

EL CARBÓN COLOMBIANO Y EL MODELO DE HOTELLING

GIOVANNI FRANCO*
ADRIÁN FELIPE GALLO**
ESTEBAN FRANCO***

RESUMEN

En este artículo se presenta una descripción de la relación existente entre el pensamiento económico y los recursos naturales, en especial, los no renovables. Se define el modelo de Hotelling, con su planteamiento matemático y su respectiva solución gráfica, el cual permite determinar el sendero óptimo de agotamiento de un recurso natural no renovable y una estimación de su precio de mercado. Un marco general sobre la actualidad y perspectivas del carbón térmico colombiano es la base para la aplicación de este modelo a dicho recurso energético, lo que determina, con base en las reservas probadas de carbón térmico en Colombia y su función de demanda, el tiempo de agotamiento y su precio de comercialización.

PALABRAS CLAVE: modelo de Hotelling; carbón; Colombia.

* Ingeniero de Minas y Metalurgia, Magíster en Ciencias Económicas y Doctor (c) en Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. Profesor en la Escuela de Ingeniería de Materiales y líder del Grupo de Investigación en Planeamiento Minero, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. Medellín, Colombia. gfranco@unal.edu.co

** Ingeniero de Minas y Metalurgia, Universidad Nacional de Colombia. Investigador, Grupo de Investigación en Planeamiento Minero, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. afgallo@unal.edu.co

*** Ingeniero Mecánico, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. Investigador, Grupo de Investigación y Desarrollo en Inteligencia Artificial (GIDIA). Medellín, Colombia. efrancos@unal.edu.co

COLOMBIAN COAL AND HOTELLING MODEL

ABSTRACT

In this paper a description of the relationship between economic thought and natural resources, especially those non-renewable, is presented. The Hotelling model is defined, with its mathematical approach and the respective graphical solution, which determines the optimal path of depletion of a non-renewable natural resource and an estimation of its market price. A general frame for the present situation and prospects for thermal coal in Colombia is the basis for the implementation of this model to this energy resource. Based on the proven reserves of thermal coal in Colombia and its demand function, time depletion and its trading price are determined.

KEY WORDS: Hotelling model; coal; Colombia.

O CARVÃO COLOMBIANO E O MODELO DE HOTELLING

RESUMO

Neste artigo apresenta-se uma descrição da relação existente entre o pensamento económico e os recursos naturais, especialmente, os não renováveis. Define-se o modelo de Hotelling, com a sua proposta matemática e a sua respetiva solução gráfica, o qual permite determinar o caminho ótimo de esgotamento de um recurso natural não renovável e uma estimativa do seu preço de mercado. Um enquadramento geral sobre a atualidade e perspectivas do carvão térmico colombiano é a base para a aplicação do este modelo a dito recurso energético, o que determina, com base nas reservas provadas de carvão térmico em Colômbia e sua função de demanda, o tempo de esgotamento e o seu preço de comercialização.

PALAVRAS-CÓDIGO: modelo de Hotelling; carvão; Colômbia.

1. INTRODUCCIÓN

Conocer o tener un acercamiento a los senderos óptimos de extracción para un recurso natural no renovable, así como los precios futuros a los cuales será comercializado en el mercado internacional, son elementos de suma importancia a la hora de planear y gestionar un recurso energético, como es el caso del carbón en Colombia. La línea de pensamiento económico bajo la cual se pretende desarrollar este análisis se enmarca dentro de los minerales estratégicos; considerando la importancia que tienen para el crecimiento económico y el desarrollo del país y especialmente de las regiones que explotan los recursos carboníferos, el análisis que se describe en este artículo contribuirá a definir la base de las políticas institucionales relacionadas con estos recursos.

El origen en la definición de este tipo de análisis se presenta alrededor de 1931, cuando el economista Harold Hotelling intenta describir y tener una aproximación, desde una perspectiva formal, a la senda óptima de extracción final de un recurso, tanto renovable como no renovable (Hotelling, 2001).

Los alcances que tiene este trabajo se enmarcan dentro de los carbones térmicos que existen en los principales distritos mineros del país. Se dejan para un análisis posterior los carbones metalúrgicos, que presentan un excelente potencial como demanda con características de bien comercializable en los mercados internacionales.

Alguna de las limitaciones que se tienen cuando se desea llevar a cabo un trabajo como el que aquí se realiza es la falta de información consolidada (si bien puede encontrarse información secundaria en



los diferentes organismos de control del Estado) del comportamiento real del nivel de extracción anual de carbón, para cada uno de los departamentos con esta vocación en el país. Sin embargo, las herramientas estadísticas ayudan a generar modelos econométricos que sirven como insumo principal para la construcción de comportamientos históricos y futuros de los niveles de extracción y de costos en el mercado del mineral de interés.

2. EL PENSAMIENTO ECONÓMICO Y LOS RECURSOS NATURALES

Como punto de partida es necesario realizar una breve mirada histórica a la relación existente entre los recursos naturales y el pensamiento de algunos de los más importantes economistas que han intentado vincular la Economía con su agotamiento natural y utilización por parte del sistema productivo. Este análisis comienza en Thomas R. Malthus, con su pesimismo acerca de los límites de los recursos alimentarios y el crecimiento poblacional, lo que se conoce como la maldición malthusiana; David Ricardo, con su teoría del valor; John Stuart Mill y su disponibilidad limitada de los recursos naturales como límite al crecimiento económico; William Stanley Jevons, en su “Theory of political economy”, la fundamentación de la teoría marginal del valor, y “The coal question”, en donde predice el agotamiento del carbón en Inglaterra; Arthur Cecil Pigou y su “The economics of welfare”, donde define el concepto de la externalidad negativa, conocida como contaminación; Harold Hotelling, en el cual se fundamenta este artículo, que en “The economics of exhaustible resources” define el sendero óptimo de extracción de un recurso natural renovable y un recurso natural no renovable); Ronald Coase, en sus obras “The problem of the social cost” y “The nature of the firm”, Premio Nobel de Economía de 1991, y finalmente, Nicholas Georgescu-Roegen, David Pearce, Antonio Valero y José Manuel Naredo, entre otros (Romero, 1997).

Un punto común para los anteriores economistas hacia los recursos naturales no renovables es

intentar resolver algunas preguntas, siendo así, la cuestión más importante en la economía de los recursos no renovables: ¿A qué ritmo deben explotarse o extraerse los recursos naturales no renovables? Es decir: ¿Qué cantidad debe extraerse cada año para los usos corrientes? O, en otras palabras: ¿Qué cantidad debe permanecer en el subsuelo como reserva para usos futuros? (Hotelling, 2001).

Estos cuestionamientos se enmarcan en lo que el Informe Brundland (1987) denominó desarrollo sostenible, el cual satisface las necesidades del presente sin comprometer las necesidades de las futuras generaciones. La anterior pregunta o cuestionamiento converge a otra equivalente: ¿Cuál es el precio al que deben venderse (comercializarse) en el mercado las unidades de cada recurso y cómo debe variar este precio a lo largo del tiempo?

Es válido aclarar que en este artículo se intenta dar respuesta a este cuestionamiento.

Enseguida se presentará el modelo de Hotelling en forma teórica, teniendo en cuenta el análisis de las variables implicadas en el mercado, para el estudio de la extracción y agotamiento de los recursos minerales no renovables.

3. EL MODELO DE HOTELLING

El modelo de análisis inspirado en la regla de Hotelling es la pieza central de la economía de los recursos naturales. Este modelo ha servido también como marco de análisis para una gran cantidad de estudios sobre el modo en que la sociedad irá respondiendo a los desafíos cada vez mayores que supone el agotamiento de los recursos no renovables (Montoya, Martínez y Franco, 2010). Tal modelo intenta responder cómo se plantea la tasa de extracción de un recurso natural (Rojas, 2010).

El modelo de Hotelling analiza la senda óptima de agotamiento o extracción de un recurso natural, tanto renovable como no renovable, teniendo en cuenta los tres elementos siguientes:

- a. Período óptimo de agotamiento
- b. Tasa óptima de extracción de un recurso natural
- c. Demanda, tecnología y reservas

La analiza con base en los siguientes tres supuestos:

- a. Las reservas del mineral se extraen sin ningún costo, no hay adición de nuevas reservas y se mantiene la demanda.
- b. La cantidad extraída no afecta el precio; la oferta es elástica.
- c. Como no hay costos, el beneficio es igual al ingreso por la venta del material.

Teniendo en cuenta los elementos y supuestos anteriores, se describe a continuación el planteamiento matemático en las ecuaciones 1 a 4 que resumen el modelo de Hotelling

$$P_t = P_0 e^{it} \tag{1}$$

En donde:

- P_t : Precio de un recurso en un periodo t
- P_0 : Precio del recurso en un periodo inicial
- i : Tasa de interés o tasa de descuento

La función de demanda será:

$$P_t = a - b * q_t, b > 0 \tag{2}$$

Donde:

- a: Término independiente de la función de demanda
- b: Término dependiente de la función de demanda
- q: Reservas probadas de carbón en un territorio determinado

Con base en las ecuaciones 1 y 2 y aplicando sustituciones algebraicas en las variables dependientes e independientes a y b y en el stock de recursos disponibles q , se obtiene el sistema representado por las ecuaciones 3 y 4.

$$P_0 * e^{it} = a \tag{3}$$

$$\frac{a * t}{b} + \frac{P_0}{i * b} (1 - e^{it}) = q \tag{4}$$

Por otro lado, gráficamente el modelo de Hotelling se puede representar como se observa en la figura 1.

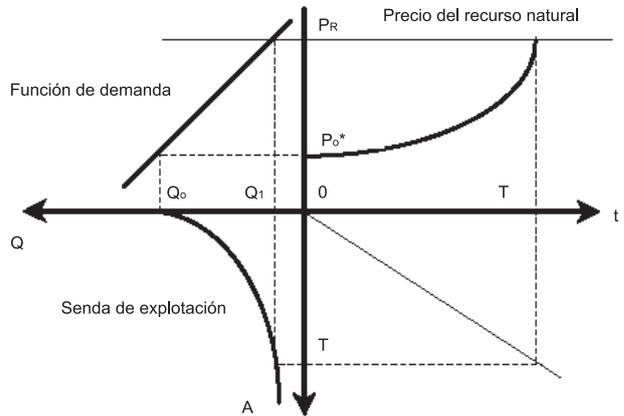


Figura 1. Solución de Hotelling (Fuente: Martínez y Roca, 2001)

Teniendo en cuenta la figura 1, el cuadrante superior derecho muestra la trayectoria de precio del recurso a lo largo del tiempo, de la misma forma que la senda óptima de extinción que tiene lugar en T . El cuadrante superior izquierdo muestra la demanda de recurso representada por una curva de demanda convencional, pero mostrada de forma inversa: cuanto mayor sea el precio del recurso, menor será la cantidad demandada. El cuadrante inferior derecho permite transferir –mediante una bisectriz de 45° – la medida del tiempo en la parte inferior del eje vertical al eje horizontal a la derecha. El cuadrante inferior izquierdo muestra la relación entre la cantidad demandada, el tiempo y la cantidad extraída acumulada. El área bajo la curva en este cuadrante muestra la extracción acumulada del recurso agotable.

Para llevar a cabo la aplicación real de la regla de Hotelling se requiere el conocimiento de la tasa de interés y de los precios futuros; la pregunta sobre



cuál es la tasa óptima de descuento futuro que debe adoptarse no tiene respuesta en la teoría económica, ya que es equivalente a preguntarse acerca del peso relativo que algunos agentes económicos (los que no han nacido, las generaciones futuras) deben dar a las demandas de otros agentes, todo ello en contra del principio microeconómico de racionalidad, en el que todos los agentes están capacitados y autorizados para acudir al mercado con sus preferencias y sus dotaciones iniciales de bienes (Romero, 1997).

Es importante señalar que Robert M. Solow, citado por Georgescu-Roegen, parte de Hotelling para plantear su artículo sobre la economía de los recursos o los recursos de la economía e interpreta la regla de manera muy clara, afirmando que, cualquiera que sea la secuencia, el precio del mercado y el ritmo de extracción se conectan por la curva de demanda del recurso natural, de modo que, en última instancia, cuando aumenta el precio del mercado, el ritmo de extracción corriente debe bajar a lo largo de la curva de demanda. Tarde o temprano el precio del mercado llegará a un nivel tan alto que elimine la demanda por completo; en ese momento la extracción bajará a cero. Si los flujos y los depósitos se han coordinado muy bien, mediante las operaciones de mercado de futuros o de una junta de planeación, la última tonelada extraída será también la última tonelada que exista en el suelo (ISEE, 1997). Vale la pena destacar en este punto que Solow no tuvo en cuenta variables tan importantes como la sustitución y la tasa de uso del recurso mineral.

Solow hace un análisis del suministro de un mismo mineral a partir de dos fuentes diferentes y explica la manera en que se agotará la primera fuente y el momento en que la segunda podrá ser explotada de manera rentable. Más adelante discute sobre las tasas de interés del mercado y las tasas sociales de preferencia en el tiempo (asignación intergeneracional de los recursos agotables) y concluye que “el futuro puede ser demasiado importante para dejarlo al capricho de las expectativas erradas y los altibajos de la ética protestante”, adicionalmente incluye en su análisis los factores de mejoramiento

tecnológico y sustituibilidad de recursos naturales por otros factores para afirmar que “en principio no habrá problema, el mundo puede seguir adelante sin recursos naturales de modo que su agotamiento es sólo un acontecimiento, no una catástrofe”. Y agrega, “el agotamiento de un depósito dado de recursos naturales puede ser superado en cualquier medida si la disponibilidad inicial de capital es suficientemente grande” (ISEE, 1997).

Por consiguiente, hay que resaltar que para explotar los recursos minerales como lo hace actualmente la economía, se requiere encontrarlos en condiciones de concentración muy superiores a los que están en la corteza terrestre; un yacimiento o un depósito mineral es una circunstancia excepcional en la naturaleza; la ubicación geográfica y el desarrollo tecnológico actual tienen limitaciones físicas relacionadas con las necesidades energéticas para explotar los recursos. Los costos físicos reales de extracción y procesamiento (beneficio) de los minerales son muy altos, y no está explícito si el tener más capital económico o capital manufacturado incrementa las posibilidades de explotar recursos con leyes muy inferiores a las que se usan hoy en día. Sin embargo, algunos autores sostienen que, pese a las limitaciones, el mundo jamás vivirá una crisis por recursos minerales, teniendo en cuenta las cantidades enormes presentes en los océanos. Nicholas Georgescu-Roegen propone una tasa de descuento futura igual a cero para asignar de forma equitativa los recursos agotables a lo largo del tiempo, abandonando el principio de maximizar la utilidad, y en su lugar, apoyarse en el razonable principio de evitar las incomodidades futuras (Martínez y Roca, 2001). Además, Georgescu-Roegen hace una fuerte crítica a los planteamientos de Solow al afirmar:

....uno debe tener un punto de vista muy erróneo del proceso económico en su conjunto como para no ver que hay factores materiales diferentes a los recursos naturales, seguir sosteniendo que «el mundo puede en efecto pasárselo sin recursos naturales» es ignorar la diferencia entre el mundo real y el jardín del edén (ISEE, 1997).

4. ACTUALIDAD Y PERSPECTIVAS DEL CARBÓN COLOMBIANO

A continuación se presenta la actualidad y perspectivas del carbón colombiano en diferentes análisis del mercado interno, como insumo principal para el desarrollo y aplicación del modelo de Hotelling y la aproximación económica que se pretende encontrar.

En la actualidad Colombia tiene las mayores reservas de carbón en América Latina y es carbón reconocido mundialmente por tener bajo contenido de cenizas y azufre y por ser alto en volátiles y en poder calorífico (DNP, 2008).

La extracción nacional de carbón se concentra en ocho zonas de explotación, las cuales son: 1. Albania, Barrancas, Hatonuevo y Maicao en La Guajira, 2. La Jagua de Ibirico en el Cesar, 3. Puerto Libertador en Córdoba, 4. Zipaquirá en Cundinamarca, 5. Zulia en Santander y Norte de Santander, 6. Paz del Río en Boyacá, 7. Amagá, Angelópolis, Fredonia, Titiribí y Venecia en Antioquia y Antigua Caldas y 8. Jamundí en el Valle del Cauca y Cauca; se presentan con su información consignada en estudios previos, y el Instituto Colombiano de Minería y Geología –Ingeominas– estimó que las reservas de carbón de estas zonas de explotación ascendían a más de 7.800 millones de toneladas en el 2004; un valor actual de las reservas probadas sería de 7.832 millones de toneladas al 2010 (Ingeominas, 2006). Es importante señalar que de las anteriores zonas solamente La Guajira y el Cesar extraen el carbón térmico con miras a los mercados internacionales; las demás zonas utilizan el carbón para el consumo interno.

Hasta el año 2008 era previsible que el carbón siguiera ocupando tan importante lugar en el comercio internacional, dado que el precio aumentaría, y con las reservas probadas del mineral, las inversiones iban destinadas al aumento de volúmenes de producción y favorecer la gran demanda nacional. Pero los pronósticos no previeron la recesión económica que

se presentó en el 2008, lo cual fue un impacto duro para la economía del país por la disminución de su demanda; si se tiene en mente que los incrementos eran del 137 %, teniendo un precio en el mercado de 136 USD/t, estar a la baja en el 2009 a 70,6 USD/t, con un gran decrecimiento entre el 70 y 80 %, con fluctuaciones muy bajas (IMCPortaL, 2009).

Con los planes de expansión de las minas de carbón en el Cesar y La Guajira, los 72,8 millones de toneladas de este mineral que produjo el país en el 2009 no serán ni la mitad de lo que se tendrá dentro de 15 años, cuando la producción supere los 170 millones de toneladas anuales (UPME, 2009).

Esta meta tan ambiciosa por parte de la Unidad de Planeación Minero Energética no solamente se puede tener en cuenta como una cifra más, sino que para su cumplimiento deberá converger en las metas de planeación de largo plazo que tienen las grandes empresas exportadoras de carbón térmico que se encuentran en Colombia. De lo anterior, la incógnita que se requiere resolver es si están las grandes empresas mineras de Colombia teniendo en cuenta estos planes de expansión definidos por la autoridad minera.

5. CASO DE ESTUDIO Y RESULTADOS

Acá se plantea de manera matemática la solución y aproximación del modelo de Hotelling para determinar los senderos óptimos de extracción y los precios del carbón esperados. Además, la definición de los resultados del estudio que muestra el sendero óptimo de extracción de la totalidad de las reservas.

Para la determinación de los senderos óptimos de extracción (t) y de precios (P_t) se utilizan las ecuaciones 3 y 4, con los siguientes datos de partida relacionados con el carbón y con las condiciones nacionales:

$$i = 0,1698$$

$$a = 20.000.000$$



$$b = 4.000.000$$

$q = 7.832.000.000$ de toneladas.

La función de demanda viene dada por:

$$P = 4.000.000 * q + 20.000.000 \quad (5)$$

La ecuación 5 se halló utilizando un modelo econométrico con base en datos históricos de extracción anual de carbón en Colombia entre los años 1996 y 2009, con un coeficiente de correlación de 0,944.

Para un tipo de descuento del 16,98 %, se tiene el sistema compuesto por las ecuaciones 6 y 7:

$$P_0 * e^{0,1698t} = 20x10^6 \quad (6)$$

$$\frac{2x10^7 * t}{4x10^6} + \frac{P_0}{0,1698 * 4x10^6} * (1 - e^{0,1698t}) = 7,832x10^9 \quad (7)$$

Resolviendo las ecuaciones 6 y 7 se obtiene como solución los valores de P_0 y t :

$$P_0 = 70,6 \text{ USD/t}$$

$$t = 46 \text{ años}$$

Es decir, el horizonte de extracción o periodo óptimo de agotamiento del carbón, a la luz del modelo de Hotelling, *ceteris paribus*, es de 46 años (para el desarrollo de este trabajo 46 años corresponden al año 2056) y el precio inicial al que es comercializado este recurso es 70,6 US\$/t.

Para dicho P_0 la cantidad demandada y, por tanto, extraída es $q_0 = 72,8$ millones de toneladas.

En la tabla 1, se pueden apreciar los resultados hallados para los senderos óptimos de extracción y de precios del carbón en Colombia, utilizando como base $P_0 = 70,6 \text{ USD/t}$ y $t = 46$ años.

Tabla 1. Senderos óptimos de extracción y precios del carbón en Colombia entre los años 2010 ($t = 0$) y 2056 ($t = 46$)

Tiempo (t, años)	Precio (P, USD/t)	Cantidad extraída (q_t , 10^6 t)	Stock disponible ($q - q_t$), 10^6 t)
0	70,6	72,800	7832
1	63	75,285	7757
2	66	79,244	7677
3	69	83,203	7594
4	72	87,162	7507
46	197	257,399	0

Nota: Para efectos de presentación, se muestran los primeros 5 años y el último año (46) en el que se determinó que el *stock* disponible de carbón es cero.

6. CONCLUSIONES

Se enumeran algunas de las conclusiones que surgen de la elaboración de este artículo.

Teniendo en cuenta las niveles de extracción de recursos carboníferos que se presentan en la actualidad en el sector minero colombiano y bajo

el enfoque desarrollado en este artículo, Colombia cuenta con reservas probadas de este tipo de recurso energético por un lapso de 46 años, asumiendo como punto de referencia el año 2010, es decir, hasta el año 2056.

Dado el “boom minero” en el cual se encuentra la economía nacional, puede resultar interesante

emplear este tipo de análisis aplicando modelos en otros minerales o grupos de minerales, con el fin de dotar a las instituciones tomadoras de decisiones mineras en Colombia con herramientas de gestión y planificación económica.

Es importante señalar que, con elementos adicionales tales como costos de producción y calidades de los carbones, entre otros, el modelo desarrollado en este trabajo se puede refinar de tal forma que la senda de explotación y los precios futuros de comercialización de la tonelada de carbón se acerquen de manera óptima a las condiciones de la realidad minera internacional.

Esta aproximación económica se puede aplicar para cada tipo de carbón (térmico o metalúrgico), analizando cada caso según el destino final, es decir, mercado internacional o consumo interno.

La aplicación del modelo de Hotelling proporciona generalidades óptimas y reales de la tendencia del precio del carbón con su volumen de extracción en el tiempo, ofreciendo herramientas de análisis adicionales de tipo determinístico, que redundan en una mejor comprensión del negocio minero.

Conviene señalar que, aunque los supuestos bajo los cuales se construye este modelo son muy fuertes (como lo son extracción sin costo, no hay exploración en busca de nuevas reservas mineras, demanda constante, entre otros), es oportuno contar con este tipo de herramientas que permitan tomar decisiones político-económicas que redunden en beneficio de un sector como el minero.

REFERENCIAS

- Departamento Nacional de Planeación (DNP). *Documento CONPES 3540, Estrategia para la optimización y modernización del transporte de carbón por los puertos marítimos del municipio de Ciénaga y la Bahía de Santa Marta*. Bogotá, 2008.
- Hotelling, Harold (2001) "Economía de los recursos agotables". Álvarez, Carlos Guillermo; Díaz, Javier y Olaya, Alfredo (trads.). *Gestión y Ambiente*, vol. 4, No. 1 (julio), pp. 87-107.
- Instituto Colombiano de Geología y Minería (Ingeominas). *Tareas para el desarrollo del carbón en Colombia*. 2 tomos. Bogotá: Ingeominas, 2006.
- Martínez, Joan y Roca, Jordi. *Economía ecológica y política ambiental*. 2 ed. México: PNUMA y Fondo de Cultura Económica, 2001. 499 p.
- Montoya, Marylone; Martínez, Adriana and Franco, Giovanni (2010). "Analysis of the gasoline price in Colombia: approximation". *DYNA*, vol. 77, No. 163 (September), pp. 279-289.
- Portal de Información Minera Colombiana (IMCPortal). *Precios de minerales. Precios de carbón 1960-2009* [en línea] [consultado el 9 de septiembre de 2010]. Disponible en: <http://www.imcportal.com/contenido.php?option=showpagecat&scat=8>
- Rojas, Carlos. (2010). "Valoración de recursos minerales bajo la teoría del desarrollo sostenible". *Revista EIA*, No. 13 (julio), pp. 65-75.
- Romero, Carlos. *Economía de los recursos ambientales y naturales*. Madrid: Alianza Editorial, 1997. 214 p.
- The International Society for Ecological Economics (ISEE). *Ecological Economics* (1997). Volume 22, Issue 3 (September) dedicated to Nicholas Georgescu-Roegen, pp. 171-306.
- Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). *Mirada óptima de extracción de grandes compañías en Colombia*. Bogotá, 2009.