

O USO DUNHA COTA VARIABLE DE ROYALTY PARA PRESERVAR AS RESERVAS DE PETRÓLEO

JOÃO MANOEL LOSADA MOREIRA / LUCÉLIA IVONETE JULIANI / SINCLAIR MALLET GUY GUERRA
Universidade Federal do ABC (UFABC)

RECIBIDO: 10 de abril de 2012 / ACEPTADO: 27 de setembro de 2012

Resumo: Neste traballo analízase a posibilidade de utilizar unha cota variable de royalty para inducir as empresas nunha contorna competitiva a preservar as reservas de petróleo. Inicialmente, desenvolveuse un modelo da evolución das reservas de petróleo, dispoñible para a extracción por un empresario en réxime de competencia, incluíndose na expresión do beneficio económico a cota variable de royalty. O modelo fórmulase como unha función logística que describe o comportamento dos recursos naturais renovables. Os resultados obtidos mostran que a situación que maximiza o beneficio económico do empresario e reduce a taxa de extracción do petróleo se produce cando a rendibilidade neta do empresario se aproxima á súa taxa de xuro relevante. Isto é debido á propensión do empresario a aumentar a taxa de extracción dos recursos naturais para darlles cabida ás variacións na rendibilidade causadas polo mercado. A introdución dunha cota variable de royalty proporciona unha variable que pode compensar estas flutuacións e ofrecerlle ao empresario unha rendibilidade próxima á súa taxa de xuro relevante. Os resultados mostran que é posible regular, dentro duns límites, o nivel de reservas de recursos naturais e obter recursos financeiros para levar a cabo políticas sociais.

Palabras clave: Recursos naturais non renovables / Petróleo / Royalty / Sostibilidade.

Use of Variable Rate of Royalty to Preserve Oil Stocks

Abstract: This paper discusses the possibility of using a variable royalty rate to induce firms to preserve oil reserves in a competitive market. We start developing for a competitive firm a model that describes the time evolution of oil reserves available for extraction. The royalty rate was explicitly included in the profit expression, and the model has the same logistic function formalism that describes the time behavior of renewable natural resources. The results show that the oil extraction rate is reduced when the firm profit variation in time is close to the firm relevant interest rate. This occurs because the firms tend to increase the extraction rate of natural resources to accommodate profit variations caused by the market. The introduction of a variable royalty rate provides a means that can compensate for these variations and keep the firm profitability close to its relevant interest rate. The results showed that is possible, within limits, to preserve oil reserves and provide the state with financial resources to carry out social policies.

Keywords: Nonrenewable resources / Oil / Royalty / Sustainability.

1. INTRODUCCIÓN

O esgotamento das reservas é unha condición que debe evitarse no proceso de explotación dos recursos naturais. Desde o punto de vista da sostibilidade, deséxase manter unha reserva de recursos naturais para as xeracións futuras e evitar externalidades que degraden o medio ambiente. A explotación petroleira debe realizarse co fin de promover unha taxa de extracción que satisfaga as necesida-

des da sociedade actual e que manteña reservas dispoñibles para as xeracións futuras.

O Estado exerce o control sobre os recursos naturais (RN) existentes na superficie e no subsolo do país e ten o poder de regular a súa explotación de acordo cos intereses da sociedade e establecer unha compensación para a explotación económica dos RN da súa propiedade. Aplícanse unha serie de taxas sobre a súa explotación en forma de impostos e *royalties*. O *royalty* é a fracción do beneficio económico que o empresario lle paga ao Estado polo dereito a explotar os recursos naturais (Cawood, 2010; Carvalho, 2008; Power e Jewkes, 1991). O *royalty*, normalmente regulado polo Estado, pódese variar co tempo para permitir políticas de xestión dos recursos naturais ou outros obxectivos sociais (Carvalho, 2008; Postali, 2009).

No Brasil, a práctica de cobramento de *royalties* iniciouse de forma sistemática a partir da introdución das axencias reguladoras e da apertura da explotación de RN importantes ao sector privado. Cando a explotación era realizada predominantemente por empresas estatais, o Estado non establecía *royalties*. Actualmente, no Brasil o *royalty* sobre o petróleo fíxase a partir dun prezo de referencia deste e o valor da cota varía entre un 5% e un 10% (ANP, 2012).

A axencia reguladora avalía a explotación dos recursos naturais a partir dunha perspectiva que vai máis alá da explotación económica; considera tamén o interese nacional en manter reservas para as xeracións futuras, a preservación do medio ambiente e a xeración de recursos para levar a cabo políticas sociais. Hai varios aspectos que deben ser considerados para configurar unha política de *royalties*, que se fan máis complexos a medida que deben ter en conta as expectativas da sociedade sobre a importancia dos ingresos, as alternativas sobre que facer con estes ingresos, cuestións do mercado dos RN e o interese económico e comercial dos empresarios que participan no negocio de extracción dos recursos naturais.

Estudos recentes sobre a tributación dos RN mostran que se busca alcanzar obxectivos tales como garantir uns ingresos adecuados para a sociedade asegurando unha rendibilidade adecuada aos empresarios, estimular o aumento da taxa de extracción dos RN para garantir a atención adecuada da demanda e distribuír os ingresos de forma transparente e xusta pola sociedade (Cawood, 2010; Aydin, 2012; Strand, 2010; Postali, 2009). Ademais dos mencionados obxectivos, o *royalty* pode ser utilizado como un instrumento para evitar a excesiva extracción de recursos naturais e para tratar de manter as reservas destes para as xeracións futuras. Variacións do *royalty* para compensar os cambios na rendibilidade dos empresarios aplicáronse en Sudáfrica co obxecto de garantir os investimentos na industria mineira e aumentar a taxa de extracción dos RN (Cawood, 2010).

A motivación desta investigación é a situación do Brasil en relación co petróleo nun futuro próximo. Actualmente, o país loita para atender a demanda interna con petróleo nacional, mentres se espera que cos grandes investimentos realizados

nos xacementos “presal” se poida atender a demanda interna e exportar o excedente. A medida que a demanda interna sexa atendida, en principio hai espazo para iniciar un proceso de conservación de reservas para as xeracións futuras. Este traballo estuda esta cuestión e trata de verificar a posibilidade de utilizar o *royalty* para reducir o consumo de petróleo. Dúas preguntas buscan resposta: cal é a condición na que se preservan os recursos naturais e se é posible utilizar o *royalty* para alcanzar este obxectivo.

O artigo, logo desta introdución, presenta a metodoloxía de análise na sección 2 e o modelo desenvolvido para simular a extracción e desenvolvemento de novas reservas de petróleo desde o punto de vista da empresa ou do empresario na sección 3. Os resultados e as análises ocupan, respectivamente, as seccións 4 e 5, e finalmente na sección 6 preséntanse as conclusións.

2. METODOLOXÍA DE ANÁLISE E BASE TEÓRICA

A premisa básica deste traballo é que o *royalty* pode ser utilizado como unha ferramenta para inducir o empresario a conservar as súas reservas de RN. En liñas xerais, o empresario busca maximizar o beneficio económico ao longo do tempo que vén dado pola diferenza entre o prezo de venda e os custos totais da extracción, desenvolvemento de pozos e descubrimento de novas reservas, taxas, impostos e *royalties*. En xeral, formula as súas estratexias considerando a dispoñibilidade de RN na natureza como infinita. Non considera que exista risco de esgotamento dos RN, senón só unha degradación dos recursos que dificultan a súa extracción e, en consecuencia, o aumento dos custos. A preocupación do empresario en relación co seu negocio é o mantemento da súa rendibilidade (Pindyck, 1981; Pearce e Turner, 1990; Mueller, 1994).

O comportamento do empresario varía considerablemente e pode ser considerado como un maximizador do beneficio económico no curto ou no longo prazo dependendo das condicións do mercado (Hotelling, 1931; Pindyck, 1981; Pearce e Turner, 1990; Mueller, 1994). O empresario toma as súas decisións comparando a rendibilidade da empresa co seu custo de oportunidade, que vén dado pola súa taxa de xuro relevante. Pode conservar as súas reservas se a expectativa do beneficio económico no futuro é maior que a súa taxa de xuro relevante (Hotelling, 1931), pero polo xeral busca aumentar a taxa de extracción para aproveitar o bo momento do mercado e inviste no desenvolvemento de novas reservas (Mueller, 1994; Pindyck, 1981). En caso de baixa rendibilidade, tende a aumentar a taxa de extracción dos RN para compensar as perdas (Hotelling, 1931; Pearce e Turner, 1990). En caso de incerteza en relación coa seguridade da propiedade das súas reservas, da posibilidade de que lle confisquen os investimentos realizados ou con que se produzan modificacións no réxime de impostos que poidan diminuír a súa rendibilidade, o seu comportamento pode ser o de aumentar ou diminuír a taxa de extracción de recursos naturais (Strand, 2010).

A axencia reguladora, que posúe a facultade de variar o *royalty*, pode influír nas expectativas do empresario en relación co seu beneficio económico no tempo. Se o beneficio económico aumenta ou diminúe, a cota variable do *royalty* pode modificarse na dirección contraria co obxecto de compensar esta variación e inducir o empresario a preservar recursos naturais ao longo do tempo.

Para estudar este problema para o petróleo é necesario construír un modelo que contemple explicitamente o *royalty* no beneficio económico do empresario, a taxa de desenvolvemento de novas reservas de petróleo e a taxa de xuro relevante para o empresario. Na seguinte sección desenvólvese este modelo comezando, en primeiro lugar, coa inclusión do *royalty* como unha variable externa explicitamente na ecuación do beneficio económico do empresario no seu negocio de explotación dos RN. A continuación, deséñase un modelo para o comportamento do empresario na xestión do seu negocio de explotación, desenvolvemento, extracción e venda de petróleo. Seguidamente, trátase de maximizar o beneficio económico do empresario utilizando o modelo desenvolvido e de determinar en que condicións conservará o empresario os seus recursos naturais. Finalmente, compróbase a capacidade do *royalty* para darlles cabida ás variacións da rendibilidade ao longo do tempo.

2.1. INCLUSIÓN DO ROYALTY NA ECUACIÓN DE BENEFICIO ECONÓMICO DO EMPRESARIO

A explotación de recursos naturais non renovables como o petróleo é xeralmente un problema de longo prazo, que debe ter en conta o tempo e o empresario debe tomar decisións intertemporais, pois hai a opción de explotar os recursos hoxe ou gardalos para o futuro (Hotelling, 1931; Pindyck, 1981; Pearce e Turner, 1990; Mueller, 1994). Os empresarios buscan maximizar o beneficio económico durante todo o tempo de existencia dos RN que debe ser superior á remuneración do capital investido e aos custos de explotación.

Se o empresario é unha empresa privada, inviste para adquirir RN, para facer posible a explotación ou para manter o seu nivel de reservas. En termos económicos dispón de varias alternativas de investimento, elixindo aquela que considera mellor e cuxa rendibilidade se denomina aquí taxa de xuro relevante para o empresario. Se a rendibilidade do seu investimento na explotación de RN é menor que esa taxa de xuro relevante, buscará desfacerse da empresa, vendéndoa ou explotándoa o máis rápido posible para buscar outro negocio. Para os empresarios, os RN compórtanse como un tipo específico de capital que non proporciona dividendos, isto é, que non ofrece remuneración ao seu titular, pero que pode revalorizarse co tempo (Hotelling, 1931). Polo tanto, os empresarios individualmente tamén teñen como obxectivo que a rendibilidade da súa empresa sexa igual ou maior que a súa taxa de xuro relevante.

Se o empresario é unha empresa estatal, as súas accións son ditadas por outros intereses como o mantemento da oferta na actualidade ou no futuro, o mantemento de prezos baixos ou, mesmo, o mantemento das reservas no tempo.

Neste traballo consideramos que os empresarios son privados e que os intereses estatais, como, por exemplo, evitar a rápida explotación das reservas, son realizados mediante as accións dunha axencia reguladora que actúa no mercado dos RN alterando os *royalties*.

Os recursos naturais deben ser extraídos ao longo dos anos e o empresario desexa maximizar o seu beneficio económico no tempo. O beneficio económico no tempo t vén dado por:

$$\pi(t) = (1 - f(t)) (p(t) - c(t)) H(t) \quad (1)$$

onde $p(t)$ é o prezo unitario de venda do RN; $c(t)$ é o custo unitario total de extracción do RN, incluíndo custos de prospección, de desenvolvemento de pozos, e impostos e taxas; $H(t)$ é a taxa de extracción do RN no tempo t ; e $f(t)$ é a cota variable do *royalty* que pode variar no tempo, de acordo coa política levada a cabo pola axencia reguladora. Aquí, o compoñente fixo do *royalty* está incorporado ao custo unitario de extracción dentro da clase taxas. A cota variable $f(t)$ define só a parte variable do *royalty*.

Imos supoñer que o empresario é un optimizador e que desexa maximizar o beneficio económico durante todo o tempo de existencia das reservas de RN e non só nun determinado ano ou tempo t . Isto pode facerse avaliando todos os beneficios económicos futuros, $\pi(t)$, traéndoo ao presente e maximizando o seu valor na actualidade (Hotelling, 1931; Pindyck, 1981; Pearce e Turner, 1990; Mueller, 1994). Se s é a taxa de xuro relevante para o empresario, o valor actual do beneficio económico en todos os tempos, $VP(\pi)$, vén dado por:

$$VP(\pi) = \int_0^{\infty} \pi(t) e^{-st} dt \quad (2)$$

Para maximizar a ecuación (2) é necesario coñecer ao longo do tempo a taxa de extracción das reservas, o custo de extracción e o prezo dos RN no mercado. Estas informacións non se coñecen, pero os empresarios fan estimacións destas magnitudes e dos seus comportamentos temporais e toman decisións a partir desas estimacións. Para realizar a nosa análise, necesitamos un modelo que proporcione estas magnitudes. O custo de extracción e a taxa de extracción dependen do nivel de reservas dispoñibles para a extracción e da taxa de desenvolvemento de novas reservas. O modelo debe establecer estas relacións e representar o comportamento do empresario fronte aos cambios no seu beneficio económico (Mueller, 1994; Livernois, 2009).

2.2. COMPORTAMENTO TEMPORAL DAS RESERVAS DE RECURSOS NATURAIS DESDE O PUNTO DE VISTA DO EMPRESARIO

O comportamento temporal da cantidade de reservas de RN desde o punto de vista do empresario vén dado por (Pearce e Turner, 1990):

$$\frac{dX(t)}{dt} = F(t) - H(t) \quad (3)$$

onde $X(t)$ é a cantidade de reservas en condicións de ser extraídas no tempo t polo empresario; $F(t)$ é a taxa de desenvolvemento de novas reservas de RN por parte do empresario; e $H(t)$ é a taxa de extracción dos RN que realiza o empresario.

Para poder extraer e vender o RN petróleo, o empresario debe contar con pozos equipados e operativos e con infraestrutura para a preparación final dos produtos que vai comercializar e distribuír. As reservas $X(t)$ na ecuación (3) só representan a cantidade de RN de que dispón o empresario nestas condicións no tempo t . Ao longo do texto, cando se mencione a palabra “reservas”, deben interpretarse só como aquelas nestas condicións.

A taxa de desenvolvemento de novas reservas de RN non renovables depende xeralmente de factores como, entre outros, unha xeoloxía favorable, a tecnoloxía dispoñible, o volume dos investimentos en prospección, un custo atractivo para a explotación ou as presións sociais. Os investidores exploran novos xacementos en función do aumento do seu custo e da dificultade tecnolóxica. Os depósitos de RN transfórmanse en reservas e, polo tanto, factibles de ser extraídos cando o custo da extracción faga viable a comercialización. O desenvolvemento da tecnoloxía ten como obxectivo facer operativos os xacementos inicialmente inviables para ser explotados comercialmente, e tamén reduce os custos máis altos destes novos xacementos (Livernois, 2009). Desde o punto de vista do empresario, a taxa de desenvolvemento de novas reservas de recursos naturais, F , pode ser considerada como dependente, entre outros factores, da cantidade de RN dispoñibles, da taxa de execución de novos pozos, da demanda, do prezo do recurso natural, da tecnoloxía, da taxa de extracción ou da taxa de xuro.

O outro termo do lado dereito da ecuación (3) é a taxa de extracción de recursos naturais, que pode adoptar calquera forma dependendo do interese do empresario. A taxa de extracción pode ser ascendente ou descendente no tempo e está influenciada polo nivel de reservas $X(t)$ en condicións de ser extraídas (Pearce e Turner, 1990; Mueller, 1994). Non obstante, a situación que busca o empresario na explotación económica dos RN é aquela na que a taxa de extracción do recurso natural é igual (ou está próxima) á taxa de desenvolvemento de novas reservas de RN, co fin de manter o nivel das reservas de RN máis ou menos constante e nun nivel adecuado para a extracción. Desta maneira, o empresario ten unha visión temporal sobre o seu negocio e pode estimar a duración das súas reservas no tempo.

A situación de réxime permanente conséguese igualando a derivada temporal de X na ecuación (3) a cero. Neste caso, a taxa de descubrimento de novas reservas de recursos naturais, F , é igual á taxa de extracción de recursos naturais, H , é dicir, $H = F$. Esta condición mostra que é posible conseguir un réxime permanente en distintas situacións, pois depende basicamente da taxa de desenvolvemento de novas reservas, F .

A solución da ecuación (3) para unha taxa de extracción coñecendo $H(t)$ require que se coñeza o comportamento da función F que proporciona a taxa de desenvolvemento de novas reservas por parte do empresario. O modelo desenvolvido neste traballo para F e a maximización do beneficio económico preséntanse na seguinte sección.

3. MODELADO DAS RESERVAS DESDE O PUNTO DE VISTA DO EMPRESARIO E MAXIMIZACIÓN DO BENEFICIO ECONÓMICO

3.1. TAXA DE DESENVOLVEMENTO DE NOVAS RESERVAS

A taxa de desenvolvemento de novas reservas, F , ao longo do tempo e desde o punto de vista do empresario, depende de varios factores. Fronte á dificultade de modelar F , algúns autores reducen o universo de variables e buscan representar o efecto destes factores a través dunha dependencia relacionada co esforzo económico da extracción e co nivel de reservas (Pearce e Turner, 1990; Mueller, 1994; Pindyck, 1981).

A posibilidade de extraer petróleo provén principalmente de dúas actividades relacionadas co esforzo económico do empresario: a) a mellora da eficiencia dos pozos existentes actuando sobre procesos, equipos, estrutura da organización e loxística comprometida de forma que permita un aumento da extracción e venda de petróleo; e b) a prospección de novos lugares para realizar novas reservas. O ítem "a" permite un aumento limitado na extracción, afecta ás actividades operacionais e permítelle ao empresario darlles cabida ás variacións da demanda dentro do número de pozos existentes. O ítem "b" posibilita ao operador aumentar o seu número de pozos de extracción. En xeral, os novos pozos desenvolvidos non presentan condicións óptimas de extracción, que se conseguen ao longo do tempo mediante actividades do ítem "a" (Mueller, 1994). Así, a taxa de desenvolvemento de novas reservas realízase aumentando tanto a capacidade dos pozos existentes coma o número de pozos.

A decisión do empresario de aumentar ou diminuír a súa taxa de desenvolvemento de novas reservas depende de varios factores, pero sobre todo de se ten capacidade para atender unha expectativa de demanda presente ou futura. E esta está fortemente relacionada co nivel de reservas en condicións de ser extraídas, X , de que dispón o empresario.

En principio, considérase que existe unha demanda do recurso natural petróleo. Se os niveis de reservas son baixos e insuficientes para satisfacer a demanda, o empresario inviste no desenvolvemento de novas reservas e F tende a aumentar; pola contra, se os niveis de reservas son altos e suficientes para satisfacer a demanda, o empresario non ten ningún incentivo para aumentalas e a taxa de desenvolvemento de novas reservas tende a diminuír. Polo tanto, hai un nivel de reservas no que F alcanza un máximo. Non obstante, se o empresario non consegue acomodar o aumento na taxa de extracción de petróleo co número actual de pozos,

deberá investir realizando un esforzo económico co obxecto de buscar novas reservas en condicións de extracción.

Factores como, entre outros, a demanda ou o custo acaban repercutindo sobre o nivel das reservas, e por iso esta é unha variable importante para que o empresario tome decisións. Do anteriormente exposto, obtense que $dF / dX > 0$ para niveis baixos de reservas, $dF / dX < 0$ para niveis elevados de reservas, e que nalgún valor de X ten lugar un máximo, isto é, $dF / dX = 0$. Unha forma sinxela de representar este comportamento en relación con X é mediante un polinomio:

$$F(X, a_1, a_2 \dots) = a_1X - a_2X^2 + \dots \quad (4)$$

onde coeficientes positivos como a_1 representan factores que favorecen o aumento da taxa de desenvolvemento de novas reservas e coeficientes negativos como a_2 son factores que iniben a taxa de desenvolvemento de novas reservas.

O modelo máis sinxelo consiste en considerar só os dous primeiros termos do modelo polinómico. Os coeficientes a_1 e a_2 chámanse coeficientes de retroalimentación ou realimentación do problema, pois a cantidade X de recurso “realimenta” a evolución de X , e neste caso de forma positiva e negativa, respectivamente.

A representación máis coñecida da ecuación (4) obtense factorizando a_1X :

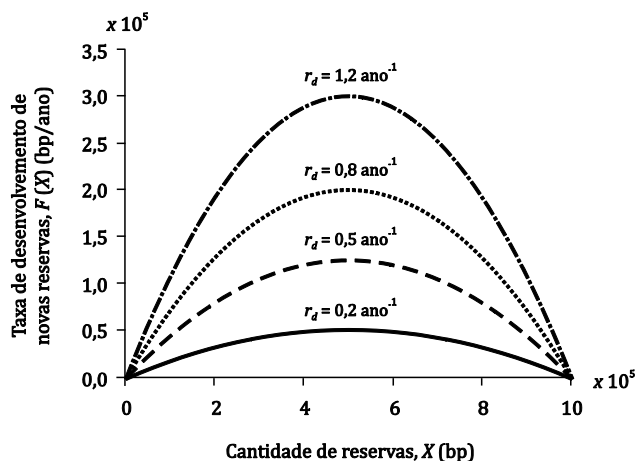
$$F(X, r_d, X_s) = r_dX \left(1 - \frac{X}{X_s}\right) \quad (5)$$

onde $r_d = a_1$ é o coeficiente de desenvolvemento de novas reservas e $X_s = a_1/a_2$ é a cantidade máxima de reservas que o empresario pode acumular de forma que aínda lle resulte atractivo desde o punto de vista económico.

A ecuación (5) está relacionada coa función loxística que se utiliza para describir a evolución temporal dos recursos renovables. Os parámetros r_d e X_s son similares ao coeficiente de reprodución natural de recursos renovables e á capacidade de soporte do medio, respectivamente (Pierce e Turner, 1990). Porén, a interpretación dos parámetros é diferente: r_d reflicte o esforzo do empresario por aumentar o nivel de reservas en condicións de ser extraídas, e X_s reflicte o máximo de reservas en condicións de extracción que o empresario pode manter de forma viable. Por riba deste nivel de reservas existen factores que limitan ou impiden o seu aumento. Os factores que os limitan son sen dúbida económicos, pero tamén se poden incluír restricións ambientais e sociais. Un punto fundamental no negocio de explotación dos RN non renovables é que o empresario pode modificar os parámetros r_d e X_s mediante investimentos ou esforzo económico (Strand, 2012; Aydin, 2012; Cawood, 2010; Mueller, 1994; Pindyck, 1981).

$F(X, r_d, X_s)$ presenta un valor máximo $F_{max}(r_d, X_s)$ para valores fixos de r_d e X_s . Como exemplo, a gráfica 1 mostra o comportamento de $F(X, r_d, X_s)$ para distintos valores de r_d e $X_s = 10^6$ bp (barrís de petróleo). A taxa de desenvolvemento de novas reservas increméntase a medida que o nivel de reservas X aumenta e eventualmente alcanza un máximo. Despois deste máximo, a taxa de desenvolvemento vai reducíndose gradualmente ata chegar a un valor nulo. O valor máximo $F_{max}(r_d, X_s)$ ten lugar en $X = X_s/2$, e depende fortemente de r_d . Para unha determinada condición da empresa, a máxima taxa de extracción de RN vén dada por $F_{max}(r_d, X_s)$.

Gráfica 1.- Taxa de desenvolvemento de novas reservas de petróleo en función da cantidade de reservas



NOTA: bp significa barrís de petróleo. $X_s = 10^6$ bp.

FONTE: Elaboración propia.

Supoñamos que o empresario está traballando con $r_d = 0,2$ ano⁻¹. Se necesitase aumentar a taxa de extracción de petróleo por riba do valor máximo de F , no caso $0,5 \times 10^5$ bp/ano, neste modelo o empresario investiría no desenvolvemento de novas reservas e traballaría cun r_d superior, por exemplo, $r_d = 0,5$ ano⁻¹.

Neste traballo imos supoñer que o empresario extrae petróleo dentro das condicións sinaladas para r_d e X_s , isto é, eses parámetros son considerados fixos para poder realizar as análises e describen as condicións de explotación dos RN por parte da empresa.

3.2. CUSTOS DE EXTRACCIÓN E DESENVOLVEMENTO DE NOVAS RESERVAS

Neste modelo suponse que o empresario está sometido a un réxime competitivo e que non ten control sobre o prezo de venda do petróleo. Así, o prezo de venda é unha función esóxena.

Os custos implicados no proceso de extracción do petróleo inclúen a prospección, o desenvolvemento de pozos e a actividade operativa de extracción. En termos xerais, pode considerarse que unha parte do custo unitario, c , é fixa, e está composta basicamente por custos de prospección, desenvolvemento, investimentos, execución, impostos e taxas fixas. Outra parte pode considerarse variable en función da cantidade de reservas ($dc / dX < 0$), é dicir, canto maior é o valor das reservas dispoñibles, máis fácil se fai a extracción do RN (Pindyck, 1981; Pearce e Turner, 1990; Mueller, 1994; Livernois, 2009). Este compoñente está xeralmente ligado á actividade operativa do petróleo. Supoñendo un comportamento lineal entre o custo unitario e a cantidade dispoñible de RN, obtense:

$$c(X) = c_0 - c_1 X \quad (6)$$

onde c_0 e c_1 son os compoñentes fixos e variables do custo total unitario de extracción dos RN. Estes compoñentes considéranse constantes no tempo e a variación temporal do custo unitario xorde da variación da cantidade de reservas, X , que depende do tempo.

3.3. MAXIMIZACIÓN DO BENEFICIO ECONÓMICO DO EMPRESARIO

Maximizar a ecuación (2) significa atopar aquel percorrido temporal da extracción que proporcione o maior valor para VP (π), pois existen diferentes camiños para obter o beneficio económico $\pi(t)$ ao longo do tempo. Para atopar cal deses traxectos conduce á maximización de VP (π) utilízase o cálculo variacional (Hotelling, 1931; Mueller, 1994; Pearce e Turner, 1990). Considérase que o prezo de venda do recurso natural, $p(t)$, e a cota variable do *royalty*, $f(t)$, son variables libres, que quedan fóra do control do empresario, e que xa veñen dadas. Os distintos percorridos de $\pi(t)$ dependen da taxa de extracción $H(t)$ que, por medio da ecuación (3), depende de X e f . No anexo 1 preséntanse os detalles do proceso de maximización. Facendo as operacións alxébricas alí indicadas obtense:

$$\left. \frac{dF}{dX} \right|_{x_0} = - \frac{F(X_0)}{(1-f)(p-c(X))} \left. \frac{dF}{dX} \right|_{x_0} + s(t) - \alpha_{pc}(t) + \alpha_f(t) \quad (7)$$

onde $\alpha_{pc}(t) = \frac{1}{p-c} \frac{d(p-c)}{dt}$ é a rendibilidade da explotación que depende da variación temporal da diferenza entre o prezo de venda e o custo total; $\alpha_f(t) = \frac{1}{1-f} \frac{df}{dt}$ é a taxa de variación porcentual da cota variable do *royalty*.

Como a taxa de xuro relevante para o empresario, $s(t)$, ten como unidade o ano⁻¹, cada parte da ecuación (7) ten tamén a mesma unidade e representa taxas porcentuais da variación temporal de distintas magnitudes. X_0 é o valor da cantidade de reservas que maximiza VP (π).

A ecuación (7) ten en conta a taxa de variación do achado (primeiro termo), os custos totais e o prezo de venda (segundo termo), a taxa de xuro relevante para o empresario (terceiro termo), a expectativa da variación do custo e do prezo de venda dos RN ao longo do tempo (cuarto termo) e a variación do *royalty* no tempo (quinto termo). Polo tanto, é unha relación que proporciona o nivel de reservas que o empresario debe lograr para maximizar $VP(\pi)$, tendo en conta consideracións técnicas e económicas do seu negocio, definidas por $F(X, r_d, X_s)$, custos, prezo de venda, taxa de xuro relevante e *royalty* variable. O recurso natural, considerado como un investimento, pasa a ter como puntos de referencia a taxa de xuro relevante para o empresario e a taxa de variación do *royalty*.

O proceso de maximización pode realizalo o empresario en calquera momento do tempo t . Calculando as derivadas na ecuación (7) e tomando un valor para $p(t)$ e $f(t)$ nun determinado momento do tempo t obtense:

$$r_d f(X_0) = s(t) - \alpha_{pc}(t) + \alpha_f(t) \quad (8)$$

onde

$$f(X_0) = 1 - 2 \frac{X_0}{X_s} + \frac{\left(1 - \frac{X_0}{X_s}\right) X_0 c_1}{(1-f)(p - c_0 + c_1 X_0)} \quad (9)$$

As ecuacións (8) e (9) mostran que cando o empresario realice o seu estudo de maximización do beneficio económico, $\pi(t)$, sempre obterá un nivel de reservas X_0 e, polo tanto, a taxa de extracción $H = F(X_0)$ que maximiza $VP(\pi)$. Cando, co obxecto de satisfacer a demanda, a taxa de extracción se aproxima a $F_{max}(r_d, X_s)$, debe aumentar a taxa de desenvolvemento de novas reservas modificando r_d ou X_s . Non obstante, a axencia reguladora pode variar o valor de $\alpha_f(t)$ para inducir o empresario a non aumentar a súa taxa de extracción.

Os parámetros de referencia que describen o modelo nun determinado momento do tempo t preséntanse na táboa 1. Estes valores tomáronse só para mostrar o comportamento do modelo e a influencia das distintas variables, e representan un hipotético empresario.

4. RESULTADOS

Os primeiros resultados que se presentan están relacionados co modelo que se desenvolveu para facer a análise. A continuación, móstrase o comportamento do empresario maximizador en relación co beneficio económico ao responder as variacións de rendibilidade do negocio de extracción de petróleo e, finalmente, a variación da cota variable do *royalty* necesaria para lles facer fronte ás variacións do prezo do petróleo e para evitar o consumo de recursos naturais.

Táboa 1.- Datos que describen o modelo de evolución das reservas de petróleo nun momento dado por un hipotético empresario

Parámetros	Valores
Taxa de achado de reservas de RN sen impedimentos, r_d	1,2 ano ⁻¹
Valor máximo de reservas que o empresario pode acumular, X_s	10 ⁶ barrís de petróleo
Custo unitario fixo do RN (petróleo), c_0	\$ 45
Custo unitario variable do RN (petróleo), c_1	\$ 2,95/barrís de petróleo
Prezo unitario de venda do RN (petróleo), p	\$ 90
Valor do <i>royalty</i> , f	0,15
Taxa de xuro relevante para o empresario, s	0,07 ano ⁻¹

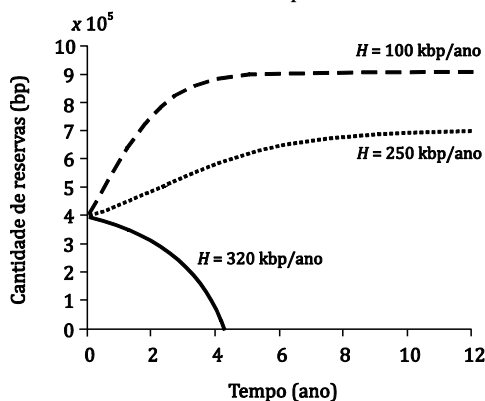
FONTE: Elaboración propia.

4.1. COMPORTAMENTO TEMPORAL DAS RESERVAS SEGUNDO O MODELO

Para mostrar o comportamento do modelo desenvolvido consideremos o caso en que o empresario realice unha taxa de extracción constante a partir dunha condición inicial de reservas de petróleo de 4×10^5 bp. A ecuación (3), que proporciona $X(t)$ considerando $F(X, r_d, X_s)$ dado pola ecuación (5), resolveuse numericamente utilizando o método de Runge-Kuta de cuarta orde (Isaacson e Keller, 1966). Os valores dos parámetros utilizados para r_d e X_s son os que se presentaron na táboa 1.

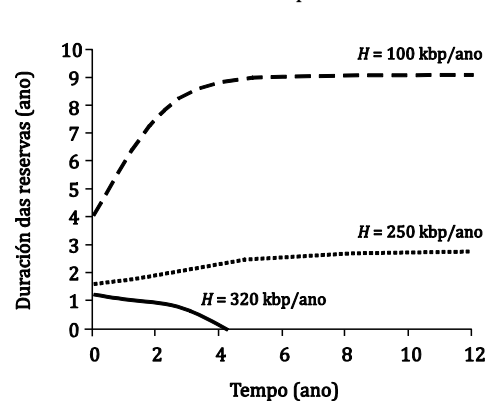
A gráfica 2 mostra a solución para tres condicións das taxas de extracción e a gráfica 3 mostra a duración das reservas obtidas a partir da relación entre a cantidade de reservas dispoñibles e a taxa de extracción de petróleo no tempo t . Cómpre destacar que para taxas de extracción de 100 mil bp/ano e de 250 mil bp/ano se alcanza unha condición de reserva constante no tempo. Unha taxa de extracción de 320 mil bp/ano ocasiona o consumo total das reservas do empresario.

Gráfica 2.- Cantidade de reservas do empresario en función do tempo para diferentes taxas de extracción de petróleo



FONTE: Elaboración propia.

Gráfica 3.- Duración das reservas do empresario en función do tempo para diferentes taxas de extracción de petróleo

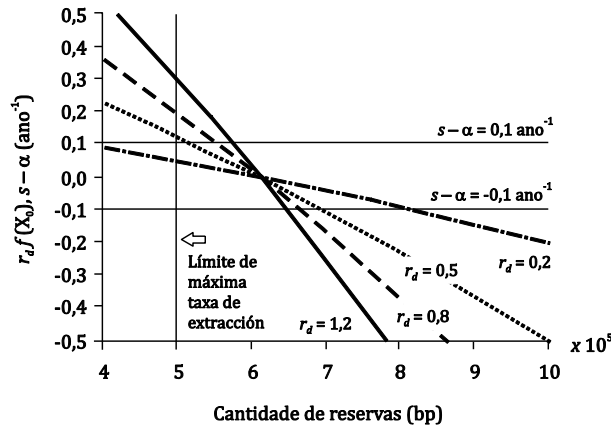


FONTE: Elaboración propia.

4.2. RESPONDA DO EMPRESARIO MAXIMIZADOR DE BENEFICIO ECONÓMICO

As ecuacións (8) e (9) mostran a situación na que o empresario debe traballar para maximizar $\pi(t)$ ao longo do tempo. Considerando os datos da táboa 1, a gráfica 4 presenta $r_d f(X_0)$ en función de X_0 para distintos valores de r_d e X_s establecidos en 10^6 bp. Nesta gráfica, $\alpha = \alpha_{pc} - \alpha_f$, ou rendibilidade neta do empresario, tamén se ten en conta a variación da cota variable do *royalty*. As liñas horizontais representan condicións de valores da diferenza $s - \alpha$. Os valores de $s - \alpha$ positivos indican unha rendibilidade neta do empresario inferior á súa taxa de xuro relevante. A intersección de $r_d f(X_0)$ e $s - \alpha$ proporciona o valor da cantidade de reservas, X_0 , que debe manterse para maximizar $VP(\pi)$. A taxa de extracción é, entón, $H = F(X_0, r_d, X_s)$, onde F vén dada pola gráfica 1.

Gráfica 4.- Condición de maximización do beneficio económico para o empresario



NOTA: $X_s = 106$ bp. Os valores de $s - \alpha$ positivos significan que a rendibilidade neta é inferior á taxa de xuro relevante para o empresario.

FONTE: Elaboración propia.

Na gráfica 4 preséntanse dúas condicións de rendibilidade para o empresario proporcionadas, por exemplo, pola variación do prezo do barril de petróleo:

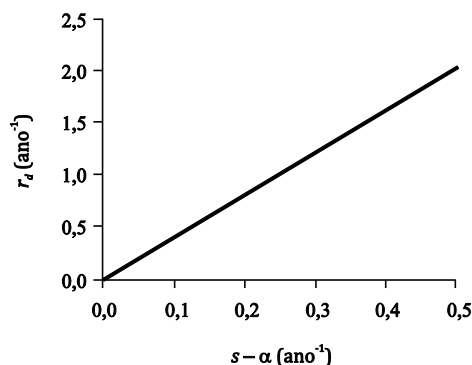
- a) $s - \alpha = 0,1 \text{ ano}^{-1}$, que representa unha redución na rendibilidade neta de $\alpha = 0,07 - 0,1 = -0,03 \text{ ano}^{-1}$ ou un -3% anual.
- b) $s - \alpha = -0,1 \text{ ano}^{-1}$, que representa un aumento na rendibilidade neta de $\alpha = 0,07 + 0,1 = 0,17 \text{ ano}^{-1}$ ou un 17% anual.

O límite máximo de extracción de reservas vén dado por $F_{max}(r_d, X_s)$, de acordo coa gráfica 1. A gráfica 4 tamén mostra o límite mínimo de redución das re-

servas que se permite para conseguir un aumento na taxa de extracción de petróleo, $X_s/2$. A intersección das distintas curvas coa liña vertical de máxima extracción proporciona as rendibilidades que é posible alcanzar en réxime permanente para as condicións operativas do negocio do empresario definidas por X_s e r_d .

Cando a taxa de extracción que maximiza o beneficio económico é igual a $F_{max}(r_d, X_s)$, o empresario debe desenvolver novos pozos de petróleo para continuar aumentándoa. Supoñendo que o empresario só teña como condicións económicas acumular reservas ata $X_s = 10^6$ bp, a gráfica 5 mostra a taxa de desenvolvemento de novos pozos de petróleo en función de $s - \alpha$.

Gráfica 5.- Necesidade de aumentar a taxa de desenvolvemento de novos pozos de petróleo en función de $s - \alpha$



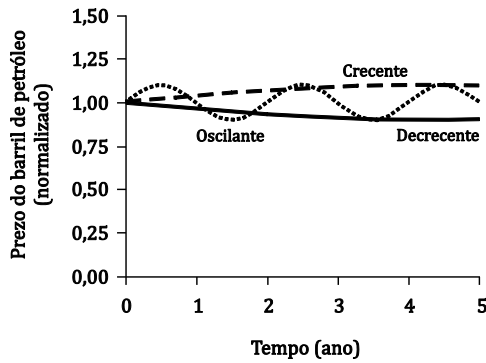
NOTA: Os valores de $s - \alpha$ positivos significan que a rendibilidade neta é inferior á taxa de xuro relevante para o empresario.

FONTE: Elaboración propia.

4.3. COMPORTAMENTO DA COTA VARIABLE DO ROYALTY

A cota variable do *royalty* pode modificarse para compensar variacións da rendibilidade do empresario e evitar que este aumente a extracción de RN. Imos considerar distintas condicións nas que a variación da rendibilidade induza o empresario a aumentar a taxa de extracción de RN. A gráfica 6 mostra tres condicións de variación no prezo do barril de petróleo. No primeiro caso preséntase un aumento do prezo do petróleo nunha taxa decrecente, o que indica que a rendibilidade diminúe; no segundo caso prodúcese unha caída continua no prezo do barril de petróleo pero nunha taxa decrecente, o que significa que a rendibilidade tamén diminúe; e no terceiro caso preséntase unha oscilación no prezo do petróleo dun 10%. O valor inicial do compoñente variable do *royalty* é dun 30%.

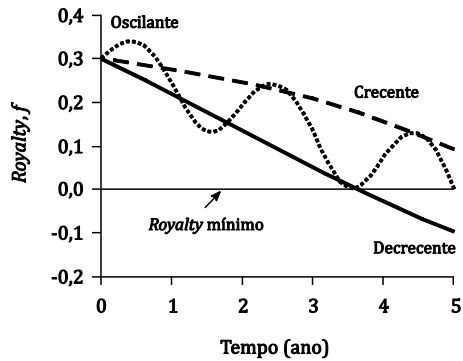
Gráfica 6.- Prezo do barril de petróleo considerado na simulación



FONTE: Elaboración propia.

A gráfica 7 recolle a variación do *royalty* para garantirlle ao empresario unha rendibilidade neta igual á súa taxa de beneficio relevante, neste caso tomado como un 7% anual.

Gráfica 7.- Cota variable do *royalty* en función do tempo que se mantén o beneficio económico do empresario igual á súa taxa de xuro relevante (7% anual)



FONTE: Elaboración propia.

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesta sección analízanse os resultados obtidos. Inicialmente, discútese o modelo desenvolvido para tratar o comportamento das reservas de petróleo desde o punto de vista do empresario de maneira similar ao tratamento tradicional que se lles dá aos recursos naturais renovables. Nas dúas últimas subseccións, discútese

as dúas cuestións formuladas na introdución: a condición en que os recursos naturais non renovables poden ser preservados polo emprendedor, e se é posible utilizar unha cota variable de *royalty* para lograr este obxectivo.

5.1. COMPORTAMENTO TEMPORAL DAS RESERVAS DE ACORDO CO MODELO

Os parámetros considerados para a taxa de desenvolvemento de novas reservas nas simulacións do epígrafe 4.1 son $r_d = 1,2 \text{ ano}^{-1}$ e $X_s = 10^6 \text{ bp}$. Para estes valores, a maior taxa de extracción que permite un estado de réxime estable, de acordo coa gráfica 1, é $H = F_{max}(r_d, X_s) = 300 \text{ kbp/ano}$. Nos dous casos nos que H é inferior a $F_{max}(r_d, X_s)$ alcanzouse unha situación de réxime estable, mentres que no caso en que $H = 320 \text{ kbp/ano}$, superior a $F_{max}(r_d, X_s)$, non se puido conseguir o estado de réxime estable de extracción. As reservas consumíronse en pouco máis de catro anos. As gráficas 2 e 3 mostran que o límite de extracción en condicións de réxime estable é $F_{max}(r_d, X_s)$ e que o nivel de reservas en que este ten lugar é $X = X_s/2$. Este comportamento coincide co descrito na literatura (Pierce e Turner, 1990; Mueller, 1994; Pindyck, 1981).

O parámetro r_d é o responsable da rapidez coa que o empresario é capaz de responder aos cambios nas variacións das taxas de extracción. Pode considerarse que $1/r_d$ é unha constante temporal característica deste sistema de extracción de recursos naturais. Este valor da taxa de desenvolvemento de novas reservas indica que se requiren entre cinco e sete anos para que a cantidade de reservas alcance o valor constante final. Se r_d fose menor, sería necesario un período de tempo maior. Unha estimación da duración das reservas en calquera momento do tempo pode realizarse como mostra a gráfica 3. O modelo permítelle ao empresario avaliar o comportamento das súas reservas ao longo do tempo tendo en conta os parámetros que caracterizan as súas condicións operativas, r_d e X_s .

5.2. COMPORTAMENTO PARA DIFERENTES CONDICIÓNS DE EXTRACCIÓN DE RN

Para maximizar $VP(\pi)$, dado pola ecuación (2), o empresario debe extraer recursos naturais de acordo coas ecuacións (8) e (9). Os comportamentos de $s - \alpha$ e de $r_d f(X)$ móstranse na gráfica 4. Vexamos como afectan ao resultado os distintos parámetros. En principio, se non existiran preocupacións relacionadas cos custos implicados, taxas de xuro e expectativas relacionadas co comportamento futuro do prezo do petróleo, a condición de maior beneficio económico sería aquela na que a taxa de extracción se iguala á máxima taxa de desenvolvemento de reservas, isto é, $F_{max}(r_d, X_s)$. O nivel de reservas correspondente sería $X_0 = X_s/2$.

Non obstante, estes parámetros modifican esta condición: o custo diminúe coa cantidade de reservas, X , de acordo coa ecuación (6), e o empresario sempre compara a súa rendibilidade neta actual e futura coa taxa de xuro relevante. Supoñendo que $c(X)$ non dependa da cantidade X , isto é, $dc/dX = 0$, obtense me-

diante a ecuación (6) que $c_1 = 0$. Substituíndo este valor de c_1 na ecuación (11) obtense:

$$r_d \left(1 - 2 \frac{X_0}{X_s}\right) = s - \alpha \quad (10)$$

onde α é a taxa de beneficio unitario neto do empresario. Se $s = \alpha$, o lado dereito da ecuación (10) anulase e o máximo beneficio económico ten lugar cando $X_0 = X_s/2$, resultado similar ao anterior.

A condición de maximización de VP (π) obtense mantendo un nivel de reservas igual á metade da cantidade de reservas á que o empresario pode facer fronte economicamente. Este comportamento obsérvase na análise dos recursos renovables que lle dan o mesmo tratamento de función loxística a F (Pierce e Turner, 1990).

Considerar que $\alpha = s$ significa que a taxa neta de beneficio do empresario é igual á súa taxa de xuro relevante. Para el, este valor é a menor rendibilidade admisible para continuar investindo no negocio de extracción de RN. Este resultado denomínase regra de Hotelling en homenaxe ao economista que estableceu este concepto de explotación dos RN (Hotelling, 1931). Nestes casos, a evolución dos prezos dos RN, considerando custos constantes no tempo, varía exponencialmente de acordo coa taxa de xuro relevante, s . Este resultado clásico é previsto polo modelo desenvolvido neste traballo, pero cómpre sinalar que non é fácil de observar no mercado dos recursos naturais non renovables (Livernois, 2009; Mueller, 1994).

Consideremos agora a situación na que diminúen os custos en función da cantidade de reservas. Supoñendo que c_1 é distinto de cero, a situación é diferente e deben considerarse as ecuacións (8) e (9). Tendo en conta novamente o caso en que $s = \alpha$, o punto onde $r_d F(X_0) = 0$ proporciona a cantidade X_0 de reservas que maximiza o beneficio económico. Na gráfica 4 ese punto está á dereita de $X_s/2$. Nótese que, como c_1 é negativo, unha maior cantidade dispoñible de reservas favorece o beneficio económico, pois abarata a extracción. A cantidade óptima de extracción ten lugar para un nivel de reservas maior que $X_s/2$.

5.3. CONDICIÓEN EN QUE SE PRESERVAN OS RECURSOS NATURAIS

A gráfica 4 tamén mostra dúas situacións diferentes de rendibilidade para o empresario. Para a situación (a), cando a taxa de xuro relevante é maior que a rendibilidade neta, o nivel de reservas que maximiza VP (π) desprázase cara á esquerda para menores valores de reservas, co obxecto de aumentar a taxa de extracción. Para a situación inversa (b), cando a taxa de xuro relevante é menor que a rendibilidade neta, o nivel de reservas que maximiza VP (π) desprázase cara á dereita para maiores valores e menores taxas de extracción de reservas.

Os comportamentos que acabamos de mencionar son similares aos relacionados coa explotación óptima de RN renovables, mostrándose no anexo 2 este paralelismo (Pearce e Turner, 1990). Adicionalmente, o empresario sempre conta cunha alternativa básica do seu negocio para o caso de que se dispare o rendemento neto: investir máis no desenvolvemento de novas reservas, aumentar a taxa r_d da súa empresa e facer viables taxas de extracción de petróleo maiores e máis baratas.

No caso de que se reduza a rendibilidade, na gráfica 4 pode verse que o nivel de reservas que maximiza o beneficio económico é menor, o que indica que hai un maior consumo de petróleo. A taxa de extracción de petróleo pode aumentarse ata alcanzar o valor máximo, $F_{max}(r_d, X_s)$, que ten lugar en $X_0 = X_s/2$.

No caso de que aumentara a rendibilidade, vese que o nivel de reservas debe ser maior, o que indica un menor consumo de reservas. Se α fose maior que s , o empresario, en principio, gardaría o RN para poder extraelo no futuro cando o prezo fose máis alto.

Non obstante, polo xeral o empresario cre que sempre se poden atopar novos xacementos a un custo maior e transformalos en reservas en condicións de extracción. Este feito fai difícil que o empresario reduza a extracción de RN. O empresario podería pensar doutra maneira se a rendibilidade fose moito maior que a súa taxa de xuro relevante: aproveitando que os prezos actuais son elevados, é posible obter un maior beneficio económico e investir máis no desenvolvemento de novas reservas de RN, porque é un negocio rendible. Este razoamento, en principio, non é maximizador de $VP(\pi)$; porén, se temos en conta que a nova situación da rendibilidade aumenta a súa taxa de xuro relevante, desde o seu punto de vista a nova condición é que $\alpha < s$. E nesta condición o empresario debe aumentar a súa taxa de extracción a través do desenvolvemento de novos pozos de petróleo.

Cando a taxa de extracción que maximiza o rendemento económico se iguala con $F_{max}(r_d, X_s)$, o empresario vese obrigado a aumentar a súa taxa de desenvolvemento de novos pozos de petróleo. O resultado da gráfica 5 mostra que, a medida que a rendibilidade diminúe ($s - \alpha$ aumenta), é necesario incrementar a taxa de desenvolvemento de novas reservas, r_d , e, en consecuencia, tamén o consumo de recursos naturais. Cómpre sinalar que ao traballar cun nivel de reservas menor, os custos de extracción aumentan. Así, o empresario tende a desenvolver novas reservas para reducir os custos de extracción.

O modelo representado na gráfica 4 permite extraer as conclusións clásicas sobre o comportamento do empresario en distintas situacións de rendibilidade na extracción de RN non renovables cando se trata de maximizar $VP(\pi)$ (Pearce e Turner, 1990; Mueller, 1994; Livernois, 2009). Tamén permite determinar en que condicións se produce a preservación dos recursos naturais:

– Se α é menor que s , o empresario compensa a caída na rendibilidade aumentando a taxa de extracción. Inicialmente, o empresario maximiza $VP(\pi)$ diminuíndo

- as reservas existentes. Cando a taxa de extracción se aproxima a $F_{max}(r_d, X_s)$, inviste eventualmente en novos pozos para aumentar r_d .
- Se α é un pouco maior que s , en principio o empresario reduce a taxa de extracción e aumenta o nivel das súas reservas.
 - Se α é moito maior que s , o empresario pode concluír que se atopa ante unha nova condición de xuros relevantes máis altos, polo que aumenta a taxa de extracción de petróleo e inviste no desenvolvemento de novos pozos para aumentar r_d .
 - Se α é igual a s , o empresario extrae o recurso natural maximizando $VP(\pi)$ e non se sente estimulado para aumentar a taxa de desenvolvemento de novas reservas, r_d .

Desde o punto de vista da conservación dos recursos naturais, conclúese que é interesante manter a rendibilidade neta do empresario próxima á súa taxa de xuro relevante, isto é, $\alpha = s$. Para conseguir isto é necesario que exista unha actuación dinámica sobre o *royalty*, de forma que o empresario actúe para poder manter a súa rendibilidade neta próxima á súa taxa de xuro relevante. Este resultado é similar aos descritos para os recursos renovables e non renovables que poden esgotarse (Livernois, 2009).

A observación histórica da conduta das empresas parece indicar que este obxectivo é difícil de conseguir de forma natural debido a que o comportamento do empresario vai encamiñado a conseguir unha maior rendibilidade neta (Livernois, 2009; Mueller, 1994). Así, é interesante unha acción proactiva da axencia reguladora para a conservación dos recursos naturais. A continuación analizarase como utilizar o *royalty* para garantir condicións de sostibilidade das reservas e beneficio económico.

5.4. VIABILIDADE DO USO DO ROYALTY PARA CONSERVAR RESERVAS DE RN

O *royalty* pode utilizarse para obter recursos financeiros para realizar políticas sociais e para regular o nivel das reservas dos RN. No segundo caso, a axencia reguladora actuaría sobre a cota variable do *royalty* para inducilo a restringir a taxa de extracción de RN ao longo do tempo. A introdución dunha cota variable proporciona unha variable temporal que pode ser utilizada para facer viable unha política de mantemento do nivel de reservas, isto é, evitar que o empresario aumente a taxa de extracción do recurso natural. Isto pode lograrse mantendo a rendibilidade do beneficio económico do empresario, α , próxima á súa taxa de xuro relevante no longo prazo a través de variacións positivas e negativas na cota variable do *royalty*.

Para efectuar a compensación son importantes o valor do *royalty* e tamén a súa taxa de variación. Para realizar unha compensación eficaz é necesario que a acción do regulador sobre a cota variable sexa capaz de absorber as variacións temporais na rendibilidade causadas por outras variables como os custos ou o prezo do pe-

tróleo. A capacidade do regulador é finita e está limitada pola amplitude de variación admisible no *royalty*.

Os resultados presentados na gráfica 7 indican que é posible modificar a cota variable para distintas situacións co obxectivo de que a rendibilidade do empresario se iguale á súa taxa de xuro relevante, neste caso un 7% anual. Os tests realizados pretenden comprobar a capacidade dinámica da variación da cota variable do *royalty* de acomodar modificacións temporais do prezo do recurso natural. Un dos tests foi oscilatorio para verificar esta capacidade dinámica.

As amplitudes de variacións no prezo dun 10% en forma de oscilación e curvas que diminúen e aumentan coa segunda derivada negativa tiveron lugar durante un período de entre 3,5 e 5 anos sen ningún tipo de axuste ou metodoloxía de control óptimo para realizar a compensación. A cota variou, pasando dun 30% a un 0% nestes períodos. A gráfica 7 mostra que compensar un beneficio económico decrecente durante un longo período de tempo é difícil; oscilacións positivas e negativas poden ser compensadas se se utiliza unha metodoloxía adecuada para modificar a cota de variación con anterioridade, mentres que as variacións positivas se compensan facilmente.

Os resultados indican que é posible acomodar fluctuacións da rendibilidade en torno a un 10% en períodos de entre tres e cinco anos. Durante este período, desde o punto de vista do empresario, este experimentou un ambiente de negocio bastante predicible e a rendibilidade situouse próxima á súa taxa de xuro relevante. Se coñece a acción proactiva do regulador, o empresario pode facer previsións futuras cunha maior precisión e extraer RN para atender a demanda. E conta con menos oportunidades para aproveitar as variacións do mercado e aumentar o seu beneficio económico. Desta forma, hai unha conservación maior dos recursos naturais.

O modelo tamén sinala, de acordo coa literatura (Cawood, 2010; Aydin, 2012), que a variación da cota variable pode utilizarse para promover o obxectivo oposto, isto é, aumentar a taxa de extracción de petróleo. Para iso hai dúas alternativas: 1) promover modificacións temporais na cota variable do *royalty* que manteñan durante ese período unha rendibilidade inferior á taxa de xuro relevante do empresario; e 2) manter a rendibilidade bastante alta para favorecer o investimento no desenvolvemento de novas reservas para a extracción de RN (Cawood, 2010). A primeira alternativa debe utilizarse coidadosamente para non promover o desinterese dos investidores.

6. CONCLUSIONES

Neste traballo discutiuse a posibilidade de utilizar unha cota variable do *royalty* para preservar as reservas de petróleo. Para realizar o estudo desenvolveuse, desde o punto de vista dun empresario en réxime de competencia, un modelo para a evolución das reservas de petróleo dispoñibles para a extracción. O modelo ten en conta a taxa de desenvolvemento de novas reservas e de extracción de pe-

tróleo, a taxa de xuro relevante para o empresario e os custos dependentes do nivel de reservas dispoñibles para a extracción. A taxa de desenvolvemento de novas reservas, desde o punto de vista do empresario, ten a mesma función loxística que describe os recursos naturais renovables.

Os resultados obtidos mostran que a situación que maximiza o beneficio económico do empresario e reduce a taxa de extracción de petróleo se produce cando a rendibilidade neta do empresario se aproxima á súa taxa de xuro relevante. Isto débese ao comportamento típico do empresario na área dos recursos naturais non renovables. Para compensar as perdas o empresario tende a aumentar a taxa de extracción. Para aproveitar os períodos de incremento no valor dos recursos naturais, procura investir máis no desenvolvemento de novas reservas e aumentar a extracción. Deixar o empresario directamente exposto aos cambios na rendibilidade do mercado favorece que se produzan taxas de extracción superiores ás que serían necesarias para satisfacer a demanda.

A introdución dunha cota variable do *royalty* proporciona unha variable que pode compensar as variacións da rendibilidade causadas polo mercado e ofrecerlle ao empresario unha rendibilidade próxima á súa taxa de xuro relevante. Realizáronse algúns tests simulando variacións de rendibilidade positiva, negativa e oscilatoria cunha amplitude dun 10%. Os resultados indican que é difícil compensar variacións negativas da rendibilidade durante un período de tempo superior a 3,5 anos. As oscilacións na rendibilidade son máis fáciles de compensar e as variacións positivas non ofrecen ningunha dificultade. Os resultados sinalan que, dentro duns límites, é posible regular o nivel de reservas dos recursos naturais e obter medios financeiros para levar a cabo as políticas sociais.

Como continuación deste traballo pretende modelarse a taxa de desenvolvemento de novas reservas de petróleo nos xacementos “presal” brasileiros e analizar como debería utilizarse o *royalty* para garantir condicións económicas para o empresario, recursos financeiros para levar a cabo políticas sociais e para manter as reservas de petróleo para as xeracións futuras.

ANEXO 1. DETALLES DO DESENVOLVEMENTO DO PROCESO DE MAXIMIZACIÓN

$H(t)$ pode escribirse como:

$$H(X(t)) = F(X(t)) - \frac{dX(t)}{dt} \quad (A1)$$

O integrando da ecuación (2) pode escribirse, entón, como:

$$f(X, \dot{X}, t) = r(X, t) (F(X) - \dot{X}) e^{-st} \quad (A2)$$

onde $\dot{X} = \frac{dX}{dt}$. A ecuación (2) pode escribirse como:

$$VP(\pi) = \int_0^{\infty} f(X, \dot{X}, t) dt \quad (A3)$$

A integral $VP(\pi)$ será extrema se a función f satisfai a seguinte ecuación (Pearce e Turner, 1990):

$$\frac{\delta F}{\delta X} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\delta f}{\delta \dot{X}} \right) = 0 \quad (A4)$$

Calculando as derivadas parciais e a derivada total da ecuación (A4) e facendo algúns cambios alxébricos, obtense:

$$\frac{dF}{dX} \Big|_{x_0} = - \frac{F(X_0)}{(1-f)(p-c(X))} \frac{dc}{dX} \Big|_{x_0} + s(t) - \alpha_{pc}(t) + \alpha_f(t) \quad (A5)$$

onde $\alpha_{pc}(t) = \frac{1}{p-c} \frac{d(p-c)}{dt}$ é a unidade da taxa de rendemento porcentual que depende da variación temporal do custo de extracción, do descubrimento de recursos e do seu prezo de venda; $\alpha_f(t) = -\frac{1}{1-f} \frac{df}{dt}$ é a taxa de variación porcentual da cota variable do *royalty*; e $r(X_0, t) = (1-f)(p(t) - c(X))$. Cada parte da ecuación (A5) ten como unidade o ano⁻¹ e representa taxas porcentuais da variación temporal de varias magnitudes. X_0 é o valor da cantidade de reservas que maximiza $VP(\pi)$.

ANEXO 2. MAXIMIZACIÓN CON CUSTOS DECRECENTES EN FUNCIÓN DAS RESERVAS

Consideremos o problema de maximización con custos decrecentes tendo en conta a taxa de xuro, variación do rendemento económico. Esta análise é moi similar ao tratamento de RN renovables con custos decrecentes en función das reservas dispoñibles de recursos naturais (Pearce e Turner, 1990).

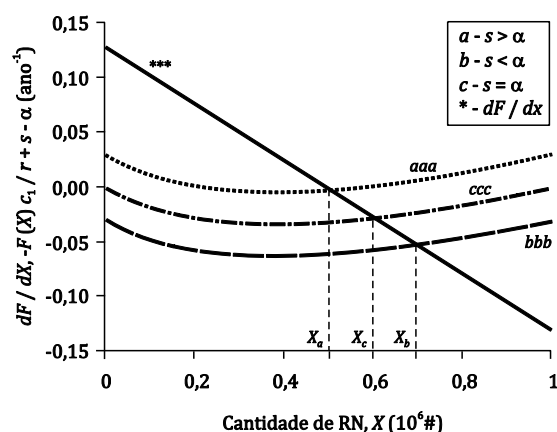
Polo que respecta aos parámetros taxa de xuro relevante para o empresario, s , e taxa de beneficio neto $\alpha = \alpha_{pc} - \alpha_f$, consideramos tres situacións: a) a taxa de xuro é superior á taxa de beneficio económico nun 3% anual, isto é, $s - \alpha = 0,03 \text{ ano}^{-1}$; b) a taxa de xuro é inferior á taxa de beneficio económico neto nun 3% anual, é dicir, $s - \alpha = -0,03 \text{ ano}^{-1}$; e c) a taxa de xuro é igual á taxa de variación do beneficio económico, isto é, $s - \alpha = 0 \text{ ano}^{-1}$. Na gráfica A.1 preséntanse os resultados do nivel de reservas que maximiza o beneficio económico: X_a , X_b e X_c para as tres situacións, respectivamente. Nesta gráfica as funcións dF/dX e $g(X_0)$ obtéñense a partir doutras ecuacións, e son as seguintes:

$$\frac{dF}{dX} = r_d \left(1 - 2 \frac{X_0}{X_s} \right) \quad (A6)$$

$$g(X_0) = \frac{\left(1 - 2 \frac{X_0}{X_s} \right) X_0 c_1}{(1-f)(p - c_0 + c_1 X_0)} \quad (A7)$$

Como o custo da extracción cae co nivel de reservas, X_0 , o empresario traballa con niveis de reservas superiores a $X_s/2$. Neste rango $dF/dX < 0$ e para aumentar F é necesario diminuír o nivel das reservas dispoñibles para o empresario.

Gráfica A.1.- Nivel de reservas que maximiza o beneficio económico, $VP(\pi)$, tendo en conta a taxa de xuro, o aumento da rendibilidade neta e os custos decrecentes de extracción en relación co nivel de reservas



FONTE: Elaboración propia.

BIBLIOGRAFÍA

- AYDIN, L. (2012): "The Economic Impact of Petroleum Royalty Reform on Turkey's Upstream Oil and Gas Industry", *Energy Policy*, 43, pp. 166-172.
- BRASIL. AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO (2012). Rio de Janeiro: ANP. (20 de maio de 2012). <<http://www.anp.gov.br/?pg=22343&m=&t1=&t2=&t3=&t4=&ar=&ps=&cachebust=1271936959515>>.
- CARVALHO, F.C.L. (2008): *Aspectos éticos da exploração do petróleo: os royalties e a gestão intergeracional*. (Dissertação de mestrado). Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Planejamento Energético.
- CAWOOD, F.T. (2010): "The South African Mineral and Petroleum Resources Royalty Act - Background and Fundamental Principles", *Resources Policy*, 35, pp. 199-209.
- HOTELLING, H. (1931): "The Economics of Exhaustible Resources", *The Journal of Political Economy*, 39 (2) pp. 137-175.
- LIVRNOIS, J. (2009): "On the Empirical Significance of the Hotelling Rule", *Review of Environmental Economics and Policy*, 3, pp. 22-41.
- MUELLER, M.J. (1994): "Behaviour of Non-Renewable Natural Resource Firms Under Uncertainty - Optimizing or ad hoc", *Energy Economics*, 16, pp. 9-21.
- PEARCE, D.; TURNER, R.K. (1990): *Economics of Natural Resources and the Environment*. Harlow: Pearson Education.
- PINDYCK, R.S. (1981): "Models of Resource Markets and the Explanation of Resource Price Behavior", *Energy Economics*, 3, pp. 130-139.
- POSTALI, F.A.S. (2009): "Petroleum Royalties and Regional Development in Brazil: The Economic Growth of Recipient Towns", *Resources Policy*, 34, pp. 205-213.

POWER, M.; JEWKES, E. (1991): "The Impact of Royalties on the Development of Marginally Economic Discoveries: The Case of Nova Scotia", *Energy*, 16, pp. 989-1000.

STRAND, J. (2010): "Optimal Fossil-Fuel Taxation with Backstop Technologies and Tenure Risk", *Energy Economics*, 32, pp. 418-422.