

Valor del Capital Natural y Sostenibilidad del Petróleo en Colombia*

Carlos Andrés Vergara**

Hugo H. Salgado C***

Resumen.

Este artículo aborda tres aspectos de la sostenibilidad de la extracción de petróleo en Colombia para el período 1998 - 2003: i) los precios que reflejan la escasez de este recurso natural no renovable; ii) el valor del capital petróleo para el período analizado y, finalmente, utilizando la metodología del Valor del Capital Natural de Mäler (2001) iii) la sostenibilidad de la extracción de petróleo en Colombia. Esto a partir de dos modelos específicos desarrollados por Mäler (2001), que se diferencian en el supuesto de autonomía de los mecanismos de asignación del recurso. Los resultados sugieren que la explotación del petróleo en Colombia

* Tesis de Carlos Andrés Vergara para obtener el título de Magíster en Economía de los Recursos Naturales y del Medio Ambiente en la Universidad de Concepción, Chile. Asesor: Hugo Salgado Recibido: 19/11/09 Aceptado: 23/03/10

** Docente - Investigador. Magíster (M.Sc.) en Economía de los Recursos Naturales y del Medio Ambiente. Coordinación de Posgrados - Universidad de Medellín, Medellín, Colombia; Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales - Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. E-mail: cavergarat@gmail.com, cvergarat@udec.cl.

*** Docente - Investigador. Doctor of Philosophy (Ph.D.) in Agricultural and Resource Economics. Departamento de Economía, Universidad de Concepción, Concepción, Chile. E-mail: husalgad@udec.cl, hsalgadoc@gmail.com

no ha mostrado una senda sostenible durante el período de análisis, implicando una pérdida de bienestar inter-generacional, que en todos los casos supera los 300 millones de dólares anuales.

Palabras Clave: Mecanismos de asignación, precio sombra, valor del capital natural, función de bienestar social, sustentabilidad, bienestar inter-temporal o inter-generacional.

Abstract

This article addresses three aspects of the sustainability in oil extraction in Colombia for the period 1998 and 2003: i) the prices that reflect the scarcity of this non renewable natural resource, ii) the value of oil capital for the analyzed period and finally, using the methodology of the natural capital value of Mäler (2001) iii) the sustainability of the oil extraction in Colombia. This from two specific models developed by Mäler (2001) that are differentiated in the supposed one of autonomy of the mechanisms of allocation of the resource. The results suggest that the oil exploitation in Colombia has not been shown a sustainable path during the analysis period 1998-2003, implying a loss of intergenerational welfare that in all the cases surpasses the 300 annual million dollars.

Keywords: allocation mechanisms, shadow price, value of natural capital, social welfare function, sustainability, inter-temporal welfare or inter-generational.

JEL: C2, D61, D99, O1, O5, Q3, Q4, Q5.

Résumé

Ce document aborde trois aspects de la durabilité de l'extraction de pétrole en Colombie: les prix reflètent la rareté des ressources naturelles non renouvelables, la valeur du capital du pétrole pour la période considérée et, en utilisant la méthode de la valeur du capital naturel Maler (2001), la durabilité de l'extraction de pétrole en Colombie. L'utilisation de deux modèles spécifiques développés par Maler (2001), qui diffèrent dans l'hypothèse de l'autonomie des mécanismes d'attribution optimale, nous avons calculé une limite inférieure des prix fictifs pour les premiers et les prix fictifs dans des conditions optimales pour la Deuxièmement, en utilisant comme mesure du bien-être social de la somme du surplus du producteur et le consommateur. Les résultats suggèrent que l'exploitation

pétrolière en Colombie n'a pas été durable au cours de la période 1998-2003, ce qui implique une perte de bien-être des générations dans tous les cas dépasse les 300 millions de dollars par an.

Mots-clés: les mécanismes d'attribution, prix fictif, la valeur du capital naturel, la fonction de protection sociale, la durabilité, le bien-être intertemporel ou intergénérationnelle

Introducción

Uno de los recursos naturales no renovables de mayor relevancia económica en Colombia es el petróleo, el cual se ha configurado como uno de los elementos estratégicos en el proceso de crecimiento y desarrollo económico tanto en el ámbito nacional como internacional. Es así como Colombia ha encontrado en este recurso una fuente de ingresos importante para las finanzas públicas, para el desarrollo de la infraestructura vial y para la expansión de otros subsectores energéticos como lo es el carbón y el eléctrico, entre otros, así como una fuente de ingresos importante a partir de las transferencias de regalías, dividendos, impuestos nacionales, territoriales, directos e indirectos, los recaudados de los contratistas y los distintos subsidios que a través del tiempo ha asumido la empresa¹, lo cual ha permitido de igual manera agilizar el proceso de industrialización del sector productivo. Sin embargo, en el período de análisis este sector enfrentó un escenario crítico con un decrecimiento de las reservas remanentes de un 8% promedio anual que conlleva necesariamente a la pérdida de autosuficiencia petrolera en el corto plazo², esto se corrobora, según bases de datos actualizadas por la vicepresidencia de producción de ECOPETROL,

1 Para el año 2008 las transferencias de ECOPETROL al Estado alcanzan los 14,3 billones de pesos, participando con 1,8% del PIB total y un 32% de las exportaciones totales en este mismo año (ECOPETROL, 2008)

2 Esto dado que se viven serios momentos de incertidumbre sobre la autosuficiencia petrolera para el período identificado entre 2005 y 2009. Así lo menciona el entonces presidente de la Empresa Colombiana de Petróleos (ECOPETROL,2004) en una conferencia de prensa: "*En efecto, la perspectiva de corto plazo no es optimista. Es muy poco lo que se puede hacer en los próximos 2 ó 3 años porque los procesos exploratorios son muy largos y, aunque tuviéramos hallazgos importantes en los meses siguientes, no veríamos producción real hasta dentro de tres ó cuatro años*". (<http://www.elcolombiano.com, abril de 2004>)

cuando entre 1998 y 2007 es posible evidenciar una vida útil (que corresponde al cociente entre los niveles de reservas y producción) de las reservas promedio de tan solo 8 años³. Es posible entonces argumentar que los niveles de producción petrolera, en la última década, han mostrado entonces una tendencia decreciente, sin embargo, según la UPME, desde 2006 y gracias a los programas en la operación directa se ha logrado contener de alguna manera la disminución acelerada que venía presentándose desde comienzos del nuevo milenio. Sin embargo sólo hasta el año 2003 la estatal petrolera colombiana participó en la exportación de la gran mayoría de los crudos producidos bajo la figura de asociación, pues allí su papel era más activo en los eslabones de exploración y explotación del hidrocarburo, además de proporcionar al mercado externo los crudos extraídos de la operación directa en las actividades de exploración y producción de hidrocarburos, para lo cual participaba en la exportación de la gran mayoría de los crudos producidos, además de proporcionar al mercado externo los crudos extraídos de la operación directa⁴ (UPME, 2009).

Todo esto implicó una gran incertidumbre sobre el abastecimiento nacional de dicho recurso energético y sobre las no despreciables rentas provenientes de su comercialización. De esta manera surge la necesidad de evaluar la sustentabilidad de dicho recurso en el período de estudio mencionado, lo cual, hace parte de nuestro problema de investigación: *¿Es sostenible⁵ la extracción de petróleo en Colombia?*

3 Marzo 24 de 2010. http://www.upme.gov.co/generadorconsultas/consulta_series.aspx?idModulo=3&tipoSerie=28&fechainicial=01/01/1920&fechafinal=31/12/2009.

4 Año que dio cabida a grandes transformaciones en la estructura orgánica de ECOPETROL "... *el rol de Ecopetrol se ha modificado a funcionar solo como empresario; y se creó la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) para administrar los recursos de hidrocarburos del país... El contratista tiene todos los derechos sobre la producción, después de una regalía escalonada; y solo tiene que hacer pagos eventuales a la ANH para compartir el ingreso adicional por bonanza de precios, en caso de presentarse altos precios del crudo. El nuevo modelo es uno de los más sencillos y competitivos en la arena internacional, y reduce la participación del Estado de más de 70% a cerca de 50%.*" (ECOPETROL, 2010)

5 En el resto del documento se mencionan los términos sostenibilidad y sustentabilidad de manera indistinta, sin embargo es necesario reconocer la discusión semántica que existe aún en la literatura científica acerca de estos dos conceptos.

Para ello se utiliza la metodología denominada *Valor del Capital Natural* realizando un análisis inter-temporal de los excedentes cuantificados a partir de la transacción del mismo, tanto en el mercado doméstico como internacional y determinar así el bienestar social a partir de un enfoque microeconómico desde los diferentes supuestos establecidos en los modelos a aplicar. Para lo anterior es necesario calcular el precio sombra del capital petróleo que permita establecer un análisis de bienestar en términos inter-generacionales.

El recurso petrolero en Colombia y su rol con respecto al resto de sectores económicos y energéticos, ha representado entonces un alto grado de importancia para la dinámica económica del país tanto desde el punto de vista energético, con respecto a otras fuentes, como por su capacidad de generación de divisas a la economía nacional a partir de la exportación del mismo lo cual ha permitido obtener un gran alivio fiscal. Este aspecto ha predominado en algunos estudios llevados a cabo por las organizaciones gubernamentales de planificación energética los cuales argumentan que: *"El aporte de las exportaciones de energía, principalmente petróleo y carbón, a la balanza comercial es de gran importancia. Sin embargo, las condiciones actuales podrían implicar una importante declinación de la producción de petróleo, reduciendo sustancialmente su aporte. En el mediano plazo debe buscarse la forma de mitigar su efecto en la balanza, combinando diferentes estrategias de los energéticos producidos en el país y en el largo plazo tratando de aumentar nuevamente las reservas de petróleo"* (UPME, 2003: 119). Esto se reconoce además en los últimos reportes del Ministerio de Minas y Energía –MME- y de la Unidad de Planeación Minero Energética –UPME- los cuales argumentan que: *"Las proyecciones permiten observar la situación futura de la demanda por tipo de energético y por sector económico. Esto contrastado con los escenarios de oferta nos muestra la situación de abastecimiento de los energéticos, especialmente para los casos críticos como son petróleo, gas, las fuentes de generación de electricidad y el ACPM"* (UPME, 2007). Sin embargo, como se mencionó al inicio, respondiendo al interés de la investigación desarrollada procedemos a examinar aquí el período comprendido entre 1998 y 2003, el cual reflejó un acentuado período de escasez con oscilantes tasas de decrecimiento en los niveles de reservas remanentes⁶.

El aspecto metodológico de la presente investigación pretende mostrar una aplicación empírica del modelo de Mäler (2001) en términos de examinar el capital petróleo como un elemento clave

⁶ Marzo 24 de 2010. http://www.upme.gov.co/generadorconsultas/consulta_series.aspx?idModulo=3&tipoSerie=28&fechainicial=01/01/1920&fechafinal=31/12/2009.

en la determinación de la sustentabilidad en el período comprendido entre 1998 y 2003. Este análisis puede incidir en la toma de decisiones de producción y de consumo de los diferentes agentes para períodos futuros, lo que podría permitir un uso más racional y eficiente determinando de alguna manera un proceso de sustentabilidad en el largo plazo dadas las necesidades y posibilidades energéticas que enfrenta el país.

En la segunda sección de este artículo, se presenta el marco teórico relacionado con el uso del Valor del Capital Natural como un indicador del grado de sustentabilidad de la extracción de un recurso no renovable. Ahí se presentan los dos modelos a utilizar en esta aplicación que se diferencian en si se asume o no autonomía en los mecanismos de asignación del recurso hacia el consumo, es decir, dependiendo de las reglas del juego dadas en una economía imperfecta (Dasgupta y Mäler, 2001b: 6). En la tercera sección se presenta la metodología para la aplicación de este marco teórico a la estimación del Valor del Capital Natural del Petróleo en Colombia. Esta metodología incluye la construcción de una función de bienestar social como la suma del excedente del consumidor y del productor, la estimación de una función de demanda por petróleo en Colombia, el cálculo de los precios sombra a partir de la función de bienestar previamente definida, donde se calcula una cota inferior de los precios sombra para el primer caso y unos precios bajo condiciones óptimas para el segundo, utilizando como medida de bienestar social la suma del excedente del productor y del consumidor. Finalmente se procede con el cálculo del grado de sostenibilidad de la extracción del petróleo en Colombia entre los años 1998 y 2003, específicamente. De esta manera se presentan las conclusiones y delimitaciones correspondientes.

2. Metodología

El Valor del Capital Natural como Indicador de Sustentabilidad.

El marco teórico de la presente investigación se centra en analizar un indicador de sustentabilidad a partir de la variación del Stock de Capital Petróleo en el mencionado intervalo temporal. La decisión de aplicar esta metodología consiste en introducir una innovación sobre los modelos tradicionales, utilizando los precios sombra que reflejan la escasez del recurso a diferencia del precio internacional el cual refleja la dinámica del juego entre oferta y la demanda del mismo a nivel mundial. De otro lado, esta metodología permite percibir el cambio en el nivel de bienestar en cada momento del tiempo, lo que determina que el nivel de utilidad no sea constante, como se asume en los modelos basados en cuentas ambientales. De esta manera el presente trabajo se adherirá más al concepto de sostenibilidad fuerte.

Esta aplicación se llevará a cabo a partir de dos modelos desarrollados en Mäler (2001), los cuales difieren en los supuestos determinados por los mecanismos de asignación y por ende en los impactos sobre la función de bienestar social.

La Función de Bienestar Social General (FBSG) estará representada por:

$$V_t = \sum_{\tau=t}^T \frac{U(C(\tau))}{(1+\delta)^{\tau-t}} \quad (1)$$

Esto determina el valor presente del bienestar futuro con una tasa de descuento δ^7 . Luego, para tener bien definida la FBSG se debe cumplir que $\delta \geq 0$.

2.1. **Modelo 1.**

Este modelo supone que los mecanismos de asignación del recurso son autónomos. Entendiendo éstos como un mapeo dado a partir del stock inicial dentro de sendas factibles de consumo que no dependen de una regla óptima de extracción ni de shock externos⁸, esto es, una cantidad de capital natural que depende esencialmente del comportamiento del consumo en el tiempo independiente de aspectos exógenos. Por lo tanto el impacto sobre la función de bienestar social es producido sólo por el consumo del recurso natural no renovable, representado en la función de utilidad.

Redefiniendo la Función de Bienestar Social se tiene que:

$$V(\alpha(\tau, t, K_\tau)) = \sum_{\tau=t}^T \frac{U(\alpha(\tau, t, K_\tau))}{(1+\delta)^{\tau-t}} \quad (2)$$

Donde K_τ se define como el stock de capital en un momento de tiempo determinado y $\alpha(\tau, t, K_\tau)$ como los mecanismos de asignación que determinan el consumo en función de los niveles de capital natural disponibles. Así, el nivel de consumo es establecido como:

⁷ Esta se aplicará a costos y beneficios monetarios, dado que se asume el bienestar total como la suma entre el excedente del consumidor y el excedente del productor. Esto es, no se asume un vector de consumo que considera todos los flujos que afectan el bienestar social (Mäler, 2001: 2).

⁸ Cambios en la tecnología y cambios en la población son dos razones por las cuales los mecanismos de asignación podrían no ser autónomos. (Dasgupta y Mäler, 2001b: 7).

$$C_\tau = \alpha(\tau, t, K_\tau)$$

Dada la no existencia de incertidumbre con respecto a las instituciones⁹ se puede asumir de la misma forma que los mecanismos de asignación son autónomos en el tiempo, esto es:

$$\alpha(\tau+1, t+1, K) = \alpha(\tau, t, K)$$

En este modelo se define el precio de cuenta o precio sombra del capital como el valor presente de los cambios futuros en el bienestar a partir de un incremento del stock de capital en una unidad, es decir:

$$\partial V / \partial t = p_t \quad (3)$$

Se asume además que el bienestar social muestra una senda no decreciente, esto es $V_{t+1} \geq V_t$, donde $V_t = V(\alpha(\tau, t, K_\tau))$.

La dinámica del modelo es la siguiente:

$$V_{t+1} - V_t = \sum_{\tau=t+1}^T \frac{U(\alpha(\tau+1, t+1, K_{\tau+1}))}{(1+\delta)^{\tau-t-1}} - \sum_{\tau=t}^T \frac{U(\alpha(\tau, t, K_\tau))}{(1+\delta)^{\tau-t}} \quad (4)$$

Luego si creamos una variable $\beta = \tau - 1$, donde $\beta + 1 = \tau$, se tiene:

$$V_{t+1} - V_t = \sum_{\beta=t}^T \frac{U(\alpha(\beta+2, t+1, K_{\beta+1}))}{(1+\delta)^{\beta-t}} - \sum_{\tau=t}^T \frac{U(\alpha(\tau, t, K_\tau))}{(1+\delta)^{\tau-t}} \quad (5)$$

Luego si partimos con el mismo índice T :

$$V_{t+1} - V_t = \sum_{\tau=t}^T \frac{1}{(1+\delta)^{\tau-t}} \{ U(\alpha(\tau+1, t+1, K_{\tau+1})) - U(\alpha(\tau, t, K_\tau)) \} \quad (6)$$

⁹ Estos se asumen conceptualmente como restricciones institucionales es decir restricciones de índole transaccional o de información. Las instituciones son conocidas como la estructura del mercado, la estructura de los derechos de propiedad, los impuestos, recursos de propiedad común, seguros, instituciones de fomento, etc. (Dasgupta y Mäler, 2001b)

Dado el supuesto de los mecanismos de asignación autónomos¹⁰ se tiene que:

$$V_{t+1} - V_t = \sum_{\tau} \frac{1}{(1+\delta)^{\tau-t}} \{U(\alpha(\tau, t, K_{t+1})) - U(\alpha(\tau, t, K_t))\} = \sum_{\tau} \frac{U(\alpha(\tau, t, \tilde{K}_{\tau,t}))}{(1+\delta)^{\tau-t}} \quad ^{11} (7)$$

Esto es, \tilde{K} es un número entre K_t y K_{t+1} . Ahora si K_t y K_{t+1} son inmediatamente contiguos, entonces se tiene una aproximación al concepto de precio sombra (precio de cuenta) como el *trade-off* entre el bienestar presente y futuro (Dasgupta y Mäler, 2001a: 7), donde los subíndices τ y t asociados al stock de capital natural representan allí el año base y cada uno de los años subsiguientes dentro del período de análisis, respectivamente:

$$\sum_{\tau} \frac{U(\alpha(\tau, t, \tilde{K}_{\tau,t}))}{(1+\delta)^{\tau-t}} \approx p_t \quad (8)$$

Finalmente haciendo uso de nuevo del teorema del valor medio, esto es, donde U es una función bien comportada, es decir, continua en un intervalo cerrado $[K_{t+1}, K_t]$ y diferenciable en un intervalo abierto (K_{t+1}, K_t) , entonces existe un número C tal que:

$$\sum_{\tau} \frac{U(\alpha(\tau, t, \tilde{K}_{\tau,t}))}{(1+\delta)^{\tau-t}} = (V(\alpha(\tau, t, K_{t+1})) - V(\alpha(\tau, t, K_t)))(K_{t+1} - K_t)$$

Luego, multiplicando a ambos lados de la ecuación por la diferencia $(K_{t+1} - K_t)$ se tiene que:

$$V_{t+1} - V_t = \sum_{\tau} \frac{U(\alpha(\tau, t, \tilde{K}_{\tau,t}))}{(1+\delta)^{\tau-t}} (K_{t+1} - K_t), \text{ luego haciendo uso de las ecuaciones (3), (4) y (8)}$$

se tiene que la dinámica de la función de bienestar social se describe por la siguiente ecuación:

$$V_{t+1} - V_t = p_t (K_{t+1} - K_t) \quad (9)$$

Esta ecuación representa que el cambio en el bienestar social dado entre un período y otro inmediatamente anterior está determinado por el cambio en el valor del stock de capital, en este caso

¹⁰ Es decir, cuando se cumple que: $\alpha(\tau+1, t+1, K_{t+1}) = \alpha(\tau, t, K_{t+1})$. (Maler, 2001: 2).

¹¹ Esto dado un reconocido teorema de existencia denominado el teorema del valor medio donde U es una función bien comportada, es decir, continua en un intervalo cerrado $[t+1, t]$ y diferenciable en un intervalo abierto $(t+1, t)$, entonces existirá un número C en el intervalo abierto

tal que $\sum_{\tau} \frac{U(C)}{(1+\delta)^{\tau-t}} = \frac{V_{t+1} - V_t}{t+1 - t} \rightarrow \sum_{\tau} \frac{U(C)}{(1+\delta)^{\tau-t}} = V_{t+1} - V_t$.

capital natural¹². Esto permite analizar la sustentabilidad en la medida que el cambio en la función de bienestar sea no decreciente en el tiempo, es decir, $V_{t+1} - V_t \geq 0$.

2.2 Modelo 2.

Este modelo supone que los mecanismos de asignación no son autónomos esto es las decisiones de extracción se verán afectadas por factores externos de índole político, tecnológico o de comercio internacional. Luego modelando uno de los principales impactos sobre el mercado petroliero, se asumirán como determinantes los efectos originados por los precios internacionales del petróleo sobre la función de bienestar social. De esta manera habría dos efectos inmersos, uno directo dado por los ingresos de exportación del recurso y otro indirecto dado por la posibilidad de importación de bienes y servicios de consumo que permite el primer efecto.

Redefiniendo la Función de Bienestar Social General (FBSG), se tiene que:

$$V_t = \sum_{\tau=t}^T \frac{U(q_\tau R_\tau)}{(1+\delta)^{\tau-t}} \quad (10)$$

Esta función representa el valor presente de la utilidad en términos de los ingresos por exportaciones dados por $q_\tau R_\tau$, cantidad de igual manera consumida.

La restricción factible está dada por: $\sum_{\tau=t}^T R_\tau = S_t$ ¹³ (11)

Los supuestos específicos para este modelo se resumen en los determinantes de la producción y el consumo. Este último no es autónomo en el tiempo debido a la dependencia del precio internacional:

Producción → $R_t = \alpha(\tau, t, S_t)$

Consumo → $C_t = q_t \alpha(\tau, t, S_t)$

12 En términos más específicos: Valor del Capital Petróleo.

13 Esto implica además que: $S_{t+1} - S_t = -R_p$, donde S_t corresponde al nivel de reservas probadas del recurso en el período t (Mäler, 2001: 6)

Como se mencionó en el modelo 1, se tiene que el precio sombra es determinado por la variación en la función de bienestar dado el cambio en una unidad del nivel de reservas, esto es:

$$\partial V / \partial S_t = p_t^{14} \quad (12)$$

Si asumimos que los mecanismos de asignación son óptimos, debe resolverse de igual manera un problema de optimización con una restricción lineal, de esta forma el lagrangeano está dado por:

$$L = \sum_{\tau=t}^T \frac{U(q_\tau R_\tau)}{(1+\delta)^{\tau-t}} - p_t \left(\sum_{\tau=t}^T R_\tau - S_t \right) \quad (13)$$

Luego derivando parcialmente con respecto R_τ se tiene la siguiente condición de optimalidad:

$$\frac{\partial L}{\partial R_\tau} = \frac{U(q_\tau R_\tau)}{(1+\delta)^{\tau-t}} q_\tau - p_t = 0 \quad , \text{ para todo } \tau = t, t+1, \dots \quad (14)$$

$$\frac{U(q_\tau R_\tau)}{(1+\delta)^{\tau-t}} q_\tau \leq p_t \quad \tau = t, t+1, \dots \quad (15)$$

Luego cuando la función U es estrictamente cóncava, la producción será positiva y la desigualdad será satisfecha como una igualdad. Esto es, la producción deberá ser positiva porque la utilidad siempre aumentará en función de la extracción del recurso pero a tasas decrecientes, estas condiciones de la función de utilidad implican además que una generación que puede esperar un alto nivel de consumo (impacientes) recibirá menos cantidad ofrecida de lo que ellos esperan de este recurso pero a su vez mucho más que aquellas generaciones que esperan un moderado o bajo consumo en el tiempo, lo que implicará niveles de producción positivos para satisfacer tales comportamientos (Koopmans, 1967).

Ahora, para examinar el cambio en el bienestar en dos períodos adyacentes (como se mostró en el modelo 1), es decir la dinámica del modelo, se analizan las siguientes ecuaciones:

$$V_{t+1} - V_t = \sum_{\tau=t+1} \frac{U(q_\tau \alpha(\tau, t+1, S_{t+1})}{(1+\delta)^{\tau-t-1}} - \sum_{\tau=t} \frac{U(q_\tau \alpha(\tau, t, S_t)}{(1+\delta)^{\tau-t}} \quad (16)$$

14 El cual es diferente al precio internacional q .

Luego homogenizando las dos sumatorias que parten de $\tau=t$ y $\tau=t+1$, esto es si creamos una variable $\beta = \tau - 1$, donde $\beta + 1 = \tau$, se tiene:

$$V_{t+1} - V_t = \sum_{\beta=t}^T \frac{U(q_{\beta+1}\alpha(\beta+2, t+1, S_{t+1}))}{(1+\delta)^{\beta-t}} - \sum_{\tau=t}^T \frac{U(q_\tau\alpha(\tau, t, S_t))}{(1+\delta)^{\tau-t}} \quad (17)$$

Luego si partimos con el mismo índice τ :

$$V_{t+1} - V_t = \sum_{\tau=t}^T \frac{1}{(1+\delta)^{\tau-t}} \{ U(q_{\tau+1}\alpha(\tau+1, t+1, S_{t+1})) - U(q_\tau\alpha(\tau, t, S_t)) \} \quad (18)$$

Sumando restando un mismo término: $U(q_\tau\alpha(\tau+1, t+1, S_{t+1}))$ esta ecuación puede redifinirse como:

$$V_{t+1} - V_t = \sum_{\tau=t}^T \frac{1}{(1+\delta)^{\tau-t}} \left[\begin{matrix} U(q_{\tau+1}\alpha(\tau+1, t+1, S_{t+1})) - U(q_\tau\alpha(\tau+1, t+1, S_{t+1})) \\ U(q_\tau\alpha(\tau+1, t+1, S_{t+1})) - U(q_\tau\alpha(\tau, t, S_t)) \end{matrix} \right] \quad (19)$$

Luego suponiendo que α es autónoma con respecto al tiempo¹⁵, se tiene que:

$$= \sum_{\tau=t}^T \frac{1}{(1+\delta)^{\tau-t}} \left[\begin{matrix} U(q_{\tau+1}\alpha(\tau, t, S_{t+1})) - U(q_\tau\alpha(\tau, t, S_{t+1})) \\ U(q_\tau\alpha(\tau, t, S_{t+1})) - U(q_\tau\alpha(\tau, t, S_t)) \end{matrix} \right] \quad (20)$$

Entonces, aplicando una aproximación lineal¹⁶ (expansión de Taylor de primer orden sin considerar el residuo) en el punto (q_τ, S_t) , se obtiene la linealización de esta función de la siguiente manera:

$$V_{t+1} - V_t = \sum_{\tau=t}^T \frac{1}{(1+\delta)^{\tau-t}} \left[U(c_\tau) \frac{\partial c_\tau}{\partial q_\tau} \{q_{\tau+1} - q_\tau\} + U(c_\tau) \frac{\partial c_\tau}{\partial S_t} \{S_{\tau+1} - S_t\} \right] \quad (21)$$

$$= \sum_{\tau=t}^T \frac{1}{(1+\delta)^{\tau-t}} [U(c_\tau) R_\tau \{q_{\tau+1} - q_\tau\} + p_\tau \{S_{\tau+1} - S_t\}] \quad (22)$$

Esto dado que la variación del consumo con respecto al precio internacional, va a depender del nivel de producción (supuesto). Además se observa en esta última ecuación el reemplazo del precio sombra dado por la variación de la función de bienestar social con respecto a las reservas, mencionado anteriormente en la ecuación (12).

15 Es decir, se cumple que: $\alpha(\tau+1, t+1, S_{t+1}) = \alpha(\tau, t, S_t)$.

16 Esto dado que se asume que la función $U(C_\tau)$ es sucesivamente diferenciable en q_τ y S_t .

Luego, resolviendo para el factor de actualización y multiplicando y dividiendo por q_t el primer elemento del lado derecho de la ecuación, se tiene que:

$$V_{t+1} - V_t = \sum_{\tau=t} U(C_\tau) q_\tau \left(\frac{q_{\tau+1}}{q_\tau} - 1 \right) R_\tau + p_t (S_{t+1} - S_t) \quad (23)$$

Reemplazando por el precio sombra (dada la ecuación 15) se tiene:

$$= p_t \sum_{\tau=t} \left(\frac{q_{\tau+1}}{q_\tau} - 1 \right) R_\tau + p_t \{S_{t+1} - S_t\} \quad (24)$$

Finalmente dado que $S_{t+1} - S_t = -R_t$ (Mäler, 2001: 8), el cambio en la función de bienestar puede interpretarse como el cambio en el valor presente de las utilidades futuras, dado el cambio en el precio mundial del petróleo y dado el cambio en el stock inicial del mismo:

$$V_{t+1} - V_t = p_t \left[\sum_{\tau=t} \left(\frac{q_{\tau+1}}{q_\tau} - 1 \right) R_\tau - R_t \right] \quad (25)$$

Dicho cambio relativo anual promedio en el precio mundial¹⁷ puede representarse como:

$$\varepsilon = \frac{\sum_{\tau=t}^{\infty} \left(\frac{q_{\tau+1}}{q_\tau} - 1 \right) R_\tau}{\sum_{\tau=t}^{\infty} R_\tau} \quad (26)$$

Luego reescribiendo (25) y haciendo uso de la ecuación (11) se tiene que:

$$V_{t+1} - V_t = p_t \varepsilon S_t - p_t R_t \quad (27)$$

Es evidente que el precio sombra actúa como ponderador en la construcción de formas lineales, en este caso del cambio en la función de bienestar social (Mäler and Dasgupta, 2001b: 4). Por lo tanto se llega a la conclusión final que relaciona tanto el impacto de las reservas de petróleo en un

¹⁷ En el caso de Hotelling (1931) este cambio relativo sería igual a la tasa de descuento del mercado, es decir, sería evidenciado como un costo de oportunidad de invertir recursos en la explotación petrolera vs. el resto de inversiones en el mercado (Mäler, 2001: 8).

país como el provocado por el cambio en el precio internacional. De la misma manera que el primer modelo, se analiza la sustentabilidad a partir del comportamiento del bienestar en el tiempo.

3.Resultados

En esta sección se presentan los resultados correspondientes a la aplicación de la metodología utilizada del Método del Valor de Capital Natural al caso de la extracción de petróleo en Colombia. En la primera subsección se presenta el análisis de bienestar social, definiendo la función de bienestar social como la suma de los excedentes del productor y consumidor. Posteriormente se presenta la estimación de la función de demanda que se utilizará luego para la estimación del excedente del consumidor. Finalmente se presenta el cálculo de los precios sombra que están basados en esa descripción de la función de bienestar social.

3.1 Estimación del bienestar social a partir del excedente del productor y del consumidor.

La estimación de la función de bienestar explícita se asume aquí como la suma del excedente del consumidor y del productor, esto es: $U = EC + EP$. Esta forma funcional se utilizará para calcular la ecuación (8), precio sombra que servirá de manera seguida para calcular las ecuaciones (9) y (27). El excedente del productor se calcula como la renta del recurso, a partir de costos de producción medios¹⁸. Esto es, se define como la diferencia entre el precio y los costos de producción medio por barril de petróleo anual.

Para el caso del excedente del consumidor es necesario estimar los parámetros de la misma a partir de la definición de una función de demanda tipo Cobb-Douglas (elasticidad constante) utilizando como bien sustituto el gas natural¹⁹, dado que éste posee un buen grado de sustituibilidad en las necesidades de consumo sumado a las propiedades energéticas similares. Es de anotar que cuando se trabaja sobre aspectos de bienestar uno puede debatir si la elección de la función de utilidad es una cuestión empírica o ética (Koopmans, 1967). Esto es, la decisión dependerá de las condiciones, las opciones y la disponibilidad de datos que permitan estimar dicha función.

¹⁸ El costo de producción (exploración, desarrollo, producción y transporte) del petróleo en Colombia está entre US\$5.30 Y US\$ 6.50, según el V Seminario Internacional sobre Análisis y Mercados Energéticos llevado a cabo en el año 2001 en la ciudad de Bogotá, Colombia.

¹⁹ Existen otras estimaciones similares donde no necesariamente se utilizan bienes sustitutos. Para ello refiérase a Cooper (2003).

Sin embargo es necesario resaltar que hace ya algún tiempo se ha venido trabajando sobre una línea de investigación en teoría económica que involucra el análisis dinámico de bienes o recursos almacenables bajo el enfoque de expectativas racionales desarrollados por Newbery y Stiglitz (1981), Sheinkman y Schetman (1983), Deaton y Laroque (1992) y Bobenrieth, Bobenrieth y Wright (2002)²⁰. En este caso para efectos de llevar a cabo la aplicación de este modelo teórico dados los objetivos planteados inicialmente no se modela perfectamente la función de demanda, por tal razón no se utiliza aquí una función de demanda por inventario o, lo que es lo mismo, una función de demanda con motivo de especulación. Esto implicaría aplicar una función de demanda derivada de un proceso estocástico teniendo en cuenta el equilibrio competitivo de expectativas racionales la cual depende directamente de la variabilidad tanto del precio como del stock del recurso donde entran a jugar un rol importante los especuladores que tomarían sus decisiones en el tiempo dados los costos y beneficios esperados de almacenar este recurso natural no renovable bajo algunos supuestos específicos²¹, lo cual no es un procedimiento trivial dada la complejidad teórica que ello implica y la vasta cantidad de información que se requiere.

Así la función de demanda a estimar está dada por:

$$\text{conpet}_t = (\text{ppetd}_t)^{\beta_1} (\text{pgasd}_t)^{\beta_2} (\text{pibr}_t)^{\beta_3} e^{u_t} \quad (28)$$

Donde **conpet** es el consumo de petróleo agregado nacional; **ppetd**, el precio del petróleo internacional deflactado con base en 1975; **pgasd**, precio del gas natural deflactado con base en 1975; **pibr**, el producto interno bruto real con base en 1975 y u el término estocástico o de ruido blanco. Esta función se estima utilizando un análisis de series de tiempo para el período dado

20 Los cuales se apoyan en trabajos anteriores igualmente importantes: Gustafson (1958). "Carryover Levels for Grains" *US Department of Agriculture, Technical Bulletin* 1178; Muth (1961). "Rational expectations and the theory of prices movements" *Econometrica* 29, 315 – 335; Samuelson (1971). "Stochastic speculative price" *Proceedings of the National Academy of Science* 68, 335 – 337; Danthine (1977). "Martingale, market efficiency and commodity prices". *European Economic Review*, 10, 1-17; entre otros.

21 En lo que concierne a la neutralidad frente al riesgo, la racionalidad y la ausencia de los costos de transacción a partir del análisis de los precios y su distribución en el tiempo: "Dado un precio inicial finito, la varianza de los precios tiene un enfoque infinito. Para el caso del comportamiento de los recursos agotables se observa que una distribución invariante de los precios es continua y el consumo esperado en cualquier período futuro excede una constante estrictamente positiva, independiente del tiempo" (Bobenrieth, Bobenrieth y Wright, 2002).

entre los años 1975 y 2003²². De esta manera la ecuación a estimar en términos logarítmicos estaría dada por:

$$\ln(\text{conpet}_t) = \beta_1 \ln(\text{ppetd}_t) + \beta_2 \ln(\text{pgasd}_t) + \beta_3 \ln(\text{pibr}_t) + u_t \quad (29)$$

Donde los parámetros a estimar representarían las elasticidades precio del petróleo (β_1) y gas natural de la demanda (β_2) y la elasticidad ingreso de la demanda (β_3).

Esta estimación se hizo a partir del análisis de series de tiempo, analizando la estacionariedad de las series, luego se define un análisis uniecuacional y se precedió entonces aplicando el enfoque de Engle y Granger, esto es, planteando un modelo estático para verificar si existe una relación de cointegración de largo plazo a partir de la estimación de coeficientes superconsistentes (Harris, 1995). Luego, se determinó un análisis dinámico que confirma la rapidez de convergencia al equilibrio del modelo frente a un shock externo en cualquiera de las variables analizadas. También se analizó la endogeneidad de las series a partir del Test de Hausman. Y luego se estimó el modelo dinámico (no lineal) propuesto por Dolado et. al. y se calcularon las varianzas de los coeficientes a partir del método delta. Este se comparó con el modelo estático inicial y, por último, se plantearon las conclusiones para su aplicación en el modelo teórico a trabajar.

En conclusión, la metodología econométrica utilizada aquí parte de un modelo económico bien especificado como lo es la función de demanda con elasticidad constante y luego se aplican los métodos estadísticos para estimar los parámetros. De esta manera la estadística es usada pasivamente como una herramienta para obtener algunas estimaciones decisivas.

Luego de estimarse la función de demanda, es decir, teniendo ya los parámetros estimados, se calculó el excedente del consumidor anual de la siguiente manera:

$$EC_t = \left(\frac{\beta_1}{1 + \beta_1} \right) \frac{\text{conpet}_t^{\frac{1+\beta_1}{\beta_1}}}{(\text{pgasd}_t)^{\frac{\beta_2}{\beta_1}} (\text{pibr}_t)^{\frac{\beta_3}{\beta_1}}} - (\text{ppetd}_t)(\text{conpet}_t) \quad (30)$$

²² Datos que fueron provistos por la Empresa Colombiana de Petróleos (ECOPETROL), Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) , la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) y el Banco de la República de Colombia a partir del grupo de Crecimiento Económico (GRECO,2002).

Tal ecuación surge a partir de la definición de la ecuación tipo Cobb-Douglas al despejar el precio del petróleo de la función de demanda con elasticidad constante y calcular la integral definida entre cero y las cantidades demandadas en cada período para hallar el área bajo la curva de demanda entre la misma y el precio del petróleo observado en cada momento del tiempo. Estos valores se sumarán a los valores temporales del excedente del productor: $EP_t = (ppet_t - CMe_t)Q$ (31) donde Q representa las cantidades producidas. Esto para concretar así el bienestar general propuesto. Esto se hará de igual manera tanto para el primer como para el segundo modelo, es decir la definición de la función de bienestar social es la misma en ambos casos.

3.1.1 *Estimación de la Función de Demanda.*

Se busca estimar los parámetros de la función de demanda de petróleo en Colombia con el objeto de calcular el excedente del consumidor para ser incluido como un componente de la función de bienestar social. Pero para esto es necesario utilizar las herramientas que conciernen a la econometría de series de tiempo para el caso uniecuacional. Para ello es necesario establecer un análisis de cointegración sobre el modelo a estimar y analizar así la relación existente entre las variables independientes y el consumo de petróleo tanto en el corto como en el largo plazo.

Después de testear con el test Dickey-Fuller, se observó que el primer modelo tentativo de largo plazo o estático, dada la ecuación (29) no es razonable estimarlo tal cual dado que no coincide el grado de integración de la serie dependiente (*LCONPET*) con las variables independientes. Esto es, no podemos especificar un modelo donde la variable dependiente sea I(2) y las variables dependientes sean I(1). Esto determinaría un modelo no balanceado dado que una serie I(2) nunca puede explicar una serie I(1).

En un segundo modelo se busca establecer un mismo nivel de integración a partir de la diferencia de la variable dependiente, en nuestro caso del logaritmo del consumo de petróleo. Así analizamos otro modelo el cual determina la estimación de los siguientes parámetros:

$$\mathbf{DLCONPET = 0.26 LPGASD - 0.12 LPPETD + 0.09 LPIBR \quad (32)}$$

Al diferenciar una vez la variable dependiente se observa un modelo estimado con estabilidad en los signos y tamaño adecuado en los coeficientes estimados. Lo anterior permite interpretar de manera racional los signos de los coeficientes estimados. Cuando se examina la estacionariedad de sus residuos, se concluyen que estos son I(0), lo cual se convierte en condición necesaria y

suficiente para confirmar la relación de las variables analizadas, confirmando así la existencia de una relación de cointegración en el modelo propuesto. Por ello nos centramos en el enfoque de Engle y Granger verificando la relación de cointegración a largo plazo, esto es, verificando si los residuos son estacionarios descartando la posibilidad de que la regresión sea espuria y confirmando la validez de este primer modelo. Dado esto, no es necesario analizar los valores *t-student* ni los *valores-p* para examinar la significancia estadística de los parámetros porque se supone que los estimadores no siguen una distribución estándar, es decir, cada uno sigue una distribución única y desconocida. También se estimó el modelo dinámico o modelo de corto plazo que relaciona la variable dependiente con las variables independientes tanto actuales como rezagadas y también con la variable dependiente rezagada, donde $y_t = DLCONPET$; $x_{1t} = LPGASD$; $x_{2t} = LPPETD$; $x_{3t} = LPIBR$, se tiene que:

$$y_t = \alpha_0 + \gamma_0 x_{1t} + \gamma_1 x_{1t-1} + \gamma_2 x_{2t} + \gamma_3 x_{2t-1} + \gamma_4 x_{3t} + \gamma_5 x_{3t-1} + \alpha_1 y_{t-1} + \varepsilon_t \quad \text{donde } \varepsilon_t \sim N(0, \sigma^2)$$

Luego, el modelo de corrección de errores sería:

$$\Delta y_t = \gamma_0 \Delta x_{1t} + \gamma_1 \Delta x_{2t} + \gamma_2 \Delta x_{3t} - (1 - \alpha_1)(\hat{y}_{t-1} - \hat{\beta}_0 - \hat{\beta}_1 x_{t-1}) + \varepsilon_t$$

Esta ecuación nos ayuda a confirmar la relación de largo plazo que habíamos evidenciado en el modelo estático, esto es, a partir de verificar si el modelo tiende hacia un equilibrio dado un shock externo en cualquiera de sus variables. Para ello se estimó el modelo de la ecuación (32) en diferencias incluyendo los residuos del modelo estático o de largo plazo rezagado a un período (RESIDLP(-1)). El modelo estimado fue:

$$DDLCONPET = 0.7DLPGASD - 0.15DLPPETD + 2.4DLPIBR - 0.34RESIDLP(-1) \quad (33)$$

Aquí se observan los efectos de corto plazo para cada variable independiente sobre la variación del consumo de petróleo, manteniendo la estabilidad en los signos dada la teoría económica. Este resultado es realmente importante a pesar de estimar con una muestra tan pequeña ya que se confirma la existencia de una relación de largo plazo, esto es, a partir del análisis del parámetro estimado del residuo del modelo estático lo cual nos confirma que el modelo converge al equilibrio (dado que este es menor que 1 y con signo negativo). Podemos concluir que la velocidad de ajuste del modelo es del 34% en cada año dado un shock externo, es decir, por ejemplo cuando

aumenta bruscamente el consumo de petróleo por un fenómeno de expansión económica el efecto se anula en un 34% el mismo año. Confirmando así la estabilidad del modelo estimado.

Sin embargo es claro que existe una clara limitación en las estimaciones dado que la muestra disponible es muy pequeña, por lo cual es difícil apropiarse de las propiedades asintóticas de los estimadores por el método de Engle y Granger los cuales sostienen que la relación de cointegración está dada a pesar de enfrentar problemas de autocorrelación, varianza no constante, y endogeneidad. Para ello fue necesario realizar el test de Hausman (1978) para examinar la endogeneidad de las variables independientes y, en última instancia, la consistencia de los parámetros estimados. Este consiste en correr dos modelos: el primero consiste en regresar la variable en análisis con respecto a las otras variables independientes y con respecto a su mismo rezago a un año (como variable instrumental). El segundo modelo consiste en estimar el modelo estático ya conocido pero incluyendo los residuos estimados en el primer modelo. El resultado es que no existe endogeneidad en las series analizadas dado que el parámetro estimado de los residuos en los segundos modelos (principales) no es estadísticamente significativo. Esto significa que los estimadores de mínimos cuadrados ordinarios son consistentes e insesgados. También se examinó un modelo dinámico a partir del modelo propuesto por Kremers, Ericsson y Dolado (1992), utilizando parámetros no lineales que representan los efectos multiplicadores a largo plazo²³.

3.2 Cálculo de las cotas inferiores del precio sombra del stock del petróleo a partir de la variación del bienestar en el tiempo.

El precio sombra se calculó a partir de la variación en la función de bienestar dada las decisiones de extracción en el tiempo, específicamente como el valor presente de los flujos futuros de utilidad marginal del capital a partir de la estimación del nivel de bienestar en cada momento del tiempo. Para el cálculo de la cota inferior de los precios sombra se utilizó la información pertinente al excedente del consumidor y el excedente del productor para cada año. Para el caso del excedente del consumidor se aplicó la ecuación (30), esto a partir de los parámetros calculados en la ecuación (34). El excedente del productor se calculó a partir de la ecuación (31).

23 Aquí se concluyó que este conserva la estabilidad en signos y también el orden de magnitud entre los parámetros, esto es, la elasticidad precio del gas con respecto a la variación del consumo del petróleo es mayor (en términos absolutos) que la elasticidad precio del petróleo y a su vez ésta es mayor (en términos absolutos) a la elasticidad ingreso (PIB real). Además se llegó al mismo resultado.

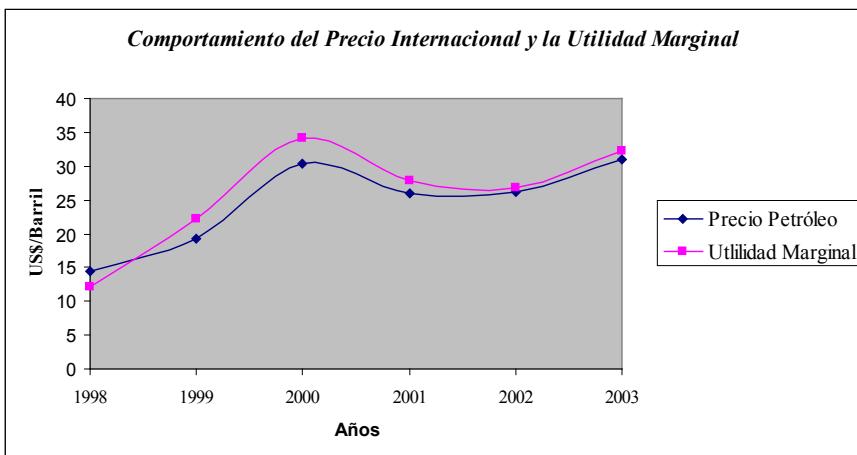
Seguidamente se calcula la utilidad total y la utilidad marginal, esta última como el impacto que tiene el incremento del stock de capital petróleo en una unidad adicional sobre el excedente del consumidor y sobre el excedente del productor. A ésta se le calculó el valor presente en cada momento del tiempo (anual), para el período de análisis, lo cual permite obtener los precios sombra propuestos por el modelo de Mäler (2001) para diferentes tipos de interés, refiérase al cuadro (2). También se examinó la sensibilidad con respecto a los diferentes tipos de interés, confirmando la existencia de una sensibilidad importante del valor presente de la utilidad marginal con respecto a diferentes tipos de interés lo cual muestra un promedio en todo el período de aproximadamente un 30%. Por lo cual también puede concluirse que a medida que disminuye la tasa de descuento frente a ésta aumenta de manera considerable. Nótese además que las utilidades marginales se aproximan a los precios internacionales del petróleo, lo cual es mostrado en el gráfico (1). Esto implica que bajo un comportamiento racional de los agentes, los precios sombra reflejan el incremento en el bienestar de los mismos dado el aumento en una unidad en el stock de capital petróleo cuando se asumen MAA. En este caso cuando se utilizan los precios internacionales, el manejo inter-temporal del recurso no es tenido en cuenta, lo que determina una sobrestimación en el valor del capital petróleo dado que éstos superan de manera importante a los precios sombra, calculados para cada subperíodo dado entre 1998 y 2003.

Cuadro 2
Precios Sombra para diferentes tasas de descuento
(US\$/Barril)

Año	Precio Sombra. (10%)	Precio Sombra (7%)	Precio Sombra. (3%)	Precio Sombra. (1%)
1998	\$ 1,31	\$ 1,94	\$ 5,09	\$ 18,94
1999	\$ 2,31	\$ 3,36	\$ 8,23	\$ 25,74
2000	\$ 3,35	\$ 4,75	\$ 10,80	\$ 29,36
2001	\$ 2,78	\$ 3,96	\$ 9,15	\$ 24,67
2002	\$ 2,71	\$ 3,86	\$ 8,73	\$ 21,49
2003	\$ 2,92	\$ 4,02	\$ 8,04	\$ 16,09

Fuente: Cálculos Autores.

Gráfico 1



Fuente: Cálculos Autores.

Al hacer uso de la ecuación (27) es posible calcular también los precios sombra cuando asumimos los mecanismos de asignación no autónomos. Esto es, cuando asumimos una senda óptima de extracción y cuando se involucra explícitamente la variable precio internacional, para los dos tipos de interés utilizados para analizar las medidas de sustentabilidad, por lo cual se observa una importante diferencia, siendo estos últimos mayores a los niveles calculados para el caso de MAA y muy diferentes a los precios internacionales dado que su cálculo proviene de la ponderación de los mismos con el factor de actualización de la utilidad marginal en términos del cambio en el bienestar determinado a su vez por el excedente del productor para el período de estudio ya mencionado.

Cuadro 3
Precios Sombra con MANA

Año	Precio Sombra 3%	Precio Sombra 7%
1998	\$ 63,86	\$ 63,86
1999	\$ 233,60	\$ 242,67
2000	\$ 557,28	\$ 601,40
2001	\$ 370,00	\$ 414,80
2002	\$ 335,63	\$ 390,88
2003	\$ 466,68	\$ 564,62

Fuente: Cálculos Autores.

Si se observan las cifras calculadas en el cuadro (3) puede concluirse que el concepto de precio sombra nos permite determinar un nivel máximo al cual podrían ser intercambiados las cantidades de petróleo producidas para que éstas fuesen extraídas de una manera óptima, un caso bastante ajeno a la realidad, por ello la presente investigación se enfoca sobre el caso de MAA para la valoración del capital petróleo. Esto se debe a que este último caso no asume un impacto directo del precio internacional y al rezago temporal que existe entre la respuesta de los agentes y la variación del precio del mismo, lo que sí asume el segundo modelo, esto es, una reacción inmediata por parte de los agentes dado el precio internacional actual para responder a una situación de extracción óptima del recurso, lo que determina una cantidad de restricciones teóricas no realmente evidenciadas en el mundo real. Por ello el modelo más adecuado para analizar el valor del capital petróleo y que presenta un comportamiento similar y más real con el mundo petrolero es el primer modelo. Sin embargo es evidente el importante crecimiento que han reportado los precios de mercado a nivel mundial para los últimos años²⁴. En este caso si comparamos los precios sombra con los internacionales se observa claramente que estos últimos estarían subestimando el valor del capital petróleo.

3.3 Estimación del valor del stock de capital petróleo utilizando tales cotas inferiores.

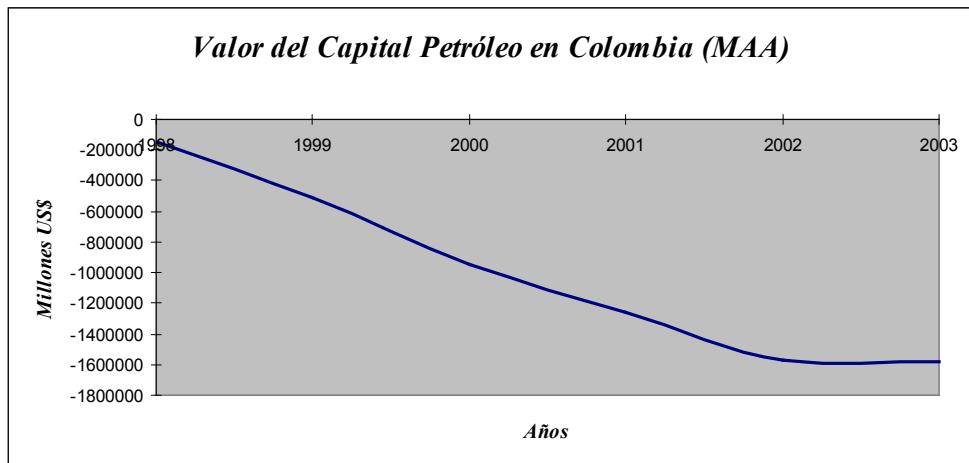
En este punto es necesario determinar el valor del capital petróleo en el período t segúnel marco teórico basándose en Aniyar (2002) a partir de la siguiente ecuación: $W_{OK_t} = W_{OK_{t-1}} + p_t (A_t - D_t)$ ²⁵, donde W_{OK_t} es el valor del stock de capital petróleo en un momento del tiempo dado, A_t son las adiciones a las reservas probadas en cada período de tiempo y D_t es el agotamiento determinado directamente por la producción. Nuestro análisis se diferencia de Aniyar (2002) en que en ese trabajo los autores no calculan explícitamente los precios sombra, sino que utilizan los precios internacionales del petróleo para analizar la sustentabilidad de su extracción en Venezuela. Por ello, aquí se extiende el trabajo de Aniyar (2002) incorporando explícitamente una metodología de cálculo de los precios sombras y lo aplica al caso Colombiano. El método que aplicamos de

24 Para los años 2007 y 2008 se observó un promedio anual de 72,17 y de 99,67 dólares por barril de petróleo, según la Bolsa de Nueva York. (Consultado el 24 de marzo de 2010) http://www.dane.gov.co/index.php?id=22&option=com_content&task=view (Consultado el 24 de marzo de 2010)

25 Dado que el stock del capital está dado por: $S_{OK_t} = S_{OK_{t-1}} + A_t - D_t$

valoración del capital para un recurso no renovable se realizó a partir de las cotas inferiores del precio sombra, mencionado en el numeral anterior, cuando los mecanismos de asignación son autónomos, esto es, para el modelo 1. Al calcular el valor del capital utilizando los precios sombra cuando los mecanismos de asignación no son autónomos se observa la misma dinámica, esto es el mismo comportamiento del valor del capital en el tiempo²⁶.

Gráfico 2



Fuente: Cálculos Autores.

Como puede observarse el valor del capital natural ha mostrado una tendencia totalmente decreciente estabilizándose para los períodos 2002 y 2003. Sin embargo es evidente que sus valores son todos negativos, lo que refleja de cierta forma un proceso de pérdida de valor del capital petróleo dado que los hallazgos para cada momento del tiempo son menores a las tasas de extracción de dicho recurso en el país cuando asumimos una tasa de descuento igual al 7%. Estos valores negativos determinan de alguna manera una pérdida de bienestar inter-temporal o inter-generacional, dado que compromete una degradación en el valor existente del stock de capital petróleo para las generaciones futuras²⁷.

26 En lugar de esto sería más interesante examinar el comportamiento utilizando los precios netos, dado que pueden analizarse las ganancias de capital.

27 La tasa de reducción promedio en el período dado para el valor del capital petróleo fue alrededor de un 79%.

3.4 Sustentabilidad en la explotación del petróleo.

Esto se desarrolló utilizando las variables halladas mediante los procedimientos metodológicos anteriores y la aplicación de los resultados de los modelos planteados por Mäler y Dasgupta. Esto es, aplicando los resultados obtenidos en la variación en el valor del capital petróleo, para el primer caso. Para el segundo caso se utilizó el precio internacional y las cantidades extraídas y vendidas para determinar el cambio relativo promedio anual. Para ello se asumió que las variables S_t y R_t están representadas por las reservas probadas y la producción observadas para cada año, respectivamente, dado que se asume un impacto indirecto de la producción y venta del recurso energético en el mercado mundial sobre el ingreso de divisas para importar bienes y servicios del exterior²⁸. De esta manera se pretende analizar el comportamiento de la variación del bienestar entre varios períodos contiguos, esto es, examinar si es o no es decreciente.

En primer lugar, utilizando los precios sombra calculados para el caso en que la tasa de descuento es igual al 7% y al 3%²⁹, se calcula la sostenibilidad para el caso en que se supone que los mecanismos de asignación son autónomos. Obsérvese el siguiente cuadro, donde la diferencia de la función de bienestar medida por la variación de las reservas valorada a los precios sombra calculados son negativos, este resultado refleja la insostenibilidad en la extracción de dicho recurso³⁰.

28 Supuesto algo realista para el caso de los países en desarrollo, donde la apertura al mercado internacional ha determinado una mayor entrada de bienes y servicios que los que podrían salir hacia el exterior.

29 Dado que la primera responde al nivel de la tasa de interés de mercado de referencia en los últimos años para Colombia y la segunda corresponde al nivel generalmente utilizado para establecer la preferencia en el tiempo.

30 Fenómeno que se confirma con la posibilidad actual imperante de llegar a un desabastecimiento del recurso dada la tendencia decreciente del stock petrolero en los últimos años. “Colombia produce actualmente 540.000 barriles diarios. En 1999 la producción superaba los 800.000 barriles diarios, pero desde entonces no se ha descubierto ningún yacimiento importante que hubiera podido revertir la tendencia declinante” (www.elcolombiano.com, diciembre 2004).

Cuadro 4

Sustentabilidad de la extracción de petróleo cuando se tienen mecanismos de asignación autónomos.

	Pérdida de Bienestar Inter-temporal Millones U\$ al 7%	Pérdida de Bienestar Inter-temporal Millones U\$ al 3%	Sostenibilidad
V2 – V1	-365	-960	No sostenible
V3 – V2	-1065	-2611	No sostenible
V4 – V3	-616	-1400	No sostenible
V5 – V4	-835	-1926	No sostenible
V6 – V5	-345	-780	No sostenible

Fuente: Cálculos Autores.

En segundo lugar utilizando los precios sombra con la tasa de descuento igual al 7% y al 3% se establece el análisis de sostenibilidad dado que se asume que los mecanismos de asignación son no autónomos. De esta manera el cambio anual relativo promedio del precio mundial del petróleo (\square) es igual a 1,2. Esto determina un impacto directo sobre esta medida de sostenibilidad dado que los agentes asumen tal crecimiento dentro de sus expectativas de extracción.

Cuadro 5

Sustentabilidad de la extracción de petróleo cuando se tienen mecanismos de asignación no autónomos.

	Pérdida de Bienestar Inter-temporal Billones ³¹ U\$ al 7%	Pérdida de Bienestar Inter-temporal Billones U\$ al 3%	Sostenibilidad
V2 – V1	-6237	-6237	No sostenible
V3 – V2	-24651	-25609	No sostenible
V4 – V3	-49667	-53599	No sostenible
V5 – V4	-28833	-3232	No sostenible
V6 – V5	-24978	-2909	No sostenible

Fuente: Cálculos Autores.

31 Según la clasificación del sistema americano.

Si se observa el cuadro anterior, también puede concluirse que aplicando el modelo teórico 2, tampoco se obtienen resultados de sostenibilidad en el período analizado, lo cual determina unos altos niveles de pérdida de bienestar dirigidos principalmente por la ausencia en la modelación del capital físico y humano.

4. Conclusiones.

En cuanto al aspecto metodológico puede decirse que la econometría utilizada aquí parte de un modelo económico bien especificado como lo es la función de demanda con elasticidad constante y luego se aplican los métodos estadísticos para estimar los parámetros. De esta manera puede considerarse que la estadística es usada pasivamente como una herramienta para obtener algunas estimaciones decisivas. Sin embargo se examina realmente la relación de equilibrio de las variables tanto en el corto como en el largo plazo apoyado en el enfoque de Engle y Granger y bajo el enfoque de Dolado et. al, también se procede a confirmar la endogeneidad de las variables independientes. Esto permite concluir que la relación de las variables estimadas en dichos modelos econométricos conservan la misma dirección (estabilidad en signos) y la proporción del tamaño del impacto entre las variables independientes, esto es, de las elasticidades estimadas ($|$ precio del gas $|>|$ precio del petróleo $|>|$ PIB real $|$). Lo que posibilita la utilización indiferente de tales parámetros estimados en el cálculo del excedente del consumidor y, por ende, en los precios sombra. En el período analizado entre 1998 y el 2003 se calculó la utilidad marginal del consumo de petróleo, la cual mostró un comportamiento similar a los precios internacionales del petróleo. Al aplicar el valor presente a la misma se obtuvo el precio sombra bajo la metodología especificada. Estos se utilizaron según las distintas tasas de descuento, en donde para el caso de Colombia la tasa de mercado se aproxima al 7% en los últimos años. De otro lado se asumió una tasa del 3% dado que ésta puede considerarse como la tasa de preferencia en el tiempo. Sin embargo se examinó la sensibilidad del precio sombra a cambios en la tasa de descuento, la cual alcanzó aproximadamente un promedio del 30%, para el período mencionado. También se calcularon los precios sombra cuando asumimos MANA para lo cual representaron precios con valores muy alejados de la realidad, dado que para este caso se asume un comportamiento óptimo de los agentes respondiendo a decisiones de extracción a partir de los cambios en el precio internacional del mismo.

Al analizar y aplicar el modelo teórico bajo el parámetro de sustentabilidad dado por $V_{t+1} - V_t > 0$, para cada subperíodo, se concluye también que entre 1998 y 2003 no hay una extracción de petróleo sostenible en cada momento del tiempo tanto para el caso en que suponemos que los

mecanismos de asignación son autónomos como para el que no son autónomos. Esto es, a partir del criterio de sostenibilidad fuerte como se mencionó en la parte introductoria del presente documento. Estas conclusiones se complementan precisamente con la situación actual que enfrenta el país frente a un posible desabastecimiento petrolero para los próximos años, donde es evidente la tendencia declinante del stock de petróleo.

Es necesario aclarar que la aplicación de estos modelos implican algunas limitaciones importantes, entre las cuales se encuentran los elementos que se tienen en cuenta en la función de utilidad dado que se concentra en el abastecimiento de dicho recurso en el país, esto es, no se asumen las externalidades negativas que genera la combustión de los derivados del petróleo (sobre todo por el parque automotor). De otro lado no se asumen los otros capitales que hacen parte del capital total representado en las cuentas nacionales, esto es, el capital físico y el capital humano. Cabe aclarar, además, que esta metodología se desarrolló teniendo en cuenta el enfoque de la escasez ricardiana³², donde se asume que los costos de explotación de este recurso natural no renovable son crecientes, esto es, donde se explotan primero los pozos más productivos y luego aquellos que implican un mayor esfuerzo, pues se hace abstracción también de los posibles cambios tecnológicos y el posible reciclaje del recurso que permitirían reducir ostensiblemente los mismos. Ahora, si las rentas petroleras obtenidas se reinvertiesen en un capital natural sustituto los resultados obtenidos de sostenibilidad serían discutiblemente diferentes, primero porque el sustituto más cercano, de acuerdo a las características energéticas obedece a otro hidrocarburo en estado gaseoso, como lo es el gas natural, que finalmente se asocia a los mismos hallazgos del crudo, esto sumado a la gran diversidad de derivados provenientes del mismo. Sin embargo, es posible argumentar que existiría potencialmente un nivel sostenibilidad desde el enfoque de la sostenibilidad débil, de acuerdo al supuesto de Hartwick y Solow a partir de la regla ahorro – inversión, esto se cumpliría sólo bajo un escenario de una economía cerrada, siempre y cuando el stock de capital total se mantenga constante (Figueroa y Calfucura, 2002: 3). Asumiendo igualmente un alto nivel de sustitución entre los diferentes tipos de capital ya mencionados con respecto al capital natural, pero esto difiere del enfoque de sostenibilidad fuerte, sobre el cual se enmarcan este tipo de modelos aquí retomados que hacen parte de las fronteras del conocimiento en el área de la economía ecológica, desde un criterio de sostenibilidad inter-temporal.

32 A partir del reconocimiento de la existencia de las tierras más fértiles que otras por la misma explotación del recurso, lo cual implica el decrecimiento de la calidad de los mismos en el tiempo según David Ricardo (Hall y Hall, 1984:365).

Dado que el marco teórico determina a los precios sombra o precios de cuenta como el valor presente de la utilidad marginal, dado un cambio en el stock de capital petróleo, el cálculo de los mismos es relativamente subjetivo debido a que su horizonte (o período final del proyecto) no debe determinar en sí el valor presente de cada período. Esto es, no debe reconocerse como base del bienestar de los otros años, razón por la cual se asumen estos cálculos como los valores mínimos que éstos pudiesen tomar. Así se concluye que el cálculo de los mismos corresponde a sus cotas inferiores dado que se no se asume el tiempo siguiente al año 2003. Sin embargo, cabe señalar que tasas de descuento positivas llevan a que valores futuros más allá del horizonte final tengan valores cada vez menos importantes en términos del valor presente, lo que lleva a que estas cotas inferiores sean buenas aproximaciones.

Al calcular la utilidad marginal cuando varían las reservas en cada período manteniendo los precios internacionales constantes, se observa que éstos no cambian dado que las reservas de Colombia no tienen un impacto relevante sobre la definición o variación del precio internacional del petróleo, de esta manera se asume teóricamente que la utilidad marginal es solo obtenida a partir de la variación en el stock de capital natural.

Cuando se calcula el valor del capital petróleo a partir de los precios sombra suponiendo mecanismos de asignación autónomos, se observa una tendencia decreciente en el mismo para el período analizado a pesar de estabilizarse tal comportamiento a partir del año 2002. Estos valores negativos determinan de alguna manera una pérdida de bienestar inter-temporal o inter-generacional, dado que compromete una degradación en el valor existente del stock de capital petróleo para las generaciones futuras reflejando una administración poco sostenible con respecto al uso de este recurso.

Los precios sombra se configuran aquí como una alternativa a los diferentes métodos de valoración de recursos naturales no renovables, considerando la dinámica del bienestar de los agentes (consumidores y productores) y el cambio en el stock existente para cada subperíodo analizado. De esta manera se obtuvo una valoración del recurso en términos inter-temporales, lo cual muestra una importante diferencia con respecto a los precios de mercado, los cuales generalmente sobreestiman el valor de dicho stock en cada subperíodo, de acuerdo al alto nivel de volatilidad y a la propensión de conflictos geopolíticos reflejados en los precios de estos recursos naturales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- Aniyar, Sara. 2002. "Estimating the Value of Oil Capital in a Small Open Economy: The Venezuelan Example." Beijer International Institute of Ecological Economics Beijer Discussion Paper Series 159.
- Bobenrieth, Eugenio; Bobenrieth, Juan and Brian Wright. 2002. "A commodity price process with a unique continuous invariant distribution having infinite mean." *Econometrica*, 70(3): 1213 – 1219.
- Cooper, John .2003. "Price elasticity of demand for crude oil: Estimates for 23 countries." OPEC Review, (27): 1 – 8.
- DANE. 2010. Comparativos Históricos. http://www.dane.gov.co/index.php?id=22&option=com_content&task=view (Consultado el 24 de marzo de 2010)
- Dasgupta, Partha, and Karl-Göran Mäler. 2000. "Net National Product, Wealth, and Social Well Being." Environment and Development Economics, 5(1): 69 – 93.
- Dasgupta, Partha, and Karl-Göran Mäler. 2001a. "Whealth as a Criterion for Sustainable Development." Beijer International Institute of Ecological Economics Beijer Discussion Papers Series 139.
- Dasgupta, Partha, and Karl-Göran Mäler. 2001b. "Intertemporal Welfare Economics in Imperfect Economics." Beijer International Institute of Ecological Economics Beijer Discussions Papers Series 140.
- Deaton, Angus and Guy Laroque. 1992. "On the Behavior of Commodity Prices." *Review of Economic Studies*, 59: 1 – 23.
- ECOPETROL .2004. Empresa Colombiana de Petróleo. <http://www.ecopetrol.com.co/especiales/elpetroleoysumundo/petroleoenelmundo.htm> (Consultado el 19 de julio de 2005)
- ECOPETROL. 2008. Empresa Colombiana de Petróleos. <http://www.ecopetrol.com.co/especiales/InformeAnual2008/estado.htm> (Consultado el 24 de marzo de 2010)
- ECOPETROL. 2010. Empresa Colombiana de Petróleos. http://www.ecopetrol.com.co/especiales/carta_petroleira108/rev_colaboracion.htm (Consultado el 24 de marzo de 2010)
- GRECO .2002. El Crecimiento Económico Colombiano Siglo XX. Bogotá: Banco del a República/ Fondo de Cultura Económica.
- Figueroa Eugenio, Calfucura, Enrique. 2002. "Depreciación del Capital Natural, Ingreso y Crecimiento Sostenible: Lecciones de la Experiencia Chilena." Banco Central de Chile, Documentos de Trabajo. No. 138.
- Hall, Darwin, and Jane Hall. 1984. "Concepts and Measures of Natural Resources Scarcity with a Summary of Recent Trends." *Journal of Environmental Economics and Management*, 11: 363 – 379
- Harris, Richard .1995. "Using Cointegration in Econometric Modeling." Portsmouth: Prentice Hall.
- Hotelling, Harold. 1931. "The Economics of Exhaustible Resources." *The Journal of Political Economy*, 39(2): 137 – 175.
- Kremers, Jeroen, Neil Ericsson and Juan Dolado. 1992. "The power of cointegration tests." *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*, 54(3): 325 – 348
- Koopmans, Tjalling C. 1967. "Objectives, Constraints and Outcomes in Optimal Growth Models." *Econométrica*, 35(1): 1 – 15.
- Mäler, Karl-Göran. 2001. "Wealth and Well –Being in a Model with Discrete Time." Beijer International Institute of Ecological Economics Beijer Discussion Paper Series No. 146.

- Newbery, David, and Joseph Stiglitz. 1981. "The Theory of Commodity Price Stabilization: A Study in the Economics of Risk." Oxford: Clarendon Press.
- Scheinkman, J., and J. Schetman. 1983. "A Simple Competitive Model with Production and Storage." *Review of Economics Studies*, 50: 427 – 441.
- UPME. 2003. "Plan Energético Nacional; Estrategia Energética Nacional. Visión 2003 – 2020." Bogotá: Unidad de Planeación Minero Energética.
- UPME. 2007. "Plan Energético Nacional 2006 – 2019." Bogotá: Unidad de Planeación Minero Energética.
- UPME. 2009. "La cadena del petróleo 2009." Bogotá: Unidad de Planeación Minero Energética.