*, 44, p 255-275.
- El Serafy S (1989) "The proper calculation of income from depletable Natural resources, Environmental accounting for sustainable development", en *Environmental accounting for sustainable development*, The world Bank, Washington D.C., p.10-18.
- Faucheux S., Noël J.F. (1995) "La Théorie des Ressources Epuisables: Chapitre 3" en *Economie des ressources naturelles et de l'environnement*, Paris, Armand Colin, 87-122.
- Geurgescu-Roegen N. (1971) "La ley de la entropía y el proceso económico", en *Economía, Ecología y Ética*, Daly H. (compilador), 1980, Fondo de Cultura Económica/Economía contemporánea, México, 1989, p 61-72.
- Gray, L.C. (1914) "Rent under the Assumption of Exhaustibility". *Quarterly Journal of Economics*, 28, 466-489
- Guerrien B. (1996) *Dictionnaire d'analyse économique*, Paris, La découverte, 540 p.
- Hartwick J.M. (1977) "Intergenerational Equity and the Investing of Rents from Exhaustible Resources", *American Economic Review*, vol 67, no 5, pp.972-974.
- Herfindahl O. et Kneese A.V. (1974) *Natural theory of natural resources*. Charles E., Merrill, Columbus, UK.
- Hotelling H. (1931) "The Economics of Exhaustible Resources". *Journal of Political Economy*, 39, 137-175.
- Iberdrola Ingeniería Consultoria (1998) *Projet : Opportunities For Biomass To Energy Projects In La Rioja (Spain) And Tuscany (Italy)*, <http://www.unirioja.es/dptos/daa/web2/Temp/text/home.htm> (Page consultée avril 24 / 2002)
- Laherrere J. (2000) "Vers un déclin de la production Pétrolière", *Colloque énergie et développement durable*, Bruxelles.
- Lopera S.
— (2004) *Extraction pétrolière et politique énergétique durable: Le cas colombien*, Tesis doctoral en Economía aplicada (en revisión), Universidad Pierre Mendès-France, 320 p.
— (2003) "El Capital Natural crítico un instrumento de política ambiental para los recursos naturales", *Gestión y Ambiente*, Vol 6, No 2, p. 39-50.
- Martínez Alier. J. (1997) "Deuda ecológica y deuda externa", *Economía Política* No 14, Septiembre.
- Meadows D. y Randers J. (1972) *The Limits to growth*. Universe books, New York.
- Naredo J.M. y Valero A. (1999) *Desarrollo Económico y Deterioro Ecológico*, Fundación Argentaria, Madrid.
- Noël J. F. (2000) *Le capital naturel un nouvel objet des politiques environnementales*, Institute national des Sciences et Techniques Nucléaires : Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines.
- Noël J.F. y O'connor M. (1998) "Strong Sustainability and Critical Natural Capital", in

- Faucheux S., O'connor (ed) *Valuation for Sustainable Development*, Edward Elgar Cheltenham.
- Pearce D. (1998) "Capital theory and measurement of sustainable development : an indicator of 'weak' sustainability" en : *Essays on Ecological Economics and Environment* Edward Elgar, 220 p
- Pearce D. y Turner R. K. (1990) *Economics Of Natural Resources and the Environment*, New York, Harsvester Wheatsheaf, p. 308.
- Pearce D. (1976) *The limits of Cost-Benefits Analysis as a Guide to Environmental Policy*, *Kyklos*, 29, p 97-112.
- Pezzey J. (1989) *Economic Analysis of Sustainable Growth and Sustainable Development*, Environment Department Working Paper n'15, World Bank, Washington DC.
- Prugh T. (1999) *Natural Capital and Human Economic Survival*, Ecological Economics series, Florida.
- Solow R. (1974) "Intergenerational Equity and Exhaustible Resources", *Review of economic studies (Symp.)*, 1974, pp.29-46.
- Solow R.M. (1974a) "The Economic of resources or the resources of Economics ", *American Economic Association*, 64. No 2, p 1-14.
- Victor P. A. (1991) "Indicators of sustainable development: some lessons from capital theory", *Ecological Economics*, vol 4., p 191-213.