



# Gravedad para estudiantes universitarios

Yoto V. Yotov

Traducido al español por:  
Federico Carril-Caccia  
Jordi Paniagua



DREXEL UNIVERSITY

Center for

**Global Policy Analysis**

*LeBow College of Business*

Los documentos de trabajo del CGPA (Center for Global Policy Analysis por sus siglas en inglés) se distribuyen con fines de debate y comentario. No han sido revisados por pares ni sometidos a la revisión de la Junta del CGPA. El CGPA no se responsabiliza del contenido ni de la corrección de los documentos de esta serie.

---

## Al Docente

Gracias por utilizar este capítulo en su curso. He dedicado mucho tiempo y esfuerzo a escribir el capítulo, y espero que sea útil. El capítulo, los datos y códigos para el análisis práctico, y las preguntas de práctica y sus soluciones son bienes públicos gratuitos. Sin embargo, tenga en cuenta lo siguiente:

- Pida a sus alumnos que descarguen el capítulo, junto con los datos y los códigos, directamente de este sitio web [https://yotoyotov.com/Gravity\\_Undergrads.html](https://yotoyotov.com/Gravity_Undergrads.html). Esto me ayudará a hacer un seguimiento de su impacto y a determinar si merece la pena continuar con este esfuerzo.
- Si tiene alguna duda o detecta incoherencias, erratas o errores en el capítulo o en los datos y códigos que lo acompañan, no dude en comunicármelo. Las sugerencias para mejorar el capítulo y hacerlo más útil son siempre bienvenidas en [yotov@drexel.edu](mailto:yotov@drexel.edu).
- Envíeme un correo electrónico a [yotov@drexel.edu](mailto:yotov@drexel.edu) si desea obtener las soluciones a los ejercicios que se incluyen al final del capítulo.
- Por último, anime a sus alumnos a citar correctamente el capítulo si lo utilizan para proyectos de investigación.

## Sobre el equipo



Este capítulo combina mis dos mayores pasiones profesionales: mi amor por la enseñanza y mi dedicación al modelo de gravedad del comercio. Como tal, considero este capítulo una de mis contribuciones más valiosas y espero que sea útil para muchos estudiantes de grado/licenciatura, máster y otras personas que puedan beneficiarse de una introducción al modelo de gravedad del comercio.

Decidí hacer el doctorado por la enseñanza y la gravedad, y he dedicado mi carrera al modelo de gravedad del comercio. He hecho muchas contribuciones al modelo de gravedad, incluido el desarrollo de modelos teóricos, técnicas de estimación, métodos de cálculo y la construcción de bases de datos útiles para la estimación de modelos de gravedad. Mis trabajos sobre la gravedad se han publicado en prestigiosas revistas académicas y he utilizado el modelo

de gravedad para asesorar y prestar servicios de consultoría a muchas organizaciones internacionales, gobiernos y centros de estudios.

Tal vez lo más importante en relación al presente capítulo sea que he enseñado muchas veces el modelo de la gravedad a cientos de estudiantes, investigadores y responsables de formular políticas económicas de más de 130 países. También he supervisado trabajos de investigación realizados por estudiantes cuyo eje es el modelo de gravedad, lo que me ha convencido de que el modelo de gravedad es realmente accesible y puede ser útil para los estudiantes universitarios. Considero que este capítulo es una oportunidad única para incorporar metodologías avanzadas y herramientas útiles para el análisis de políticas económicas en la docencia de grado/licenciatura, y para mí ha sido un privilegio escribirlo.



Federico Carril Caccia es profesor en la Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales de la Universidad de Granada (España). En sus trabajos aplica modelos de gravedad para explicar los flujos bilaterales entre países. Su investigación se centra concretamente en el análisis de los determinantes de los flujos de inversión extranjera directa, las migraciones y el turismo internacional. Utilizando el modelo de gravedad, ha aportado evidencia sobre el impacto de distintas políticas económicas —como los acuerdos comerciales, los tratados de inversión, la política medioambiental, el Brexit o las sanciones internacionales— sobre la inversión extranjera directa. También ha analizado el papel de las instituciones, la violencia y las crisis alimentarias en los flujos migratorios y de inversión. Su trabajo ha sido publicado en diversas revistas académicas de prestigio.



Jordi Paniagua es ingeniero de telecomunicaciones, así como licenciado y doctor en Economía. Jordi es Catedrático del Departamento de Estructura Económica en la Universitat de Valencia y Distinguished Research Affiliate en el Kellogg Institute de la Universidad de Notre Dame. Su investigación académica se centra en modelos de gravedad de inversión extranjera, comercio y migración, con un enfoque en políticas públicas y ha sido publicada en revistas internacionales de economía y empresa. Su labor de consultoría ha resultado relevantes para diversas instituciones que promueven el crecimiento económico y la reforma institucional, como la OTAN, el Banco Mundial, el Banco Asiático de Desarrollo, UNCITRAL, UNIDROIT, USITC y el Fondo Monetario Internacional.

---

## Agradecimientos y descargo de responsabilidad

Estoy muy agradecido a muchos colegas y amigos que han contribuido directa e indirectamente a este capítulo, entre ellos Delina Agnosteva, James Anderson, Scott Baier, Richard Baldwin, Richard Barnett, Jeff Bergstrand, Cosimo Beverelli, Ingo Borchert, Sebastien Bradley, Federico Carril-Caccia, Carsten Eckel, Peter Egger, Gabriel Felbermayr, Lisandra Flach, Javier Florez, Lionel Fontagne, Rebecca Freeman, Gene Grossman, Jean Grossman, James Harrigan, Beno Heid, Inga Heiland, Julian Hinz, Peter Herman, Paul Ko, Ohyun Kwon, Mario Larch, Maia Linask, Jeff Luckstead, Martina Magli, Inma Martinez-Zarzoso, Xenia Matschke, Jose Antonio Monteiro, Arne Nagengast, Sergei Nigai, Kevin O'Rourke, Jordi Paniagua, Blake Peters, Roberta Piermartini, Ray Riezman, Fernando Rios-Avila, Ana Maria Santacreu, Mauricio Sepulveda, Serge Shikher, João Santos Silva, Bob Staiger, Costas Syropoulos, Angelos Theodorakopoulos, Farid Toubal, Joschka Wanner, Erdal Yalcin, Jangsu Yoon y Tom Zylkin. Un agradecimiento muy especial a Blaize Giangulio por su valiosa ayuda en todos los aspectos de este capítulo. Agradezco el apoyo y el estímulo del Center for Global Policy Analysis de la Universidad de Drexel. En consonancia con la mayoría de los libros de texto de grado/licenciatura, he mantenido bajo el número de referencias. No obstante, a lo largo del capítulo remito al lector o lectora a algunos documentos y estudios clave. Asumo la plena responsabilidad de todas las afirmaciones y errores.

**Estoy muy agradecido a los profesores Federico Carril-Caccia y Jordi Paniagua por ofrecerse voluntariamente a traducir el capítulo al español, y espero que esto beneficie a muchos estudiantes de habla hispana.**

# Gravedad para estudiantes universitarios

La ecuación de gravedad es el modelo de referencia en comercio internacional y la herramienta más popular para el análisis de la política comercial. Por ejemplo, todos los análisis cuantitativos de los aranceles del presidente de Estados Unidos, Donald Trump, a principios de 2025, los efectos del BREXIT y el impacto de las sanciones comerciales a Rusia tras su invasión de Ucrania, de los que se hicieron eco ampliamente los medios de comunicación populares, se obtuvieron a partir de versiones del modelo de gravedad. Así pues, no es de extrañar que la ecuación de la gravedad sea quizá el único modelo empírico que ha aparecido en la portada del Financial Times (véase la Figura 1).

Figura 1: La Ecuación de Gravedad en el Financial Times



Fuente: The Financial Times, 19 de abril de 2016. Inspirado en el discurso presidencial de la FER de 2019 de Peter Neary

Las principales razones tras la popularidad de la que goza la ecuación de la gravedad son que: (i) tiene un poder predictivo inigualable, (ii) cuenta con sólidos fundamentos teóricos, (iii) es muy intuitiva y accesible para diversos públicos, incluidos los estudiantes universitarios, y (iv) su implementación empírica es sencilla y permite analizar una amplia variedad de aplicaciones de política económica. Sin embargo, a pesar de sus sólidos fundamentos teóricos, de su notable éxito empírico, así como de su carácter intuitivo y su facilidad de aplicación, la ecuación de gravedad no ha recibido la atención que merece en los libros de texto de comercio internacional dirigidos a estudiantes universitarios. Para subsanar esta carencia, los principales objetivos de este capítulo son:

- En la sección 1, presentar el modelo de gravedad del comercio al estudiante universitario. Más concretamente, explicar por qué y cómo el modelo de gravedad puede ser de ayuda para los estudiantes. Asimismo, describir las propiedades que han hecho que este modelo sea tan popular y tenga tanto éxito.
- En la sección 2, se pretende proporcionar una motivación teórica para la ecuación de la gravedad en su forma más básica ('naive'), transformarla en un modelo de gravedad estructural y, por último, destacar las importantes implicaciones de la teoría del modelo de gravedad para las aplicaciones y estimaciones.
- En la siguiente sección, sección 3, se busca traducir la ecuación teórica de la gravedad en un modelo econométrico, señalar los principales retos econométricos de las estimaciones del modelo, así como, sintetizar diferentes recomendaciones intuitivas y fáciles de aplicar para las estimaciones del modelo de gravedad.

- Finalmente, la sección 4 y una serie de actividades prácticas incluidas al final del presente capítulo, tienen como objetivo ofrecer análisis prácticos con datos reales y códigos sencillos, proporcionar actividades de práctica, orientación y datos adicionales que pueden ser útiles para proyectos empíricos, en clases de econometría y seminarios, así como en trabajos de fin de grado.

## 1. El modelo de gravedad. ¿Por qué estudiarlo? ¿Por qué es tan popular?

En respuesta a las cuestiones planteadas por otros profesores, basándome en los comentarios de estudiantes universitarios que han sido expuestos al modelo de gravedad del comercio y en consonancia con mi propia experiencia docente y de consultoría, creo firmemente que el modelo de gravedad puede y debe enseñarse a los estudiantes universitarios. El siguiente recuadro ofrece una lista de razones por las que el modelo de gravedad debería incluirse en los cursos de grado/licenciatura y cómo y por qué puede ser de utilidad para los estudiantes de grados universitarios.

### Recuadro 1. ¿Por qué estudiar el modelo de gravedad y qué utilidad tiene para los estudiantes universitarios?

- El modelo de gravedad del comercio predice con precisión los flujos comerciales y se utiliza en el ámbito académico y de política económica más que cualquiera de los modelos estándar incluidos en los libros de texto sobre comercio internacional.
- El modelo de gravedad puede utilizarse para complementar y reforzar las teorías clásicas del comercio, ya que la ecuación empírica de gravedad permite a los estudiantes comprobar empíricamente algunas de estas teorías.
- El modelo de gravedad tiene unos usos prácticos y muchas aplicaciones. Es un modelo empírico que trata los costes comerciales con seriedad y realismo, y puede aplicarse fácilmente con datos reales, enriqueciendo, de este modo, las clases universitarias con una fuerte carga teórica que giren en torno al comercio internacional.
- Por su atractivo intuitivo y su sencilla representación teórica, el modelo de gravedad es accesible y fácil de entender para un público amplio, incluidos los estudiantes universitarios.
- Gracias a los recientes avances econométricos y computacionales, la aplicación de un modelo empírico de gravedad de vanguardia es posible con conocimientos muy básicos de econometría (por ejemplo, utilizando mínimos cuadrados ordinarios (MCO) y efectos fijos). Para facilitar esta tarea, el capítulo incluye datos reales, códigos econométricos, análisis prácticos y cuestiones de política económica.
- El modelo de gravedad puede ser de gran utilidad para los estudiantes más allá del comercio. En concreto, la intuición y las herramientas empíricas de este capítulo pueden aplicarse directamente a los flujos migratorios bilaterales, la inversión extranjera directa (IED), las patentes transfronterizas, etc.
- Además de ser apropiado para una asignatura de comercio internacional de grado/licenciatura, el modelo de gravedad puede ser útil también en asignaturas de econometría, seminarios y para estudiantes que deseen realizar un trabajo de fin de grado o proyectos de investigación.

**El modelo de gravedad del comercio** La ecuación de gravedad del comercio internacional predice que los flujos comerciales bilaterales ( $X_{ij}$ ) entre dos países, es decir, las importaciones del país  $j$  desde el país  $i$ , deberían ser proporcionales al producto del tamaño del exportador ( $Y_i$ ) y del importador ( $Y_j$ ), e inversamente proporcionales a las fricciones comerciales bilaterales ( $T_{ij}$ ) entre los dos países:

$$X_{ij} = \tilde{G} \frac{Y_i Y_j}{T_{ij}^\theta}, \quad (1)$$

donde  $\tilde{G}$  es la constante gravitacional del comercio y  $\theta$  es la elasticidad de los flujos comerciales con respecto a las fricciones comerciales, la cual captura la sensibilidad de los flujos comerciales ante cambios en dichas fricciones. De forma intuitiva, la Ecuación (1) implica que, cuanto más grandes y más cercanos estén dos países, mayor será el comercio entre ellos. La simplicidad y el atractivo intuitivo del modelo de gravedad del comercio son algunas de sus características más destacadas.

**¿Por qué es tan popular el modelo de gravedad?** Hay cuatro razones principales por las que la ecuación de la gravedad del comercio es tan popular entre los economistas y los responsables de política económica. En primer lugar, como ya se ha dicho, por su analogía con la gravedad newtoniana, el modelo de gravedad del comercio internacional es muy intuitivo.

### 1. La ecuación de la gravedad es muy intuitiva

El notable parecido entre la ecuación de la gravedad del comercio y la ley de la gravitación universal de Newton queda reflejado en el recuadro 2, que revela que el comercio (la fuerza gravitatoria) entre dos países (objetos) es directamente proporcional al producto de sus tamaños (masas) e inversamente proporcional a las fricciones comerciales (el cuadrado de la distancia) entre ellos. En pocas palabras, cuanto más grandes y cercanos estén dos países, más comerciarán entre sí.

#### Cuadro 2. La gravedad en la física frente a la gravedad en el comercio

##### La gravedad en la física

$$F_{ij} = G \frac{M_i M_j}{D_{ij}^2}$$

donde:

$F_{ij}$  es la fuerza gravitacional entre los objetos  $i$  y  $j$ ;

$G$  es la constante gravitacional en física;

$M_i$  &  $M_j$  son las masas de los objetos  $i$  y  $j$ ;

$D_{ij}$  es la distancia entre  $i$  y  $j$ ;

2 es la elasticidad de la fuerza gravitacional con respecto a la distancia.

##### La gravedad en el comercio

$$X_{ij} = \tilde{G} \frac{Y_i Y_j}{T_{ij}^\theta}$$

donde:

$X_{ij}$  es el valor de los flujos comerciales entre los países  $i$  y  $j$ ;

$\tilde{G}$  es la constante gravitacional en comercio;

$Y_i$  &  $Y_j$  es el tamaño económico de los países  $i$  y  $j$ ;

$T_{ij}$  son los costos/fricciones comerciales entre  $i$  y  $j$ ;

$\theta > 0$  es la elasticidad de los flujos comerciales con respecto a los costos comerciales.

Lo que hace aún más impresionante esta analogía y la sorprendente similitud entre las ecuaciones de gravedad del comercio y la física es que la ecuación de gravedad del comercio puede derivarse de sólidas

teorías microeconómica.

La segunda razón principal por la que la ecuación de la gravedad es tan popular es que funciona. El modelo empírico de gravedad predice los flujos comerciales bilaterales de forma notable.

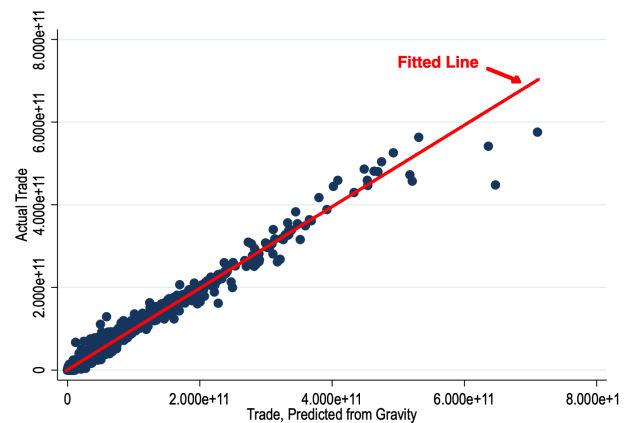
## 2. La ecuación de la gravedad tiene un enorme poder predictivo.

La ecuación de gravedad ofrece consistentemente un ajuste muy sólido entre los datos comerciales reales y los predichos, así como estimaciones plausibles (en términos de magnitud y signo) para una serie de variables independientes conocidas como las '*variables estándar de gravedad*', incluyendo el logaritmo de la distancia bilateral y variables indicadoras para fronteras contiguas, idioma oficial común, relaciones coloniales y acuerdos de comercio regionales (ACRs). Por ejemplo, el comercio bilateral disminuye con la distancia, pero aumenta cuando se forman ACRs.

La Figura 2 muestra el excelente rendimiento del modelo de gravedad al trazar los flujos comerciales bilaterales agregados que se predicen a partir del modelo de gravedad frente a los correspondientes flujos comerciales reales para los 100 mayores exportadores del mundo durante el periodo 1990-2023. Las predicciones de la Figura 2 proceden de un modelo econométrico de gravedad moderno, que se implementará en la Sección 4 de este capítulo, y que muestran que el rendimiento empírico del modelo de gravedad moderno no tiene precedentes (por ejemplo, la correlación entre el comercio real y el previsto es de 0.99). Sin embargo, como también se demostrará en la Sección 4 y en las preguntas de práctica que se incluyen al final del capítulo, incluso el modelo de gravedad más básico con sólo tres variables independientes predice con bastante éxito los flujos comerciales bilaterales.

Las predicciones de la Figura 2 se basan en datos que varían a lo largo del periodo 1990-2023. Es importante señalar que la ecuación de gravedad funciona extraordinariamente bien con datos de un solo año (es decir, datos de corte transversal) y con datos agrupados a lo largo de varios años (esto es; datos de panel). Además, la ecuación de gravedad funciona muy bien con datos agregados y desagregados a cualquier nivel. Por ejemplo, producto, industria, sector, etc.

Figura 2: Funcionamiento del modelo de gravedad



Fuente: Elaboración propia a partir del análisis de la sección 4.

La tercera razón principal de la popularidad de la ecuación de gravedad es su flexibilidad.

## 3. La ecuación de la gravedad es muy flexible.

El modelo de gravedad se ha utilizado para explicar los flujos comerciales y cuantificar el impacto de sus determinantes en cientos de artículos académicos, y también es el modelo de referencia para el análisis de políticas comerciales. El Cuadro 3 incluye una lista detallada (aunque aún lejos de ser exhaustiva) de determinantes '*tradicionales*' vs. '*más exóticos*' de los flujos comerciales. Es razonable concluir que, para estudiar el impacto de cualquier determinante de los flujos comerciales u otros resultados económicos a través del comercio, inevitablemente se debe recurrir a alguna versión del modelo de gravedad.

### Cuadro 3. Aplicaciones de la ecuación de la gravedad

**Determinantes comerciales ‘tradicionales’:** distancia, contigüidad, PIB, población, desarrollo, acuerdos comerciales preferenciales, aranceles, guerras arancelarias, subvenciones a la exportación, geografía, medidas no arancelarias, pertenencia a la Organización Mundial del Comercio, uniones aduaneras, Unión Europea, moneda común y uniones monetarias, pertenencia a la OCDE, pertenencia al FMI, inversión extranjera directa, inmigración, vínculos culturales, relaciones coloniales, lengua común y compartida, etc.

**Determinantes comerciales ‘más exóticos’:** calidad institucional, ayuda exterior, confianza, reputación de las personas, reputación de los productos, tipos de cambio, Covid, Brexit, promoción de las exportaciones, patentes, obstáculos técnicos al comercio, normas sanitarias y fitosanitarias, impuestos sobre la renta de las sociedades, impuestos sobre el valor añadido, macroeventos deportivos (Juegos Olímpicos y Mundial de Fútbol), embargos y sanciones (por ejemplo, a Rusia), los conflictos y las guerras, la piratería, el deshielo del casquete polar, el cierre del Canal de Suez, las guerras arancelarias de Trump, etc.

*Para referencias específicas a la mayoría de las aplicaciones anteriores, ver Yotov, 2024.*

Además de su capacidad para dar cabida a cualquier factor determinante del comercio, surgen otras cuatro dimensiones de flexibilidad del modelo de gravedad. En primer lugar, la gravedad se aplica a cualquier nivel de agregación; es decir, para productos, industrias, sectores, etc. En segundo lugar, a pesar de tener unos fundamentos teóricos menos desarrollados que los del comercio, el modelo de gravedad se ha aplicado con éxito para estudiar otros flujos bilaterales como: la IED, la migración, las transferencias internacionales de tecnología, etc. En tercer lugar, como se demuestra más adelante en este capítulo, es muy sencillo aplicar un modelo empírico de gravedad moderno con programas estadísticos estándar. Por último, el modelo de gravedad puede incorporarse con flexibilidad en modelos más amplios, como la inversión en capital físico, los modelos medioambientales, los mercados laborales, etc.

La cuarta razón principal del éxito del modelo de gravedad es que puede derivarse basándose en sólidas teorías microeconómicas.

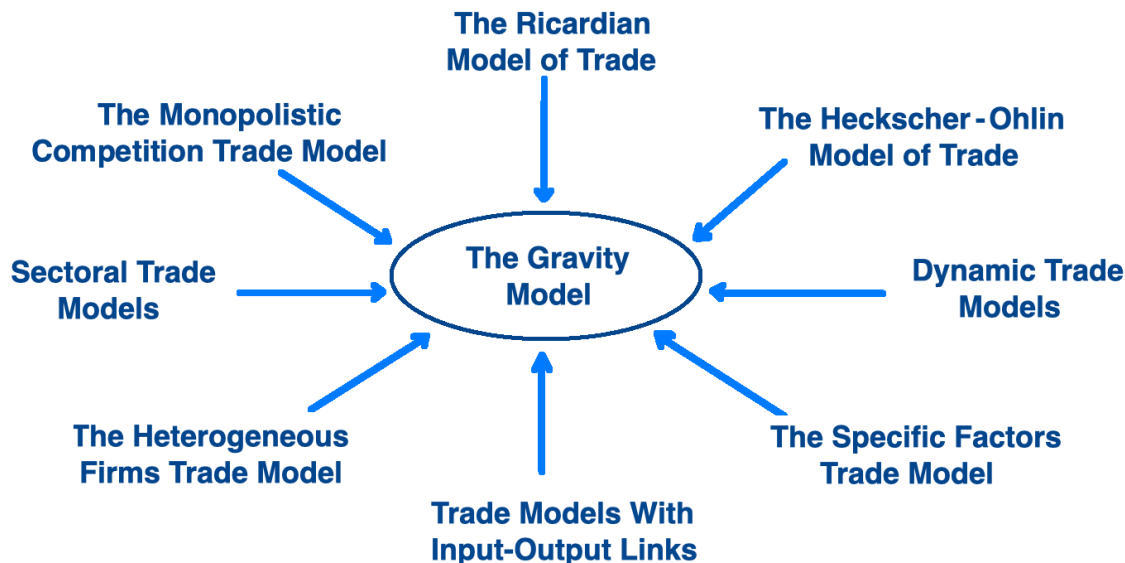
#### 4. La ecuación de la gravedad tiene sólidos (y numerosos) fundamentos teóricos

Una de las características más notables de la ecuación de gravedad del comercio es que, bajo supuestos relativamente estándar, puede obtenerse a partir de muchos fundamentos microeconómicos alternativos. Como se muestra en la figura 3, la ecuación de gravedad puede derivarse de las teorías clásicas del comercio que se tratan habitualmente en los libros de texto universitarios. Es el caso del modelo ricardiano, el modelo de Heckscher-Ohlin, el modelo de competencia monopolística y el modelo de factores específicos. Además, la misma ecuación de gravedad surge de modelos de comercio sectorial, modelos de comercio con dinámica, modelos de comercio con vínculos insumo-producto y modelos de comercio con empresas heterogéneas.

Los profesionales del comercio tardaron mucho tiempo en darse cuenta de que tantas teorías comerciales diferentes convergen en la misma ecuación de gravedad, sencilla e intuitiva (véase el recuadro 4). Sin embargo, en retrospectiva, quizás no deba sorprender que los motores del comercio puedan resumirse en tres términos intuitivos: fuerzas del lado del exportador, fuerzas del lado del importador y fuerzas bilaterales. La misma intuición se aplica a cualquier relación socioeconómica bilateral. En consecuencia, los métodos empíricos y el análisis práctico que se presentarán en las secciones 3 y 4 deberían aplicarse de forma más amplia, por ejemplo, a la IED, la migración, los flujos tecnológicos, etc.

Los fundamentos teóricos del modelo de gravedad tienen muchas implicaciones importantes en el análisis empírico con la ecuación de gravedad. Por ejemplo, una mayor adhesión a la teoría permite mejorar el poder predictivo general del modelo de gravedad y obtener estimaciones más precisas de los efectos de las políticas comerciales. Por otro lado, la consideración de algunas de las características teóricas

**Figura 3: Algunos fundamentos teóricos del modelo de gravedad del comercio**



**Fuente:** El autor. Adaptado de Yotov et al., 2016.

clave de la gravedad ha permitido resolver varios enigmas relevantes de la literatura comercial. Es el caso de la conclusión contra-intuitiva de que los efectos de la distancia en el comercio no han disminuido con el tiempo o de que el modelo de gravedad no puede explicar adecuadamente los desequilibrios comerciales bilaterales, entre otros. La teoría detrás del modelo de gravedad ha inspirado algunas de las recomendaciones más importantes para estimar los modelos de gravedad; por ejemplo, la importancia de tener en cuenta los costes del comercio multilateral, que se analizan en detalle en la siguiente sección. Por último, la teoría del modelo de gravedad permite trasladar los efectos del comercio a otros resultados económicos; por ejemplo, los efectos en el mercado laboral, el impacto medioambiental, la inversión en capital físico, el crecimiento económico, etc.

Antes de continuar, es importante señalar que, al igual que muchos otros grandes inventos, el modelo de gravedad no ganó su popularidad de manera inmediata. Al contrario, como se resume en el recuadro 4, este modelo tardó muchos años en ganarse el corazón de los economistas especializados en comercio y en convertirse en el modelo de trabajo del comercio.

#### Cuadro 4. La historia de la gravedad

En 2025, el modelo de gravedad domina el comercio internacional. Sin embargo, su camino a la fama no fue fácil. Las primeras aplicaciones de la gravedad a la economía fueron a-teóricas y se llevaron a cabo por analogía con la física. Muchos atribuyen a Tinbergen, 1962, la primera aplicación de la gravedad a la economía. Esto puede considerarse cierto, pero sólo desde la perspectiva del comercio, ya que el Premio Nobel de 1969 fue (posiblemente) el primero en aplicar la gravedad a los flujos comerciales internacionales. Mucho antes que Tinbergen, Ravenstein, 1885, aplicó la ecuación de la gravedad a los flujos migratorios. Algunos de los alumnos de Tinbergen continuaron sus trabajos sobre la gravedad en los años sesenta y setenta, pero la mayoría de los economistas de este período no consideraron la gravedad como

un modelo comercial serio por falta de fundamentos teóricos.

Aunque ha habido cierto debate y discusión sobre quién fue el primero en aplicar la gravedad a la economía, los economistas especializados en comercio parecen estar unánimemente de acuerdo en que el primer fundamento teórico de la ecuación de gravedad del comercio, tal y como la conocemos hoy en día, pertenece a Anderson, 1979. De hecho, es realmente destacable que, con algunas mejoras teóricas 'cosméticas', el modelo de gravedad de Anderson de 1979 es perfectamente coherente con todos los análisis gravitacionales empíricos modernos.

#### Cuadro 4. La historia de la gravedad (continuación)

A pesar de su atractivo intuitivo, su buen rendimiento empírico y su ya sólida base teórica, el modelo de la gravedad luchó por ganarse el corazón de los principales economistas especializados en comercio durante los años ochenta e, incluso, noventa. Varios estudios relevantes del Handbook of International Economics (Manual de Economía Internacional) -el referente de la investigación comercial-, no se mostraron benévulos con el modelo de gravedad. Cuestionaban su herencia teórica y predecían que no tendría ningún efecto en el tema del comercio internacional. En retrospectiva, Anderson, 2011, describió la experiencia del modelo de gravedad durante este periodo como 'un huérfano intelectual'.

Hasta principios de la década de 2000, los economistas especializados en comercio siguieron ignorando la gravedad debido a su falta de reputación. Durante este tiempo, se utilizó principalmente para el análisis de políticas. Sin embargo, varios avances importantes a principios de la década de 2000 condujeron a la edad de oro de la 'gravedad estructural' (2002-2012). En primer lugar, y más importante, las contribuciones teóricas seminales de Eaton y Kortum, 2002 y Anderson y van Wincoop, 2003 no dejaron lugar a dudas de que el modelo de gravedad tenía unos fundamentos teóricos muy sólidos. En segundo lugar, las contribuciones empíricas de economistas reconocidos, como Frankel y Romer, 1999 y Rose, 2000, acabaron con el estigma de utilizar el modelo de gravedad en trabajos serios, iniciando así la resurrección de dicho modelo como herramienta empírica respetable. En tercer lugar, este periodo fue testigo de la construcción de datos comerciales amplios y de alta calidad y de mejores métodos y capacidades econométricas (Baldwin y Taglioni, 2006).

Durante su época dorada (2002-2012), la gravedad se consolidó como el modelo de trabajo en el comercio y apareció en cientos de publicaciones, incluidas aplicaciones, desarrollos teóricos, contribuciones a la estimación y nuevas bases de datos. La mayoría de los trabajos sobre el modelo de gravedad durante este periodo fueron aplicaciones empíricas destinadas a estimar el impacto de diversas políticas y factores determinantes de los flujos comerciales bilaterales (por ejemplo, los acuerdos de libre comercio (ALC), la pertenencia a la Organización Mundial del Comercio (OMC), la distancia, las relaciones coloniales, etc.). Aunque muchos seguían aplicando la gravedad sólo de forma intuitiva, una mayor adopción de la teoría permitió comprender mejor los factores que impulsan el crecimiento de los flujos comerciales y realizar estimaciones con resultados más plausibles.

La 'Edad de Oro de la Gravedad' también fue testigo de importantes avances teóricos, como la gravedad sectorial, la gravedad con empresas heterogéneas y la gravedad dinámica. El creciente interés por la teoría de la gravedad y sus aplicaciones se vieron facilitados por importantes mejoras en la potencia de cálculo y fue acompañado por nuevas contribuciones en el ámbito de la estimación. Por ejemplo, el uso de efectos fijos de exportador, importador y par de países, que se analizará en la siguiente sección y la introducción del estimador de Pseudo Máxima Verosimilitud de Poisson (PPML por sus siglas en inglés) por Santos Silva y Tenreyro, 2006, que más tarde se consolidó como el estimador más adecuado del modelo de gravedad.

En un artículo seminal, Arkolakis et al., 2012, consolidaron la hegemonía del modelo de gravedad estructural en el comercio al demostrar que diferentes fundamentos micro teóricos convergen exactamente en la misma ecuación de gravedad. Junto con multitud de novedosas aplicaciones y desarrollos teóricos, el modelo de gravedad tuvo su revancha con una

cobertura destacada en la edición de 2014 del *Handbook of International Economics*, la misma publicación en la que fue desestimado en los años ochenta y noventa. El modelo de gravedad también apareció en el *Handbook of International Trade and Transportation* de 2018 y en libros dedicados al análisis de la política comercial y al impacto de la globalización.

La ecuación empírica de la gravedad siguió siendo el modelo de referencia para las nuevas aplicaciones, mientras que otros revisaron los resultados existentes con nuevos y mejores métodos para medir los costes comerciales y cuantificar el impacto de diversos determinantes de los flujos comerciales (por ejemplo, uniones monetarias, piratería, lengua común, tipos de cambio, sanciones económicas, etc.). La mejora de los datos (en términos de cobertura nacional, sectorial y temporal) permitió explorar los efectos heterogéneos de muchas políticas comerciales (por ejemplo, ACR, uniones monetarias, sanciones, etc.) en varias dimensiones. También se estableció que el modelo de gravedad funciona bastante bien para el comercio de servicios, minería y agricultura, y a cualquier nivel de agregación; es decir, desde el nivel de producto hasta el nivel agregado. Resultó evidente que, para estudiar el impacto de cualquier factor determinante de los flujos comerciales, hay que basarse en alguna versión del modelo de gravedad. Además, aprovechando los avances de la literatura comercial, los académicos y los responsables políticos adaptaron el modelo de gravedad del comercio para estudiar otros flujos bilaterales, como la migración, la IED, las patentes transfronterizas, etc.

En este periodo también se produjeron importantes contribuciones en materia de estimación, datos y teoría. En el frente de la estimación, se estableció que el estimador PPML era perfectamente coherente con la teoría de la gravedad, lo que a su vez permitía realizar un análisis exhaustivo de la política comercial en software estadístico estándar y sin necesidad de programación personalizada. También se produjeron importantes avances en el frente teórico (por ejemplo, el modelo de gravedad con vínculos insumo-producto o con dinámica bilateral). Junto con sus notables resultados empíricos y las nuevas herramientas econométricas y computacionales, los avances en la teoría de la gravedad dieron lugar a una serie de contribuciones que vinculaban el comercio con diversos resultados económicos, como la difusión de la tecnología, el desempleo, las emisiones de carbono, etc. Para apoyar los avances teóricos y las nuevas necesidades de aplicación, se creó una nueva generación de bases de datos con variables explicativas necesarias para estimar los modelos de gravedad y flujos comerciales nacionales e internacionales a distintos niveles de agregación.

La potencia y el éxito sin precedentes del modelo de gravedad se manifestaron en 2025 en respuesta a los frecuentes cambios arancelarios del presidente estadounidense Trump (por ejemplo, los aranceles sobre el acero en Canadá se impusieron en la mañana del 9 de marzo y se levantaron por la tarde de ese mismo día). Gracias a los grandes avances en la literatura de la gravedad, asistimos a algo realmente notable: podemos analizar el impacto completo (de equilibrio parcial y general) de las políticas comerciales en tiempo real.

*Este resumen de la evolución del modelo de gravedad es una adaptación de Yotov, 2024, y remito al lector o lectora interesado a este documento para un análisis más detallado y referencias.*

## 2. Gravedad con ‘gravitas’: el modelo estructural de gravedad

Esta sección tiene tres objetivos principales. Primeramente, se presentará el modelo de gravedad teórico/estructural del comercio. A continuación, se compararán las ecuaciones de gravedad teórica y estructural, destacando las principales diferencias teóricas entre ambas. Finalmente, se extraerán varias consecuencias importantes para la modelización de los flujos comerciales y la estimación de las ecuaciones empíricas de gravedad en consonancia con la teoría.

### 2.1. Todos los caminos conducen al . . . Modelo de Gravedad Estructural

Como ya se ha dicho, una de las características más notables del modelo de gravedad del comercio es que la misma ecuación de gravedad es representativa y puede derivarse de muchos fundamentos teóricos microeconómicos alternativos, algunos de los cuales son temas habituales en los libros de texto de grado/licenciatura sobre comercio internacional (véase la figura 3). Siguiendo la evolución de la literatura teórica, introduciremos el modelo de gravedad estructural contemporáneo en dos pasos. En primer lugar, de acuerdo con las teorías clásicas del comercio, presentamos la ecuación de gravedad estructural de corte transversal:<sup>1</sup>

$$X_{ij} = \frac{Y_i E_j}{Y} \left( \frac{t_{ij}}{T_j T_i} \right)^{-\theta} \quad (2)$$

Tres características teóricas distinguen la ecuación de gravedad estructural (2) de la ecuación de gravedad básica (*naive*) mostrada anteriormente en la ecuación (1). Para comenzar, el término estructural que subyace a la constante gravitacional  $\tilde{G}$  es el valor de la producción mundial  $Y$ . La implicación es que los flujos comerciales bilaterales son proporcionales al producto de los tamaños económicos de los dos socios comerciales como parte de la producción mundial correspondiente.

En segundo lugar, la ecuación de gravedad teórica distingue entre el valor de la producción ( $Y_i$ ), como medida del tamaño del exportador, y el gasto ( $E_j$ ), como medida del tamaño del importador. Intuitivamente, la medida relevante del tamaño del exportador debería ser su capacidad de producción, mientras que la medida relevante del tamaño del importador debería ser su capacidad de consumo. La importancia de distinguir entre producción y gasto como medidas adecuadas del tamaño en el modelo de gravedad es aún más pronunciada a nivel desagregado, donde, por ejemplo, debido a la especialización, los desequilibrios comerciales sectoriales (es decir, la diferencia entre las exportaciones e importaciones nacionales a nivel sectorial) pueden ser muy grandes.

Por último, el término de coste comercial ( $t_{ij}$ ) de la ecuación (1) se descompone en tres componentes estructurales en la ecuación (2). En concreto,  $t_{ij}$  denota cualquier fricción comercial bilateral que afecte directamente a los flujos comerciales entre dos países, por ejemplo, la distancia bilateral, los aranceles, los acuerdos comerciales, las sanciones, etc.  $T_i$  y  $T_j$  son los costes comerciales multilaterales del lado del exportador y del lado del importador, respectivamente, que reflejan el hecho de que el comercio entre dos países no sólo dependerá de su tamaño y de las fricciones comerciales bilaterales directas entre ellos, sino también de lo costoso que sea para estos comerciar con otros países. De ahí la etiqueta de costes comerciales ‘multilaterales’.

Para poner de relieve la intuición que subyace a los costes del comercio multilateral, la Figura 4 traslada a Estados Unidos y Canadá a Marte. Aunque los tamaños ( $Y_i$  y  $E_j$ ) y las fricciones comerciales bilaterales directas ( $t_{ij}$ , por ejemplo, la distancia) entre Estados Unidos y Canadá no varían, los dos países

Figura 4: Multilateral Trade Costs



Source: The author. Inspired by Krugman, 1995.

<sup>1</sup>Esta ecuación es coherente con los trabajos gravitacionales más influyentes de Eaton y Kortum, 2002 y Anderson y van Wincoop, 2003. Ver Yotov et al., 2016, para obtener derivaciones alternativas del modelo de gravedad con la misma notación.

comerciarían más entre sí si estuvieran en Marte que si estuvieran en su ubicación actual en la Tierra. ¿Por qué? Porque en Marte estarían más aislados del resto del mundo. Por lo tanto, el comercio entre EE.UU. y Canadá no sólo depende de los costes comerciales entre estos dos países, sino también de sus costes comerciales con todos los demás. Esta es una de las principales diferencias entre el modelo de gravedad básico ('naive') y el estructural: el primero supone (erróneamente) que sólo importan los costes comerciales bilaterales directos, mientras que el segundo también tiene en cuenta los costes comerciales multilaterales.

Dos últimas modificaciones derivadas de la teoría dan como resultado el modelo de gravedad estructural contemporáneo que se muestra a continuación:

$$X_{ij,t}^k = \frac{Y_{i,t}^k E_{j,t}^k}{Y_t^k} \left( \frac{t_{ij,t}^k}{T_{j,t}^k T_{i,t}^k} \right)^{-\theta^k}, \quad \forall i, j, t, k. \quad (3)$$

En primer lugar, el modelo de gravedad puede derivarse a cualquier nivel de agregación, por ejemplo, para productos, industrias, sectores y a nivel agregado. Esto se refleja en el superíndice  $k$  de la ecuación (3), que puede referirse a un determinado producto, industria o sector  $k$ . El segundo ajuste es el subíndice  $t$ , motivado por el hecho de que, al igual que los flujos comerciales, tanto las variables de tamaño como los términos de coste comercial de la ecuación (3) varían con el tiempo. El subíndice temporal también está motivado por las teorías del comercio dinámico, que implican que el comercio y la liberalización del comercio pueden conducir a la acumulación de factores de producción, por ejemplo, capital físico como las maquiladoras -plantas manufactureras situadas a lo largo de la frontera entre EE.UU. y México-. Obsérvese que sin el superíndice  $k$  y el subíndice  $t$ , la ecuación (3) es idéntica a la ecuación (2). Por último, cada una de las teorías de gravedad subyacentes implica que la gravedad se aplica tanto al comercio internacional,  $i \neq j$ , como al nacional,  $i = j$ .

## 2.2. Implicaciones de la teoría en las aplicaciones y estimaciones de la gravedad

Los fundamentos teóricos de la ecuación de la gravedad tienen implicaciones muy importantes para el éxito empírico del modelo de la gravedad y para la correcta especificación econométrica. Se tratará sucesivamente la importancia de cada una de las principales implicaciones teóricas.

**Costes comerciales multilaterales.** Los costes del comercio multilateral tienen dos implicaciones para cuantificar los efectos de las políticas comerciales. En primer lugar, si los costes del comercio multilateral no se controlan adecuadamente en el modelo empírico de gravedad, la ecuación de gravedad subestimarán el comercio entre los países que están más aislados del resto del mundo y sobreestimarán el comercio de los países que están rodeados de muchos otros socios comerciales, por ejemplo, los Estados europeos. En segundo lugar, los costes del comercio multilateral reflejan la facilidad con la que los países pueden desviar el comercio a otros países. Esto es sumamente importante para cuantificar los efectos de muchas políticas contemporáneas. Por ejemplo, una de las principales razones de la ineficacia de las sanciones impuestas a Rusia por su invasión a Ucrania es que la primera pudo desviar su comercio a Estados no sancionadores, como China, India y Turquía. Estos efectos se reflejan en los costes comerciales multilaterales. Otro ejemplo reciente son los aranceles que Estados Unidos impondrá a Canadá en 2025. Estos aranceles serían especialmente perjudiciales para Canadá puesto que este país está relativamente aislado del resto del mundo.

**Gravedad desagregada.** La teoría implica que la gravedad se mantiene a cualquier nivel de agregación, desde el nivel de producto hasta el nivel agregado. La principal implicación de esta propiedad teórica es que el modelo empírico de gravedad es muy flexible y, en función de la cuestión de interés, el análisis puede centrarse en un determinado producto, industria, sector o, más ampliamente, en bienes frente a servicios. La capacidad de analizar los flujos comerciales por separado para industrias o sectores individuales es importante ya que los costes comerciales (por ejemplo, los costes de transporte) varían entre sectores y muchas políticas comerciales (como en el caso de los aranceles) se imponen y aplican a nivel desagregado. Incluso cuando las políticas se aplican a nivel agregado (por ejemplo, embargos comerciales

completos), sus efectos podrían diferir sustancialmente entre productos, industrias y sectores. Por ello, a menudo es conveniente utilizar un modelo de gravedad desagregado. La teoría de la gravedad ofrece un claro apoyo y orientación para los análisis desagregados.

**Gravedad variable en el tiempo.** La dimensión temporal de la ecuación de la gravedad tiene varias implicaciones empíricas. En primer lugar, la adición de más años a los datos gravitacionales permite realizar análisis gravitacionales más precisos. En segundo lugar, como se demuestra en la sección siguiente, el uso de datos de panel (es decir, variables en el tiempo) permite modelizar de forma flexible, exhaustiva y sencilla todos los costes del comercio bilateral invariables en el tiempo (como la distancia) en el modelo de gravedad. En tercer lugar, el uso de datos de panel permite captar la evolución y el ajuste de los costes del comercio bilateral y los efectos de diversas políticas a lo largo del tiempo. Por ejemplo, los efectos de los ACR no son instantáneos y captar el ajuste de los flujos comerciales a lo largo del tiempo en respuesta a la formación de ACR puede ser útil a efectos de evaluación de política económica. Además, los efectos de los ACR de la década de 1990 podrían ser muy distintos de los de los ACR modernos y tales diferencias no pueden captarse sin datos que varíen en el tiempo.

**Producción vs. Gasto.** La diferencia entre el valor de la producción y el gasto, implícita en la teoría de la gravedad, tiene varias implicaciones empíricas. La primera es que, si los costes comerciales son simétricos (por ejemplo, la distancia entre dos países), no tener en cuenta las diferencias entre el valor de la producción y el gasto dará lugar a un mal funcionamiento del modelo de gravedad, ya que siempre predecirá flujos comerciales bilaterales simétricos. En segundo lugar, distinguir entre producción y gasto es aún más importante a nivel desagregado, donde las diferencias entre la producción y el consumo nacionales son mucho más pronunciadas. En tercer lugar, incluso con datos agregados, el PIB no es el mejor sustituto del tamaño económico en el modelo de gravedad; no sólo porque la teoría implica que hay que tener en cuenta los desequilibrios comerciales, sino también porque el PIB se mide como valor añadido, mientras que los flujos comerciales se miden en términos brutos, lo que provoca una incoherencia. Afortunadamente, como se demuestra en la siguiente sección, existen técnicas econométricas muy sencillas para tener en cuenta las variables de tamaño en el modelo empírico de gravedad sin necesidad de preocuparse por estos problemas de medición y requisitos de datos adicionales.

**Comercio interior.** La teoría del comercio implica que el modelo de gravedad también se aplica a las ventas nacionales. Además, la utilización del comercio interior tiene importantes ventajas para las estimaciones del modelo. Por ejemplo, permite identificar los posibles efectos de desviación del comercio de los acuerdos comerciales hacia y desde países que no forman parte de los acuerdos, los efectos extraterritoriales de las sanciones y los efectos de las políticas comerciales no discriminatorias. No obstante, debido sobre todo a las limitaciones de los datos, la mayoría de las estimaciones de la gravedad siguen realizándose exclusivamente con datos internacionales y el uso de los flujos comerciales nacionales en el análisis con modelos de gravedad no es todavía una norma. Por lo tanto, de acuerdo con la mayor parte de la literatura existente sobre el modelo de gravedad, nos centraremos únicamente en los flujos comerciales internacionales.

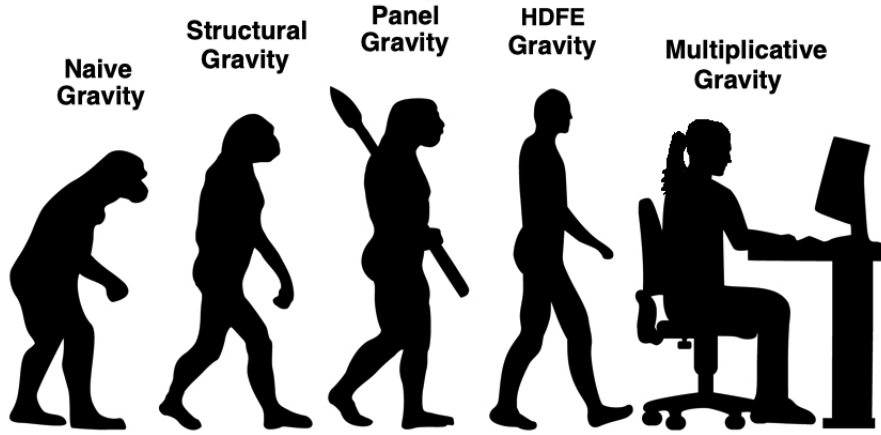
### 3. De las estimaciones de gravedad ingenuas a las modernas

Gran parte del éxito del modelo de gravedad se debe a su poder predictivo sin precedentes y a su flexibilidad para adaptarse a numerosas aplicaciones. El objetivo de esta sección es traducir la ecuación empírica básica ('naive') de gravedad en un modelo econométrico moderno que puede utilizarse para estimar los efectos de diversos determinantes de los flujos comerciales. El análisis presupone/requiere conocimientos muy básicos de econometría (el uso de mínimos cuadrados ordinarios (MCO) y efectos fijos, por ejemplo). Así pues, el material de esta sección debería ser accesible para cualquier estudiante universitario que haya seguido clases de econometría. Además, la presente sección puede ser de utilidad para todo aquel que vaya a cursar materias de econometría o un seminario de economía o que planeen escribir un trabajo de fin de carrera o realizar un proyecto de investigación independiente.

Aprovechando los fundamentos teóricos del modelo de gravedad y los conocimientos que hemos acumulado hasta este momento, desarrollaremos la especificación econométrica del modelo en cinco pasos, que siguen la evolución cronológica de las estimaciones de la ecuación de gravedad, tal como se repre-

senta en la Figura 5.<sup>2</sup>

**Figura 5: Evolución de las estimaciones del modelo de gravedad**



Fuente: El autor.

**Gravedad básica ('naive').** Siguiendo el planteamiento de la sección anterior, en la que tradujimos la ecuación de gravedad 'naive' a un modelo de gravedad estructural, comenzaremos por especificar una ecuación de gravedad básica. Para ello, procedemos en tres sencillos pasos. En primer lugar, log-linealizamos la ecuación (1) para obtener:

$$\ln(X_{ij}) = \ln(\tilde{G}) - \theta \ln(T_{ij}) + \ln(Y_i) + \ln(Y_j). \quad (4)$$

En segundo lugar, traducimos la ecuación (4) a un modelo econométrico utilizando variables sustitutivas de las variables independientes. En concreto, utilizamos el PIB para representar el tamaño del exportador ( $GDP_i$ ) y del importador ( $GDP_j$ ), y la distancia bilateral ( $DIST_{ij}$ ) y los acuerdos comerciales regionales ( $RTA_{ij}$ ) para representar los costes del comercio bilateral.<sup>3</sup> La distancia y los ACR son las dos variables sustitutivas de los costes comerciales más utilizadas en la literatura.<sup>4</sup> El uso de la distancia y los ACR como variables sustitutivas representativas de los costes comerciales también resultan útiles desde una perspectiva pedagógica, ya que una de ellas (distancia) es una variable continua y la otra (ACR) es una variable indicativa/dummy, que sólo toma valores de ceros y unos. Concretamente, la variable ACR es igual a uno si dos países tienen un ACR en vigor en un año determinado e igual a cero en caso contrario.

Por último, añadimos un término constante ( $\beta_0$ ), que corresponde a la constante de gravedad ( $\tilde{G}$ ) y un término de error ( $\epsilon_{ij}$ ), que completa nuestra primera especificación econométrica de gravedad:

$$\ln(TRADE_{ij}) = \beta_0 + \beta_1 RTA_{ij} + \beta_2 \ln(DIST_{ij}) + \beta_3 \ln(GDP_i) + \beta_4 \ln(GDP_j) + \epsilon_{ij}. \quad (5)$$

La ecuación (5) es la versión más popular del modelo econométrico de gravedad. Puede estimarse mediante mínimos cuadrados ordinarios (MCO), y las estimaciones resultantes pueden interpretarse del siguiente modo. Las estimaciones de los coeficientes de las variables continuas (es decir, la distancia y el PIB) son elasticidades. Así, por ejemplo, si la estimación del coeficiente sobre la distancia es  $\hat{\beta}_2 = -0.8$ , esto significa que, *ceteris paribus*, un aumento del 1% en la distancia entre dos países provocaría una disminución del 0,8% en el comercio bilateral entre ellos. Para interpretar el impacto de cualquier variable dummy en el modelo de gravedad (por ejemplo, los ACR), se puede aplicar la siguiente fórmula  $[exp(\beta_1) - 1] \times 100$ . Así, por ejemplo, si la estimación sobre los ACR es  $\hat{\beta}_1 = 0.5$ , esto implica que los ACR que entraron en vigor

<sup>2</sup>Ver Larch et al., 2025 para una motivación y discusión detalladas de las recomendaciones para las estimaciones de la gravedad.

<sup>3</sup>RTA hace referencia a las siglas en inglés correspondientes a Regional Trade Agreements (Acuerdos comerciales regionales, ACR). Con el fin de mantener la coherencia con la base de datos que se utiliza para el análisis empírico, el nombre de todas las variables que se utilizan en el presente capítulo se mantienen en inglés.

<sup>4</sup>En las actividades prácticas del final del capítulo, también introducimos otros indicadores de costes comerciales y variables de políticas económicas.

durante el periodo de investigación han dado lugar a un incremento del 65 % ( $[exp(0.5) - 1] \times 100 = 64.87$ ) del comercio entre los miembros del ACR, *ceteris paribus*.

**Gravedad estructural.** A continuación, mejoramos la especificación econométrica dando cabida a las implicaciones teóricas de la ecuación (2). En concreto, debemos tener en cuenta dos consideraciones teóricas. En primer lugar, debemos tener en cuenta el valor de la producción y el gasto. En segundo lugar, debemos tener en cuenta los costes del comercio multilateral. En principio, es posible tratar de resolver ambos problemas directamente; es decir, utilizando datos observables. Sin embargo, un enfoque econométrico mucho más sencillo, consistente con la teoría y completamente integral para tener en cuenta tanto (i) la diferencia entre producción y gasto como (ii) el desafío de los costos comerciales multilaterales, es utilizar efectos fijos de exportador e importador, de la siguiente manera:

$$\ln(TRADE_{ij}) = \beta_0 + \beta_1 RTA_{ij} + \beta_2 \ln(DIST_{ij}) + \pi_i + \psi_j + \epsilon_{ij}. \quad (6)$$

Aquí,  $\pi_i$  es un conjunto de efectos fijos de exportador; es decir, variables ficticias que toman un valor de uno para cada exportador en los datos e  $\psi_j$  es un conjunto de efectos fijos de importador; esto es, variables ficticias que toman un valor de uno para cada importador en los datos. Así, por ejemplo, si los datos incluyen 100 países y cada uno de ellos aparece como importador y como exportador, habrá 100 efectos fijos de importador y 100 efectos fijos de exportador.<sup>5</sup> Las principales ventajas de los efectos fijos son que: (i) controlarán completamente cualquier característica (observable y no observable) específica del exportador y del importador, incluyendo el tamaño y los costes comerciales multilaterales. Por lo tanto, no hay que preocuparse por las variables omitidas ni por la recopilación de datos en estas dimensiones; y (ii) son muy fáciles de construir e implementar empíricamente con software estadístico estándar. Lo demostraremos en la próxima sección. La desventaja de estos efectos fijos es que, si se utilizan, no se pueden identificar los efectos de ninguna variable específica del exportador o del importador, porque estas variables serán perfectamente colineales con los efectos fijos y serán absorbidas por ellos. Esto no afecta a nuestros objetivos de estimar los efectos de los costes y las políticas comerciales bilaterales (por ejemplo, la distancia y los ACR).

**Gravedad con datos de panel.** El siguiente paso es sencillo: se trata de introducir una dimensión temporal en nuestro modelo econométrico. La consecuencia es que el término de error y todas las variables (excepto la distancia, que no varía con el tiempo) tienen ahora un subíndice temporal:

$$\ln(TRADE_{ij,t}) = \beta_0 + \beta_1 RTA_{ij,t} + \beta_2 \ln(DIST_{ij}) + \pi_{i,t} + \psi_{j,t} + \epsilon_{ij,t}. \quad (7)$$

Como se ha comentado en la sección anterior, añadir una dimensión temporal al análisis econométrico es coherente con la teoría y disponer de más datos debería mejorar el rendimiento de nuestro modelo econométrico. Además, la dimensión temporal nos permite estudiar la evolución de los efectos de los ACR antes y después de su entrada en vigor, así como las posibles diferencias en los efectos de los ACR que se han formado en distintos periodos de tiempo, por ejemplo, los ACR de la década de 1990 frente a los de la década de 2000.

**Gravedad HDFE.** El uso de datos variables en el tiempo permite además la inclusión de efectos fijos por pares de países ( $\gamma_{ij}$ ) - de ahí el nombre de esta especificación como gravedad con efectos fijos de alta dimensión (HDFE). Los efectos fijos de par de países son variables ficticias que toman un valor de uno para cada par en los datos y son iguales a cero en caso contrario. El modelo de gravedad HDFE se convierte en:

$$\ln(TRADE_{ij,t}) = \beta_0 + \beta_1 RTA_{ij,t} + \gamma_{ij} + \pi_{i,t} + \psi_{j,t} + \epsilon_{ij,t}. \quad (8)$$

De forma similar a los efectos fijos del exportador y del importador, los efectos fijos del par de países controlarán plenamente todos los costes comerciales bilaterales invariables en el tiempo, por ejemplo, la distancia, las fronteras contiguas, etc. El inconveniente de utilizar efectos fijos de par de países que no nos permitirán obtener estimaciones de los efectos de la distancia o de cualquier otra variable bilateral invariable en el tiempo. Así, la especificación (8) ya no incluye  $\ln(DIST_{ij})$  porque queda absorbida por

<sup>5</sup>Técnicamente, uno de los efectos fijos del lado del exportador y del lado del importador se eliminará debido a la colinealidad perfecta. Sin embargo, esto no tendrá implicaciones para las estimaciones de las variables independientes que nos interesan.

los efectos fijos de par de países. Sin embargo, siempre que el objetivo sea obtener estimaciones de los efectos de las políticas variables en el tiempo, por ejemplo, aranceles, ACR, sanciones, etc., se recomienda el uso de efectos fijos por par de países en las estimaciones del modelo de gravedad, ya que su inclusión controlará por muchas variables potencialmente omitidas, limitará la necesidad de una amplia recopilación de datos y mejorará significativamente el poder predictivo del modelo de gravedad. Esto se pondrá de relieve y se reforzará con el análisis práctico de la próxima sección.

**Gravedad multiplicativa.** El último paso, que conduce al modelo econométrico preferido, consiste en abordar el reto de que la especificación de gravedad log-lineal descarta todos los flujos comerciales bilaterales que son iguales a cero (puesto que el logaritmo de cero es indefinido). El ajuste sencillo a la ecuación econométrica de gravedad consiste en exponenciar ambos lados, lo que conduce a:

$$TRADE_{ij,t} = \exp [\beta_0 + \beta_1 RTA_{ij,t} + \gamma_{ij} + \pi_{i,t} + \psi_{j,t}] \times \varepsilon_{ij,t}. \quad (9)$$

Dos características más del modelo econométrico multiplicativo lo hacen atractivo. En primer lugar, como se demuestra en la siguiente sección, el modelo de gravedad multiplicativo puede estimarse fácil y rápidamente con comandos integrados en paquetes estadísticos estándar. En segundo lugar, la interpretación de las estimaciones de los coeficientes de gravedad sigue siendo la misma que en la especificación log-lineal, que se estima con MCO.

La ecuación (9) representa el modelo econométrico de gravedad moderno que utilizan los investigadores académicos y los analistas políticos para obtener estimaciones de los efectos de diversas políticas. Basándose en la ecuación (9), el recuadro 5 resume los vínculos entre las implicaciones teóricas de la gravedad y su aplicación empírica.

#### Recuadro 5. RESUMEN: De la teoría a la estimación

Implicación teórica	Implementación empírica
Controlar por el valor de la producción frente al gasto	Usar efectos fijos de exportador(-tiempo) e importador(-tiempo)
Controlar por los costes multilaterales del comercio	Usar efectos fijos de exportador(-tiempo) e importador(-tiempo)
Tener en cuenta los costes bilaterales invariantes en el tiempo	Usar efectos fijos por pares de países (o variables invariantes en el tiempo)
Tener en cuenta los costes bilaterales variables en el tiempo	Usar datos en panel (con variación temporal) y variables de política
Tener en cuenta los flujos comerciales nulos	Usar el estimador multiplicativo PPML

Antes de continuar, se recuerda al lector o lectora que, de acuerdo con la teoría, la ecuación de gravedad se aplica a cualquier nivel de agregación. Así, la ecuación (9) puede estimarse para productos individuales, por industria, por sector o con datos agregados y, lo que es más importante, la ecuación (9) es muy fácil de aplicar y estimar con programas estadísticos estándar. En la siguiente sección lo demostramos con un ejemplo sencillo, pero muy avanzado.

## 4. Gravedad práctica: los efectos de la distancia, ACR y la UE

Esta sección incluye un análisis práctico que aplica secuencialmente las ecuaciones de estimación de la sección anterior. La única diferencia es que, además de estimar los efectos de la distancia y los ACR, también aislaremos el impacto de la Unión Europea (UE) de todos los demás ACR. Para ello, introduciremos

en nuestra especificación una nueva variable dummy –  $EU_{ij,t}$  – que toma el valor de uno si dos países,  $i$  y  $j$ , son miembros de la UE en el año  $t$ , y es igual a cero en caso contrario. Así, la variable ACR incluye todos los demás acuerdos comerciales a excepción de la UE, que se contabiliza por separado. Este ajuste se debe a cuatro razones. En primer lugar, el impacto de la pertenencia a la UE en el comercio ha sido de gran interés tanto para los académicos como para los responsables políticos. En segundo lugar, se espera que el impacto de la UE sea diferente o más fuerte que los efectos de otros ACR.<sup>6</sup> En tercer lugar, se trata de un ejemplo de cómo aislar los efectos de distintos acuerdos comerciales. En cuarto lugar, desde el punto de vista de los métodos, la UE es un ejemplo de un grupo de muchos países fuertemente integrados, lo que, de acuerdo con lo expuesto en la sección teórica, significa que los costes del comercio multilateral pueden tener implicaciones significativas para estimar los efectos de la UE.

El análisis empírico de esta sección se realizará en Stata y la sección incluye todos los comandos necesarios para obtener los resultados, además de alguna motivación e interpretación de las conclusiones. Un único archivo 'do', que combina todos los comandos de esta sección, junto con el conjunto de datos que se utiliza para las estimaciones, está disponible en [https://yotoyotov.com/Gravity\\_Undergrads.html](https://yotoyotov.com/Gravity_Undergrads.html). Es importante destacar que los comandos de estimación que se introducirán en esta sección son fáciles de implementar en otros paquetes estadísticos estándar (¡y gratuitos!). Por lo tanto, deberían estar al alcance de cualquier estudiante universitario avanzado. Para facilitar aún más la accesibilidad, el sitio web incluye los datos y el código utilizados en esta sección también en R.

**Los datos de gravedad.** Para acompañar este capítulo, se ha compilado la base de datos 'Gravity for Undergraduates' (GU), que se nutre de los datos más recientes (a marzo de 2025) sobre comercio, política y gravedad que están a disposición de académicos y responsables políticos. Por tanto, los datos para el análisis empírico de esta sección y de las preguntas prácticas del final del capítulo son apropiados para el análisis de políticas y proyectos de investigación. El conjunto de datos GU incluye variables agregadas de comercio y variables de gravedad para los 100 mayores exportadores del mundo, que cubren el 98,9% de las exportaciones mundiales, el 97,7% de las importaciones mundiales y el 98,3% del PIB mundial entre 1990-2023. La siguiente lista incluye las variables que se emplean en el análisis de esta sección, junto con una breve descripción y las fuentes de datos. El resto de las variables se discutirán en la sección de Actividades Prácticas al final del capítulo.

Exporter	Código ISO del país del exportador $i$ . variable ID.
Importer	Código ISO del país del importador $j$ . Variable ID .
Year	Año $t$ , comprendido entre 1990 y 2023. Variable ID .
Trade	Flujos comerciales bilaterales agregados entre $i$ y $j$ en el año $t$ en dólares estadounidenses nominales/corrientes. Fuente: Base de datos UN COMTRADE, <a href="https://comtradeplus.un.org/">https://comtradeplus.un.org/</a> .
Distance	Distancia ponderada por población en kilómetros entre $i$ y $j$ . Fuente: Base de datos USITC DGD, <a href="https://www.usitc.gov/data/gravity/dgd.htm">https://www.usitc.gov/data/gravity/dgd.htm</a> .
RTA	Indicador de la presencia de un Acuerdo Comercial Regional (RTA por sus siglas en inglés) entre $i$ y $j$ en el año $t$ . Fuente: Base de datos de Mario Larch, <a href="https://www.ewf.uni-bayreuth.de/en/research/RTA-data/">https://www.ewf.uni-bayreuth.de/en/research/RTA-data/</a> .
EU	Indicador de que los países $i$ y $j$ son miembros de la Unión Europea en el año $t$ . Fuente: El autor. Basado en datos de la Comisión Europea.
GDP_Exporter	PIB del exportador $i$ en el año $t$ en dólares estadounidenses nominales/corrientes Fuente: Base de datos WDI del Banco Mundial, <a href="https://datacatalog.worldbank.org/home">https://datacatalog.worldbank.org/home</a> .
GDP_Importer	PIB del importador $j$ en el año $t$ en dólares estadounidenses nominales/corrientes Fuente: Base de datos WDI del Banco Mundial, <a href="https://datacatalog.worldbank.org/home">https://datacatalog.worldbank.org/home</a> .

La Figura 6 ofrece un extracto de los datos del GU para tres países (Canadá, México y Estados Unidos) y tres años (1993-1995). Los datos muestran que el comercio entre estos tres países es grande, asimétrico y varía con el tiempo. Por construcción, la distancia para cada par es simétrica. La variable ACR es igual

<sup>6</sup>Las actividades de práctica al final del capítulo incluyen más ejemplos.

a uno para el comercio entre Canadá y EE.UU. en todos los años, debido al acuerdo comercial Canadá-EE.UU. de 1989, mientras que la variable ACR para EE.UU.-México y Canadá-México pasa de cero a uno en 1994, debido al Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN). La variable UE es siempre cero porque ninguno de estos países es miembro de la UE. Las variables del PIB reflejan la diferencia de tamaño entre los países. Por último, aunque no tendrá que crear y añadir efectos fijos explícitamente, la Figura 6 incluye cuatro ejemplos de efectos fijos. 'CAN\_exp\_1993' es el efecto fijo de exportador para Canadá en 1993, 'USA\_imp\_1995' es el efecto fijo de importador para EE.UU. en 1995, 'CAN\_MEX' es el efecto fijo de par de países para las exportaciones de Canadá a México y 'MEX\_CAN' es el efecto fijo de par de países para las exportaciones de México a Canadá.

**Figura 6: The Structure of the Gravity Data**

	Exporter	Importer	Year	Trade	Distance	RTA	EU	GDP_Exporter	GDP_Importer	CAN_exp_1993	USA_imp_1995	CAN_MEX	MEX_CAN
1	CAN	MEX	1993	9.882e+08	3472.085	0	0	5.791e+11	5.302e+11	1	0	1	0
2	CAN	MEX	1994	1.620e+09	3472.085	1	0	5.799e+11	5.536e+11	0	0	1	0
3	CAN	MEX	1995	1.374e+09	3472.085	1	0	6.060e+11	3.802e+11	0	0	1	0
4	CAN	USA	1993	1.136e+11	2134.945	1	0	5.791e+11	6.859e+12	1	0	0	0
5	CAN	USA	1994	1.319e+11	2134.945	1	0	5.799e+11	7.287e+12	0	0	0	0
6	CAN	USA	1995	1.483e+11	2134.945	1	0	6.060e+11	7.640e+12	0	1	0	0
7	MEX	CAN	1993	2.785e+09	3472.085	0	0	5.302e+11	5.791e+11	0	0	5.302e+11	1
8	MEX	CAN	1994	3.274e+09	3472.085	1	0	5.536e+11	5.799e+11	0	0	0	1
9	MEX	CAN	1995	3.901e+09	3472.085	1	0	3.802e+11	6.060e+11	0	0	0	1
10	MEX	USA	1993	4.072e+10	2492.907	0	0	5.302e+11	6.859e+12	0	0	0	0
11	MEX	USA	1994	5.033e+10	2492.907	1	0	5.536e+11	7.287e+12	0	0	0	0
12	MEX	USA	1995	6.275e+10	2492.907	1	0	3.802e+11	7.640e+12	0	1	0	0
13	USA	CAN	1993	8.804e+10	2134.945	1	0	6.859e+12	5.791e+11	0	0	0	0
14	USA	CAN	1994	1.002e+11	2134.945	1	0	7.287e+12	5.799e+11	0	0	0	0
15	USA	CAN	1995	1.098e+11	2134.945	1	0	7.640e+12	6.060e+11	0	0	0	0
16	USA	MEX	1993	4.832e+10	2492.907	0	0	6.859e+12	5.302e+11	0	0	0	0
17	USA	MEX	1994	5.481e+10	2492.907	1	0	7.287e+12	5.536e+11	0	0	0	0
18	USA	MEX	1995	5.397e+10	2492.907	1	0	7.640e+12	3.802e+11	0	0	0	0

**Fuente:** Base de datos 'Gravity for Undergrads'.

El extracto de la Figura 6 incluye 18 observaciones porque hay 3 países y cada uno de ellos exporta a otros dos países e importa de ellos en cada uno de los tres años; es decir,  $(3 \text{ países}) \times (2 \text{ socios}) \times (3 \text{ años}) = 18$ . Así pues, si se dispusiera de datos para todos los pares y todos los años, el número de observaciones del conjunto de datos GU sería  $100 \times 99 \times 34 = 336,600$ . Sin embargo, los datos de GU no están totalmente equilibrados porque algunos países, por ejemplo, las antiguas repúblicas soviéticas, no eran independientes a principios de la década de 1990 y sus datos sobre comercio y PIB sólo están disponibles para años posteriores. Como resultado, el número de observaciones en el conjunto de datos GU es de 320,920.

Antes de proceder con el análisis econométrico, necesitamos transformar algunas de las variables (comercio, distancia y PIB) en forma logarítmica. Esto se consigue mediante el siguiente código de Stata:

```
generate ln_trade=ln(Trade)
generate ln_dist=ln(Distance)
generate ln_gdp_exp=ln(GDP_Exporter)
generate ln_gdp_imp=ln(GDP_Importer)
```

**Estimación de la gravedad básica ('naive').** La siguiente línea de comandos de Stata obtiene las estimaciones de gravedad más 'tradicionales' (pero 'naive') a partir de una especificación MCO simple, que corresponde a la ecuación (5):

```
regress ln_trade ln_dist RTA EU ln_gdp_exp ln_gdp_imp if Year==2023
```

Los elementos de esta línea de estimación incluyen: 'regress' – el comando estándar de Stata para estimar

MCO; 'ln\_trade' – la variable dependiente; 'ln\_dist', 'RTA', 'EU', 'ln\_gdp\_exp', and 'ln\_gdp\_imp' – las variables independientes. Por último, la condición 'if year==2023' garantiza que la estimación se realice para un único año, 2023, que puede cambiarse por cualquier otro año de los datos; es decir, cualquier año entre 1990 y 2023.

Las estimaciones de esta especificación figuran en la columna (1) del cuadro 1. En general, los resultados son los esperados. Destacan cinco conclusiones. En primer lugar, la estimación del efecto de la distancia en el comercio es negativa y estadísticamente significativa, lo que implica que un aumento del 1% en la distancia provocará una disminución del 1.179 % en el comercio. En segundo lugar, las estimaciones del efecto de los ACR y de la UE son positivas y estadísticamente significativas. La estimación de los ACR implica que, en igualdad de condiciones, los ACR han dado lugar a un aumento del 94 % (calculado como  $[\exp(0.664) - 1] \times 100 = 94.25$ ) del comercio entre los miembros del ACR. En tercer lugar, quizás no resulte sorprendente dado que la UE es un esfuerzo de integración muy profundo, el efecto de la UE sobre el comercio es aún mayor (utilizando como ejemplo el cálculo del impacto de los ACR, ¿podría el lector o lectora calcular el aumento del comercio debido a la UE entre los miembros de la UE?) En cuarto lugar, las estimaciones de gran magnitud, positivas y estadísticamente significativas de los efectos del PIB, tanto del lado del importador como del exportador, confirman la fuerte relación positiva entre tamaño y comercio. Por último, con una  $R^2 = 0.64$ , el modelo de gravedad 'naive' ofrece un ajuste sólido incluso con sólo 5 variables explicativas estándar.

**Cuadro 1: Evolución de las estimaciones de gravedad**

	(1) Naive Gravity	(2) Structural Gravity	(3) Panel Gravity	(4) HDFE Gravity	(5) Multiplicative Gravity
ln_dist	-1.179 (0.032)**	-1.473 (0.034)**	-1.583 (0.006)**		
RTA	0.664 (0.049)**	0.236 (0.051)**	0.147 (0.010)**	0.103 (0.013)**	0.076 (0.012)**
EU	0.900 (0.112)**	-0.261 (0.117)*	-0.526 (0.022)**	0.427 (0.030)**	0.273 (0.024)**
ln_gdp_exp	1.352 (0.015)**				
ln_gdp_imp	1.143 (0.015)**				
Constant	-37.864 (0.600)**				
<i>N</i>	9564	9564	288085	288085	320920
<i>R</i> <sup>2</sup>	0.643	0.759	0.772	0.897	

**Fuente:** El autor. Errores estándar en paréntesis. +  $p < 0.10$ , \*  $p < .05$ , \*\*  $p < .01$ . Ver el texto principal del capítulo para más detalles sobre cada especificación.

**Estimación de la gravedad estructural.** Realizamos dos cambios en la línea de estimación anterior para estimar el modelo de gravedad estructural (6):

```
reghdfe ln_trade ln_dist RTA EU if Year==2023, absorb(Exporter Importer)
```

En primer lugar, utilizamos el comando 'reghdfe'.<sup>7</sup> Aunque es correcto utilizar el comando estándar 'regress' de la especificación anterior, aquí se prefiere el comando 'reghdfe', porque permite manejar fácilmente muchos efectos fijos, que es el segundo cambio que implementamos en la línea de estimación. Concretamente, el uso de la opción 'absorb (Exporter Importer)' significa que la estimación se realiza con

<sup>7</sup>El comando 'reghdfe' y el otro comando rápido para estimaciones con efectos fijos de alta dimensión ('ppmlhdfe'), que se utilizarán en este capítulo se deben a Correia, 2016 y Correia et al., 2020, respectivamente.

efectos fijos de 'Exportador' e 'Importador', que controlarán cualquier característica observable y no observable del lado del exportador (por ejemplo, el valor de la producción) y del lado del importador (por ejemplo, el gasto), así como los costes comerciales multilaterales que pueden afectar al comercio bilateral. Así pues, los nuevos resultados de la estimación, que aparecen en la columna (2) del Cuadro 1, ya no incluyen las estimaciones de los efectos del PIB sobre el comercio.<sup>8</sup>

Hay cuatro diferencias notables entre las estimaciones de las columnas (1) y (2). En primer lugar, la estimación del impacto de la distancia en la columna (2) sigue siendo negativa y estadísticamente significativa. No obstante, es mayor en valor absoluto. En segundo lugar, la estimación de la UE es mucho menor, de hecho, negativa. Este resultado es coherente con el análisis de las implicaciones teóricas de los costes comerciales multilaterales de la sección anterior. En concreto, tal y como predice la teoría, una vez que se tienen en cuenta los costes del comercio multilateral, el impacto de la UE es mucho menor. En tercer lugar, vemos que la estimación del ACR también es menor. Sin embargo, sigue siendo positiva y estadísticamente significativa. Por último, la  $R^2$  de la columna (2) es mayor. Esto, por supuesto, es lo esperado y se debe al uso de los efectos fijos del exportador y del importador, que tienen en cuenta todos los determinantes observables e inobservables de los flujos comerciales en el lado del exportador y del importador, respectivamente.

**Estimación de la gravedad de panel.** Realizamos dos cambios en la línea de estimación anterior para obtener estimaciones de gravedad de panel que se correspondan con la Ecuación (7):

```
reghdfe ln_trade ln_dist RTA EU, absorb(Exporter#Year Importer#Year)
```

En primer lugar, eliminamos la declaración 'if year==2023', porque queremos utilizar todos los años disponibles en la base de datos. En segundo lugar, permitimos que los efectos fijos del modelo econométrico también varíen en el tiempo; es decir, ahora utilizamos efectos fijos en el tiempo del exportador (Exporter#Year) y efectos fijos en el tiempo del importador (Importer#Year). Obsérvese que las dimensiones de los efectos fijos en la configuración de panel son coherentes con la teoría del modelo de gravedad de panel (3), en el que las variables específicas del exportador y del importador (es decir, las variables de tamaño del país y los costes comerciales multilaterales) también varían con el tiempo.

Las estimaciones de panel se presentan en la columna (3) del Cuadro 1. Por una parte, observamos que, como era predecible, el número de observaciones ( $N$ ) en la columna (3) es significativamente mayor. Por otra parte, debido al uso de más datos, los errores estándar de la columna (3) son menores. La estimación del efecto de la distancia es comparable al resultado correspondiente de la sección transversal de la columna (2). La estimación del efecto de los ACR es menor, pero sigue siendo positiva y estadísticamente significativa. Sin embargo, la estimación de la UE en la columna (3) es grande, negativa y estadísticamente significativa. Este resultado es muy sorprendente desde una perspectiva política, pero no lo es desde el punto de vista de los métodos. La explicación reside en que esta especificación de panel omite muchos costes comerciales bilaterales potencialmente importantes. Este problema se resuelve en la siguiente especificación.

**Estimación de la gravedad HDFE.** El siguiente ajuste del modelo de gravedad de panel consiste en introducir efectos fijos de par de países. Esto se hace fácilmente en la opción 'absorb' de nuestro comando de estimación, donde, además de los efectos fijos exportador-tiempo e importador-tiempo, añadimos ahora efectos fijos par-país - 'Importer#Exporter'. La línea de estimación correspondiente se convierte en:

```
reghdfe ln_trade RTA EU, absorb(Exporter#Year Importer#Year Importer#Exporter)
```

Obsérvese que ya no aparece la variable 'ln\_dist' en la nueva línea de estimación. La razón es que, una vez introducidos los efectos fijos de par de países, estos absorberán y controlarán plenamente todos los

<sup>8</sup>Una vez incluidos los efectos fijos, la estimación de la constante pierde su interpretación estándar. Por lo tanto, también se omite.

posibles costes del comercio bilateral invariables en el tiempo, incluida la distancia. En la medida en que gran parte de los costes del comercio bilateral están determinados por la geografía, los efectos fijos de par de países son herramientas econométricas muy potentes para controlar muchas variables que no pueden medirse fácilmente o incluso observarse. Esto nos permitirá centrarnos en las variables de política económica de interés, por ejemplo, la UE y los ACR en nuestro caso, que también son bilaterales pero varían con el tiempo. Si el interés se centra en los efectos de los determinantes de los flujos comerciales que no varían con el tiempo (por ejemplo, la distancia, las fronteras contiguas, el idioma común, etc.), no se pueden utilizar los efectos fijos de los pares de países, ya que su inclusión impide dicha estimación. Este tipo de análisis se incluye en las actividades prácticas del final del capítulo.

Las estimaciones de la gravedad con efectos fijos por pares se presentan en la columna (4) del Cuadro 1. Esta especificación conduce a una estimación muy diferente del efecto UE. En concreto, la estimación del impacto de la UE es ahora de una gran magnitud, positiva y estadísticamente significativa, como cabía esperar. La estimación del ACR es algo menor que antes, pero sigue siendo positiva y estadísticamente significativa. Como se ha señalado anteriormente, la explicación de los cambios en las estimaciones de las variables asociadas a las políticas económicas es que nuestras especificaciones anteriores han omitido algunas variables independientes clave que no varían con el tiempo, que ahora están totalmente controladas por los efectos fijos del par de países. Así pues, siempre que el objeto de interés sea el efecto de las variables de política bilateral (por ejemplo, ACR, pertenencia a la UE, aranceles, sanciones, etc.), la especificación con efectos fijos de par de países es muy recomendable. El uso de los efectos fijos por pares de países ha dado lugar a un aumento adicional del ajuste global del modelo, tal y como refleja  $R^2 = 0.9$ .

**Estimación de la gravedad multiplicativa.** En nuestra última especificación, estimamos el modelo de gravedad en forma multiplicativa. La línea de estimación correspondiente se convierte en:

```
ppmlhdfc Trade RTA EU, absorb(Exporter#Year Importer#Year Importer#Exporter)
```

Los dos sencillos ajustes que nos permiten estimar la gravedad de forma multiplicativa son (i) sustituir el comando 'reghdfe' por el comando 'ppmlhdfc' y (ii) utilizar los flujos comerciales en niveles: 'Trade' en lugar del logaritmo de los flujos comerciales 'ln\_trade'. El nuevo comando 'ppmlhdfc' refleja el hecho de que utilizaremos el estimador multiplicativo PPML en lugar del estimador MCO. El estimador PPML se ha establecido como el estimador estándar para la ecuación de gravedad. Ello se debe a que tiene una serie de ventajas econométricas en comparación con el MCO, incluido el hecho de que, debido a su forma multiplicativa, PPML es capaz de tener en cuenta los flujos comerciales nulos presentes en los datos.<sup>9</sup> Es importante destacar que la interpretación de las estimaciones sigue siendo la misma cuando se obtienen con PPML. Además, gracias a los recientes avances computacionales, el estimador PPML es robusto y rápido.

El último conjunto de estimaciones de la gravedad aparece en la columna (5) del Cuadro 1. El modelo de gravedad multiplicativo arroja una estimación del ACR de 0,076, lo que implica que, *ceteris paribus*, la entrada en vigor de los ACR durante el período de estudio se asocia con un aumento de aproximadamente el 8 % en el comercio entre los países miembros. La estimación de la UE implica un efecto positivo sobre el comercio entre sus miembros de alrededor del 31 %. Las estimaciones de ambas variables políticas pueden parecer un poco pequeñas, sin embargo, hay que tener en cuenta varios aspectos. En primer lugar, dado el uso de efectos fijos por pares de países, nuestras estimaciones sólo recogen los efectos de los ACR que entraron después de 1990 y los debidos a los miembros de la UE que se adhirieron después de 1990. En segundo lugar, los efectos tanto de la UE como de los ACR pueden ser muy heterogéneos. En el caso de los ACR, esto se demuestra en la sección de actividades prácticas al final del capítulo. Por último, obsérvese que en la columna (5) no aparece el  $R^2$ .<sup>10</sup> En su lugar, para calibrar el ajuste general del modelo, el lector o lectora debe remitirse a la Figura 2, que se obtiene a partir de las estimaciones de esta especificación.

<sup>9</sup>Ver Santos Silva y Tenreyro, 2006 y Larch et al., 2025 para discusiones detalladas de las atractivas propiedades de PPML para estimaciones de gravedad.

<sup>10</sup>La razón es que el estimador PPML no lineal produce un 'pseudo- $R^2$ ' que no es comparable a las  $R^2$ s de las especificaciones OLS anteriores. Véase <https://www.statalist.org/forums/forum/general-stata-discussion/general/1528609-ppmlhdfc-pseudo-r2>.

---

**Una consideración final.** Si entiende el significado, la motivación y las implicaciones de cada uno de los elementos de la especificación del modelo de gravedad multiplicativo que acabamos de analizar, entonces usted ha recorrido un largo camino y debería estar muy orgulloso de sí mismo. Como se demostrará en la sección de actividades prácticas, con sólo añadir las variables independientes correspondientes a esta línea de estimación, podrá estimar los efectos de muchas políticas bilaterales variables en el tiempo (por ejemplo, sanciones, uniones aduaneras, etc.) sobre el comercio. Además, si está interesado en los efectos de algún determinante invariable en el tiempo de los flujos comerciales (por ejemplo, la distancia, los vínculos coloniales, el idioma oficial común, etc.), puede incluir estas variables en lugar de utilizar los efectos fijos del par de países. En general, a estas alturas usted debería estar muy bien equipado para estudiar el impacto de muchas políticas en los flujos comerciales con un modelo empírico de gravedad moderno.

Antes de concluir, hay un último elemento del modelo econométrico de gravedad que no hemos mencionado. Este elemento está relacionado con el tratamiento de los errores estándar en las estimaciones del modelo de gravedad y no se ha tratado antes por tres razones. En primer lugar, el tema es quizá demasiado avanzado para la finalidad del presente capítulo. En segundo lugar, no existen prácticas firmemente establecidas para abordar esta cuestión. En tercer lugar, las estimaciones de los coeficientes de las variables independientes no cambiarán, mientras que los errores estándar correspondientes pueden aumentar o disminuir. Por lo tanto, sin entrar en detalles, mi recomendación es seguir una de las prácticas más utilizadas para tratar los errores estándar simplemente añadiendo la opción 'cluster(Exporter#Importer)' al final de la línea de código que se corresponde con el modelo de gravedad. Dado que los econométricos académicos más destacados aún no se han puesto de acuerdo al respecto, no debe preocuparse por ello y, si le preguntan por qué ha realizado este ajuste, puede responder simplemente '¡Échele la culpa a Yotov!'.

# Referencias

- Anderson, J. (1979). A Theoretical Foundation for the Gravity Equation. *American Economic Review*, 69(1), 106-116.
- Anderson, J. (2011). The Gravity Model. *Annual Review of Economics*, 3, 133-160.
- Anderson, J. E., & van Wincoop, E. (2003). Gravity with Gravitas: A Solution to the Border Puzzle. *American Economic Review*, 93(1), 170-192.
- Arkolakis, C., Costinot, A., & Rodriguez-Clare, A. (2012). New Trade Models, Same Old Gains? *American Economic Review*, 102(1), 94-130.
- Baldwin, R. E., & Taglioni, D. (2006). Gravity for Dummies and Dummies for Gravity Equations. *NBER Working Paper No. 12516*.
- Correia, S. (2016). A Feasible Estimator for Linear Models with Multi-Way Fixed Effects. *unpublished manuscript available at <http://scoreia.com/research/hdfe.pdf>*.
- Correia, S., Guimarães, P., & Zylkin, T. (2020). Fast Poisson Estimation with High-Dimensional Fixed Effects. *The Stata Journal*, 20(1), 95-115. <https://doi.org/10.1177/1536867x20909691>
- Eaton, J., & Kortum, S. (2002). Technology, Geography and Trade. *Econometrica*, 70(5), 1741-1779.
- Frankel, J., & Romer, D. (1999). Does Trade Cause Growth? *American Economic Review*, 89(3), 379-399.
- Krugman, P. (1995). Increasing returns, imperfect competition and the positive theory of international trade. En G. M. Grossman & K. Rogoff (Eds.), *Handbook of International Economics* (1.<sup>a</sup> ed., pp. 1243-1277, Vol. 3).
- Larch, M., Shikher, S., & Yotov, Y. (2025, enero). *Estimating Gravity Equations: Theory Implications, Econometric Developments, and Practical Recommendations* (Working Papers N.º 2025001). Center for Global Policy Analysis, LeBow College of Business, Drexel University. <https://ideas.repec.org/p/drx/wpaper/2025001.html>
- Ravenstein, E. (1885). The Laws of Migration: Part 1. *Journal of the Statistical Society of London*, 48(2), 167-235.
- Rose, A. K. (2000). One money, one market: the effect of common currencies on trade. *Economic Policy*, 15(30), 08-45.
- Santos Silva, J., & Tenreyro, S. (2006). The Log of Gravity. *Review of Economics and Statistics*, 88(4), 641-658.
- Tinbergen, J. (1962). *Shaping the World Economy: Suggestions for an International Economic Policy*. The Twentieth Century Fund.
- Yotov, Y. V. (2024). The evolution of structural gravity: The workhorse model of trade. *Contemporary Economic Policy*, 42(4), 578-603.
- Yotov, Y. V., Piermartini, R., Monteiro, J.-A., & Larch, M. (2016). *An Advanced Guide to Trade Policy Analysis: The Structural Gravity Model*. UNCTAD; WTO.

## Cuestiones Prácticas

Las preguntas de práctica de esta sección se han diseñado con los siguientes objetivos. En primer lugar, reforzar el material y las herramientas que se han tratado en el capítulo. Segundo, practicar y ampliar sus habilidades de uso de programas estadísticos. En tercer lugar, proporcionar más aplicaciones centradas en casos reales de políticas económicas. Las preguntas están ordenadas de menor a mayor dificultad. Cada pregunta es independiente y puede/debe resolverse como tal. Algunas de las preguntas están divididas en partes y la solución a cada una de ellas requiere sólo un par de líneas de código. La base de datos 'Gravity for Undergraduates' es la única fuente de datos se necesita para resolver todas las preguntas.

**1. Física y Comercio.** Utilice los PIB del exportador y del importador y la variable Distancia para el año 2023 del conjunto de datos GU para construir el comercio según el modelo de gravedad comercial ingenuo (1) del Capítulo. En consonancia con la literatura comercial existente, suponga que la elasticidad del comercio con respecto a la distancia es  $\theta = -1$ . Además, como le interesará la correlación entre los flujos comerciales construidos y los reales, suponga que la constante de gravedad comercial es  $\tilde{G} = 1$ . Correlacione los flujos comerciales calculados a partir del modelo de gravedad básico ('naive') y los flujos comerciales reales de los datos. ¿Cuál es el coeficiente de correlación? Compara ahora las medias de las dos variables. ¿Qué puede explicar las diferencias?

**2. Estimaciones de corte transversal a lo largo del tiempo.** Utilice la base de datos GU para estimar el modelo de 'gravedad naive' de la sección 4 del capítulo (es decir, la especificación de la columna (1) del cuadro 1) para los años 1990, 2000, 2010 y 2020. Analice la evolución temporal de las estimaciones de las cinco variables de gravedad. (Sugerencia: puede estimar 4 ecuaciones separadas o puede escribir un código que ejecute un bucle).

**3. Las variables de gravedad estándar.** El logaritmo de la distancia bilateral, la presencia de fronteras contiguas, la lengua oficial común y las relaciones coloniales son las cuatro variables sustitutivas de los costes comerciales invariantes en el tiempo más utilizadas en la literatura comercial. En esta pregunta, utilizará la base de datos GU para estimar los efectos de estas variables de gravedad 'estándar' sobre el comercio.

3.a. Empiece con el modelo de 'Gravedad Multiplicativa' de la Sección 4 del Capítulo (es decir, la especificación de la columna (5) de la Tabla 1) y añada las variables 'ln\_dist', 'Contiguous\_Border', 'Common\_Language', y 'Colonial\_Ties' directamente a esta especificación. ¿Puede identificar los efectos de estas variables? ¿Por qué?

3.b. Ahora estime la misma especificación pero sin los efectos fijos de par de países. ¿Cuál es el elemento que añade los efectos fijos de par de países en su especificación? Elimínelo. ¿Obtiene estimaciones de las nuevas covariables de la parte 3.a.? Interprete las nuevas estimaciones en términos de signo y magnitud.

**4. Los efectos de las 'Uniones Aduaneras'.** Las uniones aduaneras son una forma de ACR en la que los miembros del ACR también adoptan una política comercial exterior común, es decir, para el comercio con países no miembros. Así pues, las uniones aduaneras son ACR 'más profundos' y, como tales, se espera que promuevan el comercio más que los ACR. En esta pregunta, utilizará la base de datos GU para comprobar esta hipótesis.

4.a. Acceda a los datos GU y estime el modelo de 'Gravedad Multiplicativa' presentado en la Sección 4 del Capítulo (es decir, la especificación de la columna (5) de la Tabla 1) después de añadir la variable 'Customs\_Union'. Interprete la estimación de 'Customs\_Union'.

4.b. Dado que, por definición, las Uniones Aduaneras son ACR, la variable ACR ya incluye las Uniones Aduaneras. Por lo tanto, la estimación sobre 'Customs\_Union' de la parte 4.a. debe interpretarse como una desviación de la estimación sobre los ACR. Para obtener la estimación de los efectos de las Uniones Aduaneras en niveles, ponga la variable dummy ACR a cero cuando 'Customs\_Union' sea igual a uno. A continuación, vuelva a estimar el modelo de la parte 4.a. Compare las estimaciones de 'Customs\_Union'

---

de las partes 4.a. y 4.b. e interprete la nueva estimación.

**5. Los efectos de las 'sanciones comerciales'.** Las sanciones económicas tienen en la actualidad un papel muy relevante. En esta pregunta utilizará la base de datos GU para estimar los efectos de sanciones comerciales completas y aislará los efectos de las sanciones en Rusia.

5.a. Empiece con los datos de GU y estime el modelo de 'Gravedad Multiplicativa' de la Sección 4 del Capítulo (es decir, la especificación de la columna (5) de la Tabla 1) tras añadir la variable 'Trade\_Sanction'. Interprete y discuta la estimación de los efectos de las sanciones.

5.b. Empiece con la especificación anterior de la parte 5.a. y aisle el efecto de las sanciones sobre Rusia. Para ello, utilice la variable 'Trade\_Sanction' para construir una nueva variable para las sanciones a Rusia - 'Russia\_Sanction' - que toma un valor de uno si Rusia es parte de una sanción comercial y es igual a cero en caso contrario. A continuación, establezca la variable 'Trade\_Sanction' en cero cuando 'Russia\_Sanction' sea igual a uno y estime el modelo de la parte 5.a. después de añadir la variable 'Russia\_Sanction'. Interprete los resultados.

5.c. Aislar los efectos de las sanciones de 2022 a Rusia debido a su invasión de Ucrania. Para ello, divida la variable 'Russia\_Sanction' de la especificación anterior en dos variables: 'Russia\_Sanction\_Old' para las sanciones anteriores a 2022 y 'Russia\_Sanction\_New' para las sanciones impuestas en 2022. A continuación, estime el modelo de la parte 5.b. tras sustituir la variable 'Russia\_Sanction' por las dos nuevas variables para las sanciones a Rusia. Interprete sus resultados.

**6. Los efectos heterogéneos de los ACR.** La estimación única de ACR que se obtuvo en el capítulo puede ocultar una heterogeneidad significativa en los efectos de los ACR. En esta pregunta, utilizará la base de datos GU para explorar varias dimensiones de la heterogeneidad de los efectos de los ACR.

6.a. Abra la base de datos de GU y estime el modelo de 'Gravedad Multiplicativa' de la Sección 4 del Capítulo (es decir, la especificación de la columna (5) de la Tabla 1) después de permitir que los efectos de los ACR sean diferentes para los periodos 1990-1999, 2000-2009 y 2010-2023. (Sugerencia: debe dividir la variable única ACR en tres variables ACR, una para cada periodo). Interprete los resultados.

6.b. Utilice el modelo de 'Gravedad Multiplicativa' de la Sección 4 del Capítulo (es decir, la especificación de la columna (5) de la Tabla 1) y aisle los efectos del TLC Australia-China (ChAFTA) a partir de 2015. Para ello, construya una variable dummy ChAFTA, que tome un valor de 1 para el comercio entre Australia y China en los años posteriores a 2014. A continuación, añada esta variable al modelo de 'Gravedad Multiplicativa'.

6.c. La especificación de 6.b. ofrece una estimación del ChAFTA como desviación del efecto de los ACR. La razón es que la variable del ACR incluye el ChAFTA. Para obtener una estimación del efecto completo del ChAFTA, fije la variable del ACR en cero cuando el ChAFTA sea igual a uno. A continuación, estime de nuevo la especificación de la parte 6.b. Compare las estimaciones del ChAFTA de las dos especificaciones e interprete la nueva estimación del ChAFTA.

6.d. Compruebe si los efectos del ChAFTA son asimétricos. (Sugerencia: divida la variable ChAFTA en dos variables en función de la dirección de los flujos comerciales; es decir, de Australia a China y de China a Australia. A continuación, utilice estas dos variables en lugar de la variable ChAFTA en la especificación anterior y compare sus estimaciones).