© *Investigaciones Regionales — Journal of Regional Research, 33 (2015) — Páginas 123 a 134*
Sección Notas metodológicas y de investigación

Nueva metodología para la descomposición de los costes generalizados del transporte de mercancías por carretera usando la teoría económica de los números índice

Andrés Maroto *, José Luis Zofío *

RESUMEN: La importancia de los costes del transporte a la hora de analizar aspectos relacionados con la accesibilidad económica y geográfica, los flujos interregionales de comercio, o la localización territorial y especialización productiva, es indudable en la actualidad. Muchos trabajos se han dedicado con éxito a la definición y medición de estos costes del transporte desde un punto de vista estático. Sin embargo, la literatura especializada aún carece de una metodología adecuada para su cálculo dinámico a través del tiempo. Por esta razón, este trabajo mejora el marco metodológico existente para medir correctamente las variaciones temporales en los costes del transporte. Para ello usamos la teoría económica de los números índice y gracias a ella descomponemos de forma precisa los efectos que tienen sobre los cambios en los costes del transporte tanto las variables de tipo económico (precios) como relacionadas con la red de infraestructuras.

Clasificación JEL: C43; H54; L92; R58.

Palabras clave: costes generalizados del transporte; números índice.

Using the economic theory of index numbers to decompose the road freight generalized transport costs

ABSTRACT: The importance of the transport costs for micro and macro geographical analyses regarding economic accessibility, interterritorial trade patterns, or regional localization and productive specialization, is nowadays paramount. Many studies have been devoted to defining and measuring transport costs from

---

* Departamento de Análisis Económico: Teoría Económica e Historia Económica, Universidad Autónoma de Madrid, C/ Francisco Tomás y Valiente, 5, E-28049, Madrid, Spain.

El presente texto se basa en un documento más amplio elaborado por Zofio *et al*. (2014). Los autores agradecen el apoyo financiero obtenido de la Dirección General de Universidades e Investigación de la Comunidad de Madrid (Progrrama S2007-HUM-0467, *www.uam.es/transportrade*), del Ministerio de Fomento (P42/08, *www.proyectodestino.es*), y el Ministerio de Ciencia e Innovación (ECO2010-21643).

La base de datos de CGTs obtenida mediante esta metodología se puede pedir libremente a los autores (*andres.maroto@uam.es*) para su uso y explotación.

Recibido: 07 de mayo de 2015 / Aceptado: 13 de mayo de 2015

the point of view of a static cross-section perspective. However, when it comes to characterizing their evolution time, a suitable dynamic framework has not been yet presented. In this context, the contribution of this note consists on improving the existing methodology to accurately measure the change in generalized transport costs over time within the economic theory approach to index numbers and, by doing so, provide a consistent decomposition of these changes that allows us to determine precisely the effects that both economic and infrastructure determinants have on transport costs variation.

JEL Classification: C43; H54; L92; R58.

Keywords: generalized transport costs; index number theory.

1. Motivación y valor añadido de la metodología

La importancia de la accesibilidad desde una perspectiva espacial es indudable en la actualidad. Esto es especialmente relevante para los análisis regionales sobre localización y especialización económica, así como para aquellos relacionados con los flujos de comercio interregional. Todos estos aspectos están íntimamente relacionados e influenciados por los costes del transporte, que constituyen un primer indicador de la accesibilidad. Aunque la importancia de los costes del transporte se ha ido reduciendo en las décadas pasadas (Glaeser y Koolhase, 2003), el mundo queda aún lejos de ser plano. Por esta razón, muchos trabajos han intentado definir y medir los costes del transporte y sus determinantes [1]. Desde el punto de vista del análisis estático existe un consenso generalizado sobre la adecuación de estos estudios.

Sin embargo, cuando uno intenta analizar el fenómeno desde una perspectiva dinámica, las aproximaciones seguidas hasta la fecha, como las técnicas de descomposición o *shift-share* usadas, entre otros, por Combes y Lafourcade (2005), ya no son válidas. Esta falta de un marco de referencia para la definición y el cálculo de la variaciones de los costes del transporte en el tiempo ha tenido importantes consecuencias: i) los trabajos llevados a cabo para diferentes periodos y regiones no son comparables ya que usan diferentes aproximaciones metodológicas; ii) el trabajo académico ha tenido una influencia limitada a la hora de impulsar la adopción de un marco de referencia generalizado para los costes del transporte por parte de las agencias estadísticas nacionales; y iii) la falta de series temporales a largo plazo que ha dificultado la implantación de políticas económicas y de infraestructuras adecuadas.

En este contexto, la contribución de nuestro trabajo es teórica y pretende mejorar la metodología existente para medir correctamente las variaciones temporales en los costes del transporte. Para ello usamos el marco de la teoría económica de los números índice y a través de ella descomponemos de forma precisa los efectos que tienen sobre los cambios en los costes del transporte tanto las variables de tipo económico (precios) como las relacionadas con la red de infraestructuras. En concreto, adopta-

[1] Véase Banco Mundial (2009) para una revisión de estos trabajos.

mos la formulación introducida por Fisher en 1922 para el cálculo de los índices de precios y volúmenes en los que puede descomponerse la variación de los costes del transporte. Para el índice de precios usaremos la formulación del verdadero índice del coste de producción introducida por Könus (1924), que permite obtener de manera implícita su índice de volumen (cantidades) asociado aplicando la regla del producto. Finalmente, adoptaremos una versión encadenada de los índices de valor, precio y volumen que nos permitirá calcular su variación acumulada para periodos de tiempo intermedios y obtener descomposiciones consistentes de estas series temporales para cualquier subperiodo temporal.

La principal mejora de nuestra propuesta frente a las anteriores técnicas de descomposición usadas en otros trabajos relacionados es que el uso de números índice permite medir objetivamente la contribución de las infraestructuras a la evolución de los costes del transporte, en lugar de hacerlo como un residuo. Igualmente se superan otras de las limitaciones tradicionales de las técnicas de descomposición, como la inestabilidad estructural, las limitaciones de tipo inferencial, la ausencia de contenido teórico, algunos problemas de agregación, o la interdependencia en los efectos.

La estructura de la nota es la siguiente. Tras esta breve introducción, en la sección 2 se definen el coste generalizado del transporte (*Generalized Transport Cost*, *GTC*) así como su cálculo. Posteriormente, la sección 3 muestra el marco teórico —basado en la teoría de los números índice— que nos permitirá descomponer las variaciones en el *GTC* en sus variables de índole económico y de infraestructuras, su interpretación, y algunas propiedades de especial interés que cumplen los índices calculados dentro de dicho marco teórico. Finalmente, la nota concluye con algunas consideraciones importantes para la futura expansión de esta metodología en los trabajos relacionados con los costes del transporte a nivel regional.

2. Definición y cálculo de los costes generalizados de transporte

El primer trabajo que introdujo el concepto de coste generalizado del transporte, en función del tiempo y la distancia, como variable clave de accesibilidad fue Nichols (1975)[2]. Más tarde, Combes y Lafourcade (2005) presentaron la caracterización más extendida particularizada al caso del transporte de mercancías por carretera. En este trabajo, extendemos y actualizamos su notación para adaptarla a la metodología de números índice, denotando por $GTC_{ij}^{m,n}$ al coste generalizado del transporte entre un origen i y un destino j considerando los costes económicos y la infraestructura existentes en dos periodos m y n (de ahí los dos superíndices, el primero relativo al periodo de referencia para los costes económicos, y el segundo relativo al de la infraestructura, y que pueden referirse al mismo periodo, $m = n$, o distintos periodos, $m \neq n$). Dicho coste generalizado se corresponde con la ruta óptima, que es aquella

[2] Véase Geurs y Ritsema (2001) para una revisión sobre los *GTCs* y otros indicadores de accesibilidad y potencial geográfico de mercado.

que implica el itinerario con menor coste de desplazamiento, $I_{ij}^{m,n*}$, dentro del conjunto de itinerarios existentes (red de transporte en n) I_{ij}^{n}, y que considera todas las variables relevantes que caracterizan la accesibilidad tanto en términos de distancia como de tiempo. Estos itinerarios posibles están calculados para los diferentes tramos o arcos a, que llevan asociados una serie de atributos geofísicos en el periodo n, x_a^n, que son su longitud, d_a^n, tipo de vía, r_a^n, y gradiente o pendiente, g_a^n [3]. A partir de estos dos últimos atributos físicos —tipo de vía y pendiente— se puede calcular la velocidad del tramo, s_a^n, y con ella se determinar a su vez el tiempo que lleva cubrir cada arco, $t_a^n = d_a^n/s_a^n$. Por tanto, las características físicas de cada arco se ven recogidas por las variables de distancia y tiempo asociadas a dicho tramo: d_a^n y t_a^n.

Por otra parte, cada transporte de mercancías realizado por carretera conlleva dos tipos de costes económicos[4]: aquellos relacionados con la distancia que cubre el vehículo y aquellos relacionados con el tiempo que dura dicho transporte —independientemente de la distancia recorrida—. Así, los costes económicos unitarios (precios) relativos a la distancia en el periodo m, medidos en Euro por kilómetro, se denotan e_k^m, e incluyen las siguientes cinco variables: i) combustible: $fuel_i^m$, que se calculan multiplicando el precio del combustible (Euro por litro) por el consumo en cada tramo y que serán diferentes en función del tipo de vía, pendiente y velocidad asociados a cada tramo; ii) peajes: $toll_i^m$, que se obtienen multiplicando el coste unitario (céntimos de Euro por kilómetro) por la longitud del tramo; iii) dietas: $accom\&allow^m$; iv) neumáticos: $tire^m$, y, v) mantenimiento y reparaciones: $rep\&mant^m$. Teniendo en cuenta todos estos costes operativos, el coste asociado a la distancia de un itinerario cualquiera I_{ij}^n será:

$$\begin{aligned} DistC_{ij}^{m,n} &= \sum_{a\in I_{ij}^n}\left(\sum_k e_k^m\right)d_a^n = \\ &= \sum_{a\in I_{ij}^n}\left(fuel_{i,a}^m + toll_{i,a}^m + accom\,\&\,allow^m + tire^m + rep\&mant^m\right)d_a^n. \end{aligned} \tag{1}$$

Análogamente, los costes económicos unitarios (precios) asociados al tiempo en el periodo n, medidos en Euro por hora trabajada, se denotan e_l^m, e incluyen las siguientes seis variables: i) costes laborales asociados al salario bruto del transportista: lab_i^m, que incluye los pagos destinados a la Seguridad Social; ii) costes de amortización: $amort^m$; iii) costes de financiación del vehículo: fin_i^m, suponiendo que este permanece operativo solo un número de horas al año —que dependerán de las características técnicas y otros factores institucionales, como por ejemplo, los tiempos

[3] Zofío *et al.* (2014) distinguen entre siete tipos de vías, r = 1,..,7: autopistas de peaje (r = 1), autovías, carreteras nacionales, autonómicas de primer orden, autonómicas de primer orden y locales.

[4] Esta metodología usa para la asignación de los diferentes conceptos de coste la estructura objetiva de costes ingenieril que propone SPIM (2008). Igualmente se sigue dicha estructura a la hora de elegir aquellos costes relacionados con el tiempo y con la distancia, así como para dejar a un lado las variables de escala o tamaño de la flota de vehículos, que sí incluyen otros trabajos, como los de De Rus *et al.* (1995). Sin embargo, el fenómeno de las economías de escala sí que está incluido en nuestra metodología dentro del concepto de costes indirectos.

obligatorios de conducción y descanso—; iv) seguros, ins^m; v) tasas e impuestos: tax_i^m (que incluyen impuestos de carácter nacional, regional, provincial y municipal); y, por último, vi) costes indirectos: ind_i^m, asociados con otros costes de personal administrativo, gastos corrientes de operación, y costes comerciales, tales como los relativos a actividades de externalización y marketing.

Dado el tiempo de conducción para un tramo: $t_a^n = d_a^n / s_a^n$, los costes económicos en m y la infraestructura viaria existentes en n, los costes totales de tiempo asociados con el trayecto I_{ij}^n serán[5]:

$$\begin{aligned} TimeC_{ij}^{m,n} &= \left(\sum_l e_l^m\right)\left(\sum_{a\in I_{ij}^n} t_a^n\right) = \left(\sum_l e_l^m\right)\left(\sum_{a\in I_{ij}^n} \frac{d_a^n}{s_a^n}\right) = \\ &= \left(lab_i^m + amort^m + fin^m + ins^m + tax_i^m + ind_i^m\right)\left(\sum_{a\in I_{ij}^n} \frac{d_a^n}{s_a^n}\right). \end{aligned} \tag{2}$$

Dados estos dos tipos de costes unitarios, se asume que la empresa de transporte minimiza sus costes de producción del servicio entre i y j, sujeto a las restricciones propias que le impone la tecnología del vehículo en cada momento, y la infraestructura en n. Dicho coste mínimo se corresponde con el itinerario más barato $I_{ij}^{m,n*}$ entre el conjunto de todos los itinerarios posibles I_{ij}^n:

$$\begin{aligned} GTC_{ij}^{m,n} &= \min_{I_{ij}^{m,n}\in \mathbf{I}_{ij}^n}\left(DistC_{ij}^{m,n} + TimeC_{ij}^{m,n}\right) = \\ &= \sum_{a\in I_{ij}^{m,n*}}\left(\sum_k e_k^m\right)d_a^n + \left(\sum_l e_l^m\right)\left(\sum_{a\in I_{ij}^{m,n*}} t_a^n\right), \end{aligned} \tag{3}$$

donde las variables de distancia y tiempo óptimas que solucionan la ecuación (3) corresponden, respectivamente, a $d_{ij}^{m,n*} = \min_{I_{ii}^{m,n}\in \mathbf{I}_{ii}^n}\left(\sum_{a\in I_{ij}^{m,n}} d_a^n\right) = \sum_{a\in I_{ij}^{m,n*}} d_a^n$ y $t_{ij}^{m,n*} = \min_{I_{ij}^{m,n}\in \mathbf{I}_{ij}^n}\left(\sum_{a\in I_{ij}^{m,n}} t_a^n\right) = \sum_{a\in I_{ij}^{m,n*}} t_a^n$. Hay que subrayar que desde el punto de vista de la teoría económica de números índice, estos valores óptimos de accesibilidad dependerán de los costes económicos en cada periodo, por lo que $d_{ij}^{m,n*}$ y $t_{ij}^{m,n*}$ normalmente no coincidirán con los itinerarios más cortos o más rápidos desde el punto de vista meramente geográfico; por ejemplo, la distancia real mínima o el tiempo real míni-

[5] A estos costes relacionados con el tiempo habría que sumarles los costes de carga y descarga de la mercancía, que pueden considerarse como el tiempo destinado a la logística auxiliar de un servicio de transporte: t_{log}^n. Esta variable podría capturar las mejoras organizativas a la hora de optimizar las salidas y llegadas del camión (por ejemplo, a través de centros de logística o coordinación); las mejoras en la propia realización física de la carga y descarga —como aquellas asociadas a la homogeneización intermodal de contenedores (Levinson, 2006)—; o el tiempo real relacionado con problemas de congestión y accidentes de tráfico. Sin embargo, dada la falta de información académica o empresarial creíble sobre el tiempo que han ahorrado estas innovaciones en el caso español durante los últimos años, en este trabajo se omitirán los tiempos de carga y descarga para el cálculo de los GTCs.

mo, que son soluciones dadas a problemas similares de búsqueda de rutas óptimas que no consideran los costes económicos (como, por ejemplo, los sistemas de GPS que llevan instalados los vehículos). Desde una perspectiva empírica los valores óptimos se calculan usando sistemas de información geográfica que incorporan la red de transporte digitalizada, sobre la que se superponen los datos de costes, distancia y tiempo específicos a cada arco, véase Zofío *et al.* (2011).

3. La variación en los costes generalizados de transporte y su descomposición usando la teoría económica de números índices

En el punto anterior se ha definido el coste generalizado del transporte $GTC_{ij}^{m,n}$ como el resultado del comportamiento optimizador de las empresas que tratan de minimizar el coste de transportar una mercancía entre dos puntos. Este supuesto de racionalidad es el que justifica el uso natural de la aproximación de la Teoría Económica a los Números Índice (Diewert, 1993; Fisher y Shell, 1998) a la hora de definir la variación en los $GTC_{ij}^{m,n}$ entre un periodo base t y un periodo de referencia (actual) $t + 1$, y que denotaremos por $\Delta GTC_{ij}^{t,t+1}$. Esta aproximación supone que, dados los precios unitarios relativos a la distancia y al tiempo en los que incurre la empresa de transporte en el periodo m, la elección del itinerario óptimo basado en estas variables de decisión es la solución del problema de minimización de costes presentado. Desde este punto de vista, la empresa demandará determinados tramos que conforman el itinerario óptimo y, por tanto, la red de transporte viario puede considerarse como la infraestructura —o tecnología— disponible para producir ese servicio de transporte. Como resultado, al analizar los *GTCs*, suponemos que el conjunto de precios económicos unitarios (e_k^m, e_l^m) y las variables de accesibilidad (t_a^n, d_a^n) en los periodos base y actual serán *interdependientes* ya que la empresa demanda el itinerario óptimo dados esos precios —en contraposición a la aproximación axiomática de los números índice que supone que ambos conjuntos de variables son independientes—. Considerando este hecho, la variación en los costes generalizados de transporte entre dos periodos consecutivos de tiempo $t = 0$, y $t + 1 = 1$: $\Delta GTC_{ij}^{t,t+1} = \Delta GTC_{ij}^{0,1}$, se define como el siguiente índice agregado de valor que compara los costes del servicio de transporte entre ambos periodos[6]:

$$\Delta GTC_{ij}^{0,1} = \frac{GTC_{ij}^{1,1}}{GTC_{ij}^{0,0}} = \frac{\min_{I_{ij}^{1,1} \in \mathbf{I}_{ij}^{1}} \left(DistC_{ij}^{1,1} + TimeC_{ij}^{1,1} \right)}{\min_{I_{ij}^{0,0} \in \mathbf{I}_{ij}^{0}} \left(DistC_{ij}^{0,0} + TimeC_{ij}^{0,0} \right)}, \tag{4}$$

donde el numerador y el denominador se corresponden con los costes generalizados del transporte en el periodo de referencia y el base: $GTC_{ij}^{1,1}$ (m=n=1) y $GTC_{ij}^{0,1}$

[6] Véase también FMI (2004) para una revisión del uso de números índice en contextos de funciones de producción y costes. Diewert (2004), por su parte, repasa las perspectivas presentes y futuras en la investigación de números índice.

(m=n=0). Como este índice incorpora información relativa al cambio tanto en variables de tipo económico (precios unitarios) como de tipo físico (infraestructuras), el problema que surge es cómo descomponer de una manera adecuada la variación agregada con el fin de identificar la contribución de cada uno de estos elementos a dicha variación. La solución a este problema reside en un índice de precios que incluye el cambio en los costes económicos relativos a la distancia e_k^m, y el tiempo e_l^m; y su correspondiente *índice de volumen* (*cantidades*) que representará el cambio en las variables óptimas de accesibilidad: distancia $d_a^{m,n*}$ y tiempo $t_a^{m,n*}$, correspondientes al itinerario de coste mínimo.

Con el objetivo de identificar las fuentes que dan lugar a la variación en los *GTCs*, utilizaremos el índice que Könus (1924) definió para calcular el verdadero índice de coste de producción. Con los supuestos anteriormente expuestos, esto nos permitirá comparar el coste mínimo de unir un origen i y un destino j teniendo en cuenta los precios unitarios de los periodos base y actual, pero sin variar la infraestructura o red viaria de referencia. Considerando la red de infraestructuras del año base $n = 0$, el siguiente índice de *precios Laspeyres-Könus* representa el cambio en las variables económicas de la siguiente forma:

$$EC_{ij}^{0} = \frac{GTC_{ij}^{1,0}}{GTC_{ij}^{0,0}} = \frac{\min\limits_{I_{ij}^{1,0}\in \mathbf{I}_{ij}^{0}}\left(DistC_{ij}^{1,0} + TimeC_{ij}^{1,0}\right)}{\min\limits_{I_{ij}^{0,0}\in \mathbf{I}_{ij}^{0}}\left(DistC_{ij}^{0,0} + TimeC_{ij}^{0,0}\right)}, \tag{5}$$

donde el denominador corresponde a la ecuación (3) mientras que el numerador representa el hipotético coste generalizado del transporte $GTC_{ij}^{1,0}$ que se obtendría para aquella empresa que soportara los precios unitarios del periodo $m = 1$, e_k^1 y e_l^1, y usase la infraestructura existente en el periodo base $n = 0$:

$$\begin{gathered} DistC_{ij}^{1,0} = \sum_{a\in I_{ij}^{0}}\left(\sum_{l} e_l^1\right) d_a^0 = \\ = \sum_{a\in I_{ij}^{0}}\left(fuel_{i,a}^1 + toll_{i,a}^1 + accom\,\&\,allow^1 + tire^1 + rep\&mant^1\right) d_a^0, \text{ y} \end{gathered} \tag{6}$$

$$\begin{gathered} TimeC_{ij}^{1,0} = \left(\sum_{k} e_k^1\right)\left(\sum_{a\in I_{ij}^{0}} t_a^0\right) = \left(\sum_{k} e_k^1\right)\left(\sum_{a\in I_{ij}^{0}} \frac{d_a^0}{s_a^0}\right) = \\ = \left(lab_i^1 + amort^1 + fin^1 + ins^1 + tax_i^1 + ind_i^1\right)\left(\sum_{a\in I_{ij}^{0}} \frac{d_a^0}{s_a^0}\right). \end{gathered} \tag{7}$$

De forma que:

$$GTC_{ij}^{1,0} = \min_{I_{ij}^{1,0}\in \mathbf{I}_{ij}^{0}}\left(DistC_{ij}^{1,0} + TimeC_{ij}^{1,0}\right) = \sum_{a\in I_{ij}^{1,0*}}\left(\sum_{k} e_k^1\right) d_a^0 + \left(\sum_{l} e_l^1\right)\left(\sum_{a\in I_{ij}^{1,0*}} t_a^0\right). \tag{8}$$

Si $EC_{ij}^{0} < 1$, significaría que estamos ante un proceso deflacionario en los costes económicos. Por el contrario, si $EC_{ij}^{0} > 1$ indicará su incremento, mientras que si $EC_{ij}^{0} = 1$ no habrá variación en los costes agregados entre el periodo base y el actual. Es necesario subrayar, por un lado, que las distancias y tiempos óptimos correspondientes a los itinerarios más baratos podrían no ser los mismos en ambos periodos. En ese caso, $I_{ij}^{0,0*} \neq I_{ij}^{1,0*}$ con $d_{ij}^{0,0*} = \sum_{a \in I_{ij}^{0,0*}} d_a^0 \neq d_{ij}^{1,0*} = \sum_{a \in I_{ij}^{1,0*}} d_a^0$ y $t_{ij}^{0,0*} = \sum_{a \in I_{ij}^{0,0*}} t_a^0 \neq t_{ij}^{1,0*} = \sum_{a \in I_{ij}^{0,1*}} t_a^0$. Es evidente que un cambio en los precios unitarios podría alterar el itinerario óptimo de la empresa, optando así por una ruta alternativa. Por ejemplo, si el precio del peaje es menor en $m = 1$, la empresa podría demandar un tramo de peaje que no era demandado con los precios iniciales de periodo base. Por otro lado, si el itinerario de mínimo coste no variase entre los dos periodos de referencia: $I_{ij}^{0,0*} = I_{ij}^{1,0*}$, entonces los volúmenes de tiempo y distancia no variarían tampoco; y el índice de precios correspondería, precisamente, a la formulación del índice de Laspeyres (1871) que utiliza los volúmenes del periodo base como referencia para estimar la variación en los precios: $EC_{ij}^{0} = EC_{ij}^{L}$.

Como nuestro objetivo es descomponer la variación del coste generalizado del transporte $\Delta GTC_{ij}^{0,1}$ en un índice de precios y otro de volúmenes, una vez obtenido EC_{ij}^{0} podemos calcular implícitamente el índice de volumen *Paasche-Könus* asociado al anterior usando únicamente la regla del producto. Si denominamos este número como el índice de la variación en las infraestructuras IC_{ij}^{1}, tendremos:

$$\Delta GTC_{ij}^{0,1} = \frac{GTC_{ij}^{1,1}}{GTC_{ij}^{0,0}} = EC_{ij}^{0} \cdot IC_{ij}^{1} = \frac{GTC_{ij}^{1,0}}{GTC_{ij}^{0,0}} \cdot IC_{ij}^{1}. \tag{9}$$

Y, por tanto:

$$\begin{aligned} IC_{ij}^{1} = \Delta GTC_{ij}^{0,1} / EC_{ij}^{0} = \frac{GTC_{ij}^{1,1}}{GTC_{ij}^{0,0}} / \frac{GTC_{ij}^{1,0}}{GTC_{ij}^{0,0}} = \frac{GTC_{ij}^{1,1}}{GTC_{ij}^{1,0}} = \\ = \frac{\min\limits_{I_{ij}^{1,1} \in \mathbf{I}_{ij}^{1}} \left(DistC_{ij}^{1,1} + TimeC_{ij}^{1,1} \right)}{\min\limits_{I_{ij}^{1,0} \in \mathbf{I}_{ij}^{0}} \left(DistC_{ij}^{1,0} + TimeC_{ij}^{1,0} \right)} \end{aligned} \tag{10}$$

El índice IC_{ij}^{1} recoge la variación en los volúmenes o cantidades relativas a las infraestructuras (distancia y tiempo) tomando como referencia los precios económicos del año base y actualizando o introduciendo los cambios en la red de carreteras. En contraposición al índice EC_{ij}^{0}, la ecuación (10) puede considerarse como un índice de volumen que mide el crecimiento de la productividad como resultado de un aumento en la accesibilidad aproximada a través de reducciones en la distancia y el tiempo entre i y j , ocasionadas por las mejoras en las infraestructuras. Por esta razón, normalmente es de esperar que $IC_{ij}^{1} < 1$, por lo que este componente contribuye a una reducción en los *GTCs* gracias a las mejoras en la red de transporte. Por el contrario, $IC_{ij}^{1} > 1$ indicaría un incremento en los costes del transporte causado por un deterioro en las infraestructuras (como puede esperarse en regiones o países donde no se lleve a cabo un correcto mantenimiento de la red de carreteras). Por último, un valor de $IC_{ij}^{1} = 1$ se obtendría cuando no hay cambios en la red de transporte por lo que no hay ninguna variación en el itinerario de mínimo coste, y la distancia y tiempo óptimos asociados al mismo: $I_{ij}^{1,1*} = I_{ij}^{1,0*}$, por lo que en ese caso $EC_{ij}^{0} = \Delta GTC_{ij}^{0,1}$.

De manera análoga al índice de precios (5) podemos definir el índice de precios *Paasche-Könus* que se obtendría al considerar la red de infraestructuras del periodo actual 1,

$$EC_{ij}^{1} = GTC_{ij}^{1,1} \;/\; GTC_{ij}^{0,1} = \min_{I_{ij}^{1,1} \in \mathbf{I}_{ij}^{1}} \left(DistC_{ij}^{1,1} + TimeC_{ij}^{1,1} \right) \;/\; \min_{I_{ij}^{0,1} \in \mathbf{I}_{ij}^{1}} \left(DistC_{ij}^{0,1} + TimeC_{ij}^{0,1} \right),$$

con la misma estructura, valores e interpretación que, pero con los siguientes costes de distancia y tiempo: $DistC_{ij}^{0,1}$ y $TimeC_{ij}^{0,1}$, que intercambian los periodos de referencia para los precios económicos unitarios y las variables relativas a las infraestructuras. En este caso, si el itinerario óptimo con la red del periodo actual permanece constante cuando cambian los precios económicos, entonces $I_{ij}^{1,1*} = I_{ij}^{1,0*}$, y EC_{ij}^{1} adopta la forma del índice de precios de *Paasche* (1874): $EC_{ij}^{1} = EC_{ij}^{P}$ [7]. Dado este índice de precios, usando una descomposición análoga a la ecuación (9): $GTC_{ij}^{0,1} = GTC_{ij}^{1,1} \;/\; GTC_{ij}^{0,0} = EC_{ij}^{1} \cdot IC_{ij}^{0} = \left(GTC_{ij}^{1,1} \;/\; GTC_{ij}^{0,1} \right) \cdot IC_{ij}^{0}$, queda definido implícitamente el índice de volumen de *Laspeyres-Konüs*, que utiliza los precios del año base, obteniendo $IC_{ij}^{0} = \left(GTC_{ij}^{1,1} \;/\; GTC_{ij}^{0,0} \right) \;/\; \left(GTC_{ij}^{1,1} \;/\; GTC_{ij}^{0,1} \right) = GTC_{ij}^{0,1} \;/\; GTC_{ij}^{0,0} =$ $= \min_{I_{ij}^{0,1} \in \mathbf{I}_{ij}^{1}} \left(DistC_{ij}^{0,1} + TimeC_{ij}^{0,1} \right) \;/\; \min_{I_{ij}^{0,0} \in \mathbf{I}_{ij}^{0}} \left(DistC_{ij}^{0,0} + TimeC_{ij}^{0,0} \right)$. Como en el caso de IC_{ij}^{1}, cuando las variaciones en las infraestructuras no afectan al itinerario óptimo, $I_{ij}^{0,1*} = I_{ij}^{0,0*}$, $IC_{ij}^{0} = 1$, y $EC_{ij}^{1} = \Delta GTC_{ij}^{0,1}$.

Es importante subrayar que la metodología aquí presentada es indiferente a qué índices se calculen en primer lugar y cuáles se deriven implícitamente. Daría igual partir de la definición de los índices de precios *Laspeyres-Konüs* y *Paasche-Konüs* EC_{ij}^{0} y EC_{ij}^{1}, y obtener sus índices de volumen implícitos IC_{ij}^{1} y IC_{ij}^{0}, o comenzar definiendo estos índices de volumen y, posteriormente, obtener sus índices de precios asociados: $EC_{ij}^{0} = \Delta GTC_{ij}^{0,1}/IC_{ij}^{1}$ y $EC_{ij}^{1} = \Delta GTC_{ij}^{0,1}/IC_{ij}^{0}$. Operativamente, este procedimiento alternativo lleva a los mismos resultados pero representan formas alternativas de obtener los componentes económicos y de infraestructuras en los que puede descomponerse la variación de los *GTCs*.

Los resultados anteriores muestran que existen dos vías alternativas para descomponer las variaciones en los *GTCs* dependiendo de cuáles sean los índices de precios y volúmenes elegidos. Como resultado, en función de los diferentes periodos de referencia tomados para los índices de variación en los costes económicos y la red de infraestructuras, obtendríamos dos valores distintos para la contribución de estos dos factores explicativos del cambio en los costes del transporte. Por esta razón, el siguiente paso es considerar una descomposición de $\Delta GTC_{ij}^{0,1}$ que no tome ningún

[7] Könus (1924: 20-21) demuestra que los índices de precios de Laspeyres y Paasche representan, respectivamente, los límites inferior y superior del índice verdadero.

periodo de referencia en particular, sino que incluya ambos de manera simétrica, *a la* Fisher, tomando su media geométrica:

$$\begin{aligned}\Delta GTC_{ij}^{0,1} = GTC_{ij}^{1,1} / GTC_{ij}^{0,0} = \left[\left(EC_{ij}^{0} \cdot IC_{ij}^{1}\right) \cdot \left(EC_{ij}^{1} \cdot IC_{ij}^{0}\right)\right]^{1/2} = \\ = \left(EC_{ij}^{0} \cdot EC_{ij}^{1}\right)^{1/2} \left(IC_{ij}^{0} \cdot IC_{ij}^{1}\right)^{1/2} = EC_{ij}^{0,1} \cdot IC_{ij}^{0,1}.\end{aligned} \tag{11}$$

Para finalizar con esta nota metodológica es necesario volver a la aproximación axiomática de los números índice y subrayar una propiedad fundamental que cumplen los indicadores aquí presentados para su uso en series temporales. Se dice que un índice cumple la propiedad transitiva (o el test de circularidad) cuando es posible descomponer consistentemente sus variaciones temporales entre dos periodos cualesquiera en subperiodos consecutivos.

Todos los índices propuestos en este trabajo satisfacen dicha propiedad y, por tanto, dado una secuencia temporal: $t = 0, 1, 2$, se cumple que $\Delta GTC_{ij}^{0,2} = \Delta GTC_{ij}^{0,1} \cdot \Delta GTC_{ij}^{1,2}$. Centrándonos en la definición inicial de la ecuación (4) y la descomposición asociada presentada en la ecuación (11) se cumple que, dado una secuencia de T periodos, $t = 0,...T$, es posible descomponer los cambios en los *GTCs* entre el primer y último periodo en cualquier subperiodo posible usando cualquiera de las alternativas disponibles:

$$\begin{aligned}\Delta GTC_{ij}^{0,T} = \frac{GTC_{ij}^{T,T}}{GTC_{ij}^{0,0}} = \Delta GTC_{ij}^{0,t} \cdot \Delta GTC_{ij}^{t,T} = \frac{GTC_{ij}^{t,t}}{GTC_{ij}^{0,0}} \cdot \frac{GTC_{ij}^{T,T}}{GTC_{ij}^{t,t}} = \\ = \left(EC_{ij}^{0} \cdot IC_{ij}^{t}\right)\left(EC_{ij}^{t} \cdot IC_{ij}^{T}\right) = \left(EC_{ij}^{t} \cdot IC_{ij}^{0}\right)\left(EC_{ij}^{T} \cdot IC_{ij}^{t}\right) = \\ = \left[\left(EC_{ij}^{0} \cdot EC_{ij}^{t}\right)^{1/2} \left(IC_{ij}^{0} \cdot IC_{ij}^{t}\right)^{1/2}\right]\left[\left(EC_{ij}^{t} \cdot EC_{ij}^{T}\right)^{1/2} \left(IC_{ij}^{t} \cdot IC_{ij}^{T}\right)^{1/2}\right] = \\ = \left(EC_{ij}^{0,t} \cdot IC_{ij}^{0,t}\right)\left(EC_{ij}^{t,T} \cdot IC_{ij}^{t,t}\right).\end{aligned} \tag{12}$$

A partir de esta expresión podemos obtener cualquier cambio en el *GTC* entre un periodo intermedio y el año final simplemente dividiendo por los índices correspondientes a dicho periodo intermedio,

$$\begin{aligned}\Delta CGT_{ij}^{t,T} = \frac{CGT_{ij}^{T,T}}{CGT_{ij}^{t,t}} = \frac{CGT_{ij}^{T,T} / CGT_{ij}^{0,0}}{CGT_{ij}^{t,t} / CGT_{ij}^{0,0}} = \left[\left(EC_{ij}^{t} \cdot IC_{ij}^{T}\right)\left(EC_{ij}^{T} \cdot IC_{ij}^{t}\right)\right]^{1/2} = \\ = \left(EC_{ij}^{t} \cdot EC_{ij}^{T}\right)^{1/2} \left(IC_{ij}^{t} \cdot IC_{ij}^{T}\right)^{1/2} = EC_{ij}^{t,T} \cdot IC_{ij}^{t,T}.\end{aligned} \tag{13}$$

Es decir, se puede obtener una cadena de $\Delta GTC_{ij}^{t,T}$ para la variación del *GTCs* que verifica la propiedad transitiva para el periodo completo: $\Delta GTC_{ij}^{0,T} = \Delta GTC_{ij}^{0,t} \cdot \Delta GTC_{ij}^{t,T}$. Más aún, como estas ecuaciones pueden generalizarse para cualquiera par de superiodos intermedios, también podríamos calcular la variación acumulada del

GTCs entre los periodos t y $t + k$, cuya definición sería (si $k = 1$ obtendríamos variaciones interanuales):

$$\begin{aligned}
\Delta GTC_{ij}^{t,t+k} &= \frac{GTC_{ij}^{t+k,t+k}}{GTC_{ij}^{t,t}} = \frac{GTC_{ij}^{t+k,t+k} \,/\, GTC_{ij}^{0,0}}{GTC_{ij}^{t,t} \,/\, GTC_{ij}^{0,0}} = \\
&= \left[\left(EC_{ij}^{t} \cdot IC_{ij}^{t+k}\right)\left(EC_{ij}^{t+k} \cdot IC_{ij}^{t}\right)\right]^{1/2} = \\
&= \left(EC_{ij}^{t} \cdot EC_{ij}^{t+k}\right)^{1/2}\left(IC_{ij}^{t} \cdot IC_{ij}^{t+k}\right)^{1/2} = EC_{ij}^{t,t+k} \cdot IC_{ij}^{t,t+k}.
\end{aligned} \tag{14}$$

3. Conclusión

La novedosa metodología aquí presentada para descomponer las variaciones de los costes generalizados del transporte usando la teoría económica de los números índice supone un evidente valor añadido con respecto a propuestas anteriores que, de forma errónea, aplicaban otras técnicas alternativas como, por ejemplo, dada su popularidad, el análisis *shift-share*. El uso de estas técnicas produce sesgos evidentes en las componentes de precios e infraestructuras como consecuencia de ignorar el comportamiento optimizador de los agentes. En concreto, este sesgo se corresponde con la diferencia que existe entre los índices verdaderos de Könus, y los tradicionales de Laspeyres y Paasche. A la vista de esta realidad, resulta necesario preguntarse por la precisión de los resultados obtenidos hasta la fecha por los estudios que han investigado la variación de los costes del transporte y sus posibles causas. Particularmente en lo relativo al transporte de mercancías o pasajeros por carretera[8]. En general, la exactitud y potencial analítico de esta metodología, tanto desde el punto de vista teórico como empírico, aconsejan su adopción en cualquier estudio que persiga una correcta definición y cálculo de la variación de los costes de transporte en el tiempo.

Finalmente, uno de los puntos fuertes de esta nueva metodología es su posible aplicación a diversos campos de investigación, tanto desde el punto de vista geográfico como económico. Alguna de estas posibles aplicaciones de los costes generalizados del transporte estimados mediante números índice serían, entre otras: su inclusión en los modelos gravitacionales; la mejoría en el cálculo de indicadores de localización y mercado potencial en modelos de geografía económica; su inclusión en modelos y marcos de actuación política donde se necesite un coste real de distancia; uso en modelos de elección modal discreta de itinerarios; comparaciones entre diferentes modalidades de transporte (por ejemplo, público y privado, o entre vías libres o con peajes); o el análisis de políticas de fomento de infraestructuras y de cohesión regional.

[8] Aunque la metodología introducida en este artículo se refiere únicamente al transporte de mercancías por carretera, si el lector quiere ver algunas aproximaciones hechas para otro tipo de transportes, como el de pasajeros por carretera, puede acudir a los informes y resultados obtenidos a lo largo del proyecto DESTINO (*http://www.proyectodestino.es/*).

Bibliografía

Banco Mundial (2009). *Reshaping Economic Geography*, Washington DC: The World Bank.

Combes, P. P., y Lafourcade, M. (2005): «Transport Costs: Measures, Determinants, and Regional Policy Implications for France», *Economic Geography*, 5 (3), 319-49.

De Rus, G.; López, F., y F. Rodríguez (1995): «Costes y eficiencia en el transporte público de viajeros», *Revista de Economía Aplicada*, 3 (9), 91-104.

Diewert, E. W. (1993): «The Economic Theory of Index Numbers: A Survey», en Diewert, E. W., y Nakamura, A. O. (eds.), *Essays in Index Number Theory*, vol. 1, 177-207. Elsevier, Amsterdam.

— (2004): Index Number Theory: Past Progress and Future Challenges, Mimeo, University of British Columbia, Canada. (*http://www.econ.ubc.ca/diewert/concepts.pdf*).

Fisher, F. (1922): The making of index numbers. A study of their varieties, tests and reliability, Houghton Mifflin Co., Nueva York.

Fisher, F. y Shell, K. (1998): *Economic Analysis of Production Price Indexes*, Cambridge University Preess, Cambridge, U.K.

FMI (2004): *Producer Price Index Manual. Theory and Practice*, International Monetary Fund, Washington DC, USA (*http://www.imf.org/external/np/sta/tegppi/index.htm*).

Geurs, K. T., y Ritsema van Eck, J. R. (2001): «Accessibility measures: review and applications», *RIVM report* 408505 006, Urban Research Centre, Utrecht University, Utrecht.

Glaeser, E., y Kohlhase, J. (2003): «Cities, regions and the decline of transport costs», *Papers in Regional Science*, 83 (1), 197-228.

Könus, A. A. (1924): «The problem of the true index of the cost of living». *Econometrica*, 7, 10-29.

Laspeyres, E. (1871): «Die Berechnung einer mittleren Waarenpreissteigerung», *Jahrbücher für Nationalökonomie und Statistik*, 16, 296-315.

Levinson, M. (2006): *The Box: How the Shipping Container Made the World Smaller and the World Economy Bigger*, Princeton University Press, Princeton, N. J.

Nichols, A. J. (1975): «Standard generalized cost parameters for modeling interurban traffic and evaluating interurban road schemes», *Note* 255, Mathematical Advisory Unit, Department of the Environment, London.

SPIM (2008): *Estudio de costes del transporte de mercancías por carretera*, Ministerio de Fomento, Madrid.

Zofío, J. L.; Condeço-Melhorado, A. M.; Maroto, A., y Gutiérrez, J. (2014): «Generalized transport costs and index numbers: A geographical analysis of economic and infrastructure fundamentals», *Transportation Research Part A, Policy & Practice*, 67, 141-157.