

---

# Metodología

Modelo de gravedad estructural para evaluar políticas comerciales basado en el documento de WTO y UN: "Advanced Guide to Trade Policy Analysis: The Structural Gravity Model"

# 1. Introducción

El comercio internacional desempeña un papel crucial en la configuración de las economías modernas, impulsando el crecimiento, la innovación y la interconexión global. En este contexto, la formulación de políticas comerciales eficaces requiere herramientas analíticas sofisticadas que puedan capturar la complejidad de las interacciones económicas a nivel mundial. Una de esas herramientas es el modelo de gravedad estructural, que se ha establecido como un pilar en el análisis de comercio debido a su robustez teórica y su aplicabilidad empírica. Este documento tiene como propósito presentar una metodología avanzada basada en el modelo de gravedad estructural para evaluar las implicaciones de cambios en las políticas comerciales, específicamente en el contexto de la eliminación de barreras comerciales entre países.

## Objetivo del documento

El principal objetivo de este documento es explorar y detallar la metodología que subyace al análisis de políticas comerciales mediante el uso del modelo de gravedad estructural dentro de un marco de equilibrio general. Al hacerlo, buscamos proporcionar una guía comprensiva para entender cómo la eliminación o modificación de barreras comerciales puede afectar las dinámicas del comercio internacional, así como las economías de los países involucrados. Este enfoque metodológico no solo permite predecir los flujos comerciales bilaterales resultantes, sino que también arroja luz sobre las consecuencias más amplias para el bienestar económico.

# 2. Fundamentos Teóricos

## 2.1. Modelo de Gravedad Estructural

La teoría del modelo de gravedad en el comercio internacional se basa en una analogía con la ley de gravitación universal de Newton, que postula que cualquier partícula en el universo atrae a cualquier otra partícula con una fuerza que es directamente proporcional al producto de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellas. Aplicada al comercio internacional, esta ley sugiere que, al igual que las partículas se atraen mutuamente en proporción a sus tamaños y proximidad, los países comercian en proporción a sus respectivos tamaños de mercado (por ejemplo, los productos internos brutos) y proximidad.

Inicialmente, las aplicaciones de la ley de gravedad de Newton a la economía no estaban basadas en una teoría económica formal. Ejemplos prominentes incluyen a Ravenstein (1885) y Tinbergen (1962), quienes utilizaron la gravedad para estudiar flujos de inmigración y comercio, respectivamente. Anderson (1979) fue el primero en ofrecer una base teórica económica para la ecuación de gravedad bajo las suposiciones de diferenciación de productos por lugar de origen y gastos con Elasticidad Constante de Sustitución (CES).

La teoría estructural de gravedad en economía ha sido influenciada significativamente por los trabajos de Eaton y Kortum (EK) (2002), quienes derivaron la gravedad en el lado de la oferta como una estructura ricardiana con bienes intermedios, y Anderson y van Wincoop (2003), quienes popularizaron el modelo Armington-CES de Anderson (1979) y enfatizaron la importancia de los efectos de equilibrio general de los costos comerciales.

La ley de gravedad en el comercio internacional se expresa mediante la ecuación de gravedad estructural, que predice que el comercio (fuerza gravitacional) 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.

El sistema de gravedad estructural se describe mediante las siguientes ecuaciones clave:

$$X_{ij} = \frac{Y_i E_j}{Y} \left( \frac{T_{ij}}{\Pi_i P_j} \right)^{-\sigma} \quad (2.1)$$

donde:

- $X_{ij}$  representa el flujo comercial del país  $i$  al país  $j$ ,
- $Y_i$  y  $E_j$  son la producción total del país  $i$  y el gasto total del país  $j$ , respectivamente,
- $Y$  es el producto interno bruto mundial,
- $T_{ij}$  denota los costos comerciales bilaterales entre  $i$  y  $j$ ,
- $\Pi_i$  y  $P_j$  son las resistencias multilaterales externas e internas, respectivamente,
- $\sigma$  es la elasticidad de sustitución entre bienes importados y domésticos.

Esta ecuación es fundamental para el análisis del comercio internacional a través del modelo de gravedad estructural, integrando tanto las características económicas de los países como las políticas y fricciones comerciales.

Las resistencias multilaterales se calculan como sigue:

$$\Pi_i^{-\sigma} = \sum_j T_{ij}^{-1} \left( \frac{E_j}{P_j} \right)^{1-\sigma} \quad (2.2)$$

$$P_j^{1-\sigma} = \sum_i T_{ij}^{-1} \left( \frac{Y_i}{\Pi_i} \right)^{1-\sigma} \quad (2.3)$$

Estas ecuaciones representan, respectivamente, las resistencias multilaterales externas e internas.

Estas capturan cómo las barreras al comercio y las políticas afectan los costos de exportación e importación para los países, influyendo así en los flujos comerciales globales.

Dada la naturaleza multiplicativa de la ecuación estructural de gravedad, y asumiendo que se sostiene en cada período de tiempo  $t$ , es posible log-linearizarla y expandirla con un término de error aditivo,  $\epsilon_{ij,t}$ :

$$\ln(X_{ij,t}) = \ln(E_{j,t}) + \ln(Y_{i,t}) - \ln(Y_t) - (1 - \sigma) \ln(t_{ij,t}) - (1 - \sigma) \ln(P_{j,t}) - (1 - \sigma) \ln(\Pi_{i,t}) + \epsilon_{ij,t} \quad (2.4)$$

Esta es la versión más popular de la ecuación empírica de gravedad y ha sido utilizada rutinariamente en la literatura de comercio para estudiar los efectos de diversos determinantes del comercio bilateral. Cientos de trabajos han utilizado la ecuación de gravedad para estudiar los efectos de la geografía, demografía, acuerdos comerciales, tarifas arancelarias, subvenciones a las exportaciones, embargos, sanciones comerciales, membresía en la Organización Mundial del Comercio, uniones monetarias, ayuda extranjera, inmigración, inversión extranjera directa, lazos culturales, confianza, reputación, eventos deportivos importantes (Juegos Olímpicos y Copa Mundial), casquetes polares deritiéndose, etc., sobre el comercio internacional.

## 2.2. De Equilibrio Parcial a General

### 2.2.1. El Modelo de Equilibrio General

El modelo de equilibrio general (EG), es un marco analítico utilizado en economía para estudiar cómo diferentes mercados y agentes económicos interactúan entre sí dentro de una economía. A diferencia de los modelos de equilibrio parcial, que se centran en un solo mercado o sector aislado, los modelos de equilibrio general consideran todas las interacciones significativas entre múltiples mercados y sectores, permitiendo un análisis más completo y coherente de la economía como un todo.

Estos modelos buscan explicar cómo se determinan simultáneamente los precios y cantidades de equilibrio de todos los bienes y servicios, así como los factores de producción en una economía. Al hacerlo, toman en cuenta la forma en que las decisiones en un mercado afectan y son afectadas por decisiones en otros mercados, reconociendo la interdependencia entre los mercados.

Al aplicar un modelo de EG al análisis de política comercial, se pueden simular diferentes escenarios y evaluar los efectos potenciales de diversas políticas comerciales, facilitando la toma de decisiones informadas sobre cómo estas políticas podrían promover objetivos económicos deseados o afectar negativamente a ciertos sectores o grupos dentro de la economía.

### 2.2.2. Integración de la Gravedad Estructural en el Análisis de GE

La integración del modelo de gravedad estructural en análisis de equilibrio general (GE) representa un avance significativo en la comprensión de las políticas comerciales y sus efectos sobre la economía global. Este enfoque permite analizar cómo las políticas comerciales y las barreras al comercio, incluidas las medidas arancelarias y no arancelarias, influyen en los flujos comerciales bilaterales y, a su vez, afectan variables macroeconómicas como el bienestar económico, el empleo, los precios y la inversión.

El modelo de gravedad estructural, basado en la teoría de que el volumen de comercio entre dos países es proporcional al tamaño de sus economías y se reduce por las distancias y barreras comerciales, se integra en el marco de GE para abordar las interacciones complejas y los efectos de retroalimentación dentro de un sistema económico interconectado globalmente. Esto permite evaluar no solo los efectos directos de las políticas comerciales en los flujos comerciales sino también sus impactos indirectos en la economía en su conjunto, incluyendo sectores y mercados que pueden no estar directamente involucrados en el comercio.

## 3. Metodología Analítica

### 3.1. Gravedad Estructural: Contexto de Equilibrio General

El análisis de Equilibrio General aplicado mediante el modelo de gravedad estructural representa un avance metodológico con un enfoque que permite una exploración detallada de cómo las políticas comerciales y otros cambios en el entorno económico afectan las interacciones comerciales entre países en un sistema interconectado.

Con base en las ecuaciones (2.1), (2.2) y (2.3) podemos derivar el sistema de gravedad estructural.

$$X_{ij} = \frac{Y_i E_j}{Y} \left( \frac{T_{ij}}{\Pi_i P_j} \right)^{-\sigma} \quad (3.1)$$

$$\sum_j \left( \frac{T_{ij}}{P_j} \right)^{1-\sigma} E_j = Y_i \quad (3.2)$$

$$\sum_i \left( \frac{T_{ij}}{\Pi_i} \right)^{1-\sigma} Y_i = E_j \quad (3.3)$$

$$\frac{1}{\Pi_i^{1-\sigma}} = \frac{Y_i}{\alpha_i p_i} \quad (3.4)$$

$$E_i = \phi_i Y_i = \phi_i p_i Q_i \quad (3.5)$$

donde:  $X_{ij}$  denota los flujos comerciales nominales desde el exportador  $i$  al destino  $j$ ;  $E_j$  es el gasto total en el importador  $j$ ,  $Y_i$  es el valor de la producción total en el exportador  $i$ ;  $Y$  es el valor de la producción mundial;  $t_{ij}$  denota las fricciones comerciales bilaterales entre los socios  $i$  y  $j$ ;  $\sigma > 1$  es la elasticidad de sustitución entre bienes de diferentes países;  $\alpha_i$  es el parámetro de preferencia CES;  $P_j$  y  $\Pi_i$  son términos estructurales definidos por Anderson y van Wincoop (2003) como las resistencias multilaterales internas y externas, respectivamente;  $p_i$  es el precio de fábrica para cada variedad de bienes en el país de origen  $i$ ;  $Q_i$  es la dotación o cantidad suministrada de cada variedad de bienes en el país  $i$ ; y  $\phi_i$  es un parámetro exógeno que define la relación entre el valor de la producción y el gasto agregado, de tal manera que cuando  $\phi_i > 1$ , el país  $i$  enfrenta un déficit comercial, mientras que el país  $i$  tiene un superávit comercial cuando  $1 > \phi_i > 0$ .

Las resistencias multilaterales son clave para traducir los cambios de equilibrio parcial en los costos comerciales en efectos de política comercial de equilibrio general. Un shock de liberalización comercial bilateral se transmite a través de las resistencias multilaterales a lo largo de todo el sistema económico.

**Propiedades de las Resistencias Multilaterales** Las resistencias multilaterales, tanto externas  $\Pi_i$  como internas  $P_j$ , son fundamentales dentro del análisis de equilibrio general en la política comercial a través del modelo de gravedad estructural. Encapsulan cómo los costos comerciales influyen el intercambio entre países, subrayando que la lejanía o *remoteness* de dos naciones respecto al resto del mundo puede potenciar su comercio bilateral. Estos términos se presentan como agregados coherentes de todos los costos comerciales bilaterales y ofrecen una visión global de los efectos de cambios en las políticas comerciales sobre la economía mundial.

La construcción de las resistencias multilaterales se fundamenta en datos sobre producción, gasto, y en parámetros como la elasticidad de sustitución y los costos comerciales bilaterales. Estos términos no solo facilitan la descomposición de los costos comerciales en productores y consumidores, sino que también se convierten en herramientas útiles para el análisis detallado de los efectos de las políticas comerciales.

Cabe destacar que, según Anderson y Yotov (2010b), el sistema de ecuaciones solo se puede resolver para  $\{\Pi_i, P_j\}$  hasta un escalar ( $\lambda$ ), implicando que si  $\{\Pi_{i0}, P_{j0}\}$  es una solución, entonces también lo es  $\{\lambda\Pi_{i0}, P_{j0}/\lambda\}$ . Por lo tanto, se requiere una normalización. Independientemente de la elección de normalización, es importante recordar que los valores de todos los términos de resistencia multilateral (tanto internos como externos) solo se pueden resolver en términos relativos con respecto al país de elección. Hay al menos tres enfoques para resolver el sistema, no obstante para la presente metodología, nos enfocaremos en el uso del estimador PPML para recuperar directamente los efectos fijos del importador y exportador en el modelo de gravedad estructural.

**Efectos de Equilibrio General Condicional** Una limitación importante del análisis de equilibrio parcial de los efectos de la política comercial es que, por construcción, se asume que la política

comercial no tiene impacto en otros países (por ejemplo, los no participantes en un ALC). Esta limitación se supera con el modelo de gravedad estructural, que proporciona un marco de análisis de equilibrio general manejable a través de los canales de resistencia multilateral, además de los efectos de equilibrio parcial. Este escenario se califica como "condicional", porque se asume que el output ( $Y_i$ ) y el gasto ( $E_j$ ) permanecen sin cambios tras la liberalización comercial bilateral entre los países  $i$  y  $j$ . Sin embargo, este escenario también se etiqueta como de equilibrio general, porque permite que los efectos de la liberalización comercial entre dos países ( $i$  y  $j$ ) se propaguen al resto del mundo a través de los términos de resistencia multilateral de equilibrio general ( $\Pi_i$  y  $P_j$ ).

El análisis del *Equilibrio General Condicional* (EGC) tras la liberalización comercial entre dos países puede parecer superfluo a primera vista, pero este paso intermedio entre el análisis de *Equilibrio Parcial* y el *Equilibrio General Completo* posee significativos beneficios metodológicos y prácticos. En primer lugar, desde un enfoque educativo y teórico, el EGC nos permite comprender cómo los cambios en los costos comerciales bilaterales no solo afectan a los países involucrados directamente en la liberalización, sino que también repercuten en el sistema comercial global, modificando los costos comerciales y su incidencia en todos los países. Este entendimiento es esencial para captar la naturaleza interconectada de la economía mundial y la importancia de considerar las interacciones complejas entre los países al analizar las políticas comerciales.

El EGC combina los efectos directos de la liberalización con aquellos mediados por las resistencias multilaterales. Esta capacidad de descomponer los efectos de la liberalización en impactos separados sobre los costos comerciales y el tamaño económico facilita una interpretación más matizada de las consecuencias de diferentes políticas comerciales. Así mismo, el enfoque EGC permite la recuperación directa de índices de equilibrio general condicional a partir de estimaciones empíricas, como las obtenidas a través del método PPML.

Los efectos en los países liberalizadores y en los otros países en el escenario de equilibrio general condicional se discuten por separado. Los impactos de la liberalización comercial bilateral en los países liberalizadores se definen como *efectos de equilibrio general de primer orden*, porque son los más fuertes en magnitud. Inversamente, los impactos en los países no miembros se etiquetan como *efectos de equilibrio general de segundo orden*, porque son el resultado de cambios en las resistencias multilaterales de los países miembros.

Los efectos de equilibrio general condicional en los países miembros se materializan a través de dos canales diferentes: las resistencias multilaterales internas y las resistencias multilaterales externas. Ambos se presentan por separado a continuación.

**Efectos de Equilibrio General de Primer Orden a través de Resistencias Multilaterales Internas** Una parte de los efectos de equilibrio general de primer orden de la liberalización comercial en los países miembros se canaliza a través de la resistencia multilateral interna,  $P_j$ , lo que sugiere que:

1. Las resistencias multilaterales internas disminuirán para ambos países liberalizadores tras su liberalización comercial bilateral.

2. Los efectos para cada país liberalizador serán más fuertes cuanto mayor sea el tamaño del país socio.

La disminución en las resistencias multilaterales internas de cada país liberalizador siempre será menor en magnitud que la disminución en los costos comerciales bilaterales entre los dos países liberalizadores ( $\Delta t_{ij} > \Delta P_i$ ).

**Efectos de Equilibrio General de Primer Orden a través de Resistencias Multilaterales Externas** Los otros efectos de equilibrio general de primer orden de la liberalización comercial en los países miembros se canalizan a través de las resistencias multilaterales externas,  $\Pi_i$ , lo que implica que:

1. Las resistencias multilaterales externas disminuirán para ambos países liberalizadores como resultado de su liberalización comercial bilateral.
2. Los efectos para cada país liberalizador serán más fuertes cuanto mayor sea el tamaño del país socio.

**Efectos de Equilibrio General Condicional en Países No Miembros** Los efectos de segundo orden, desencadenados por cambios en los términos de resistencia multilateral de los países liberalizadores, se canalizan también a través de las resistencias multilaterales. Esto implica que las resistencias multilaterales externas e internas de los países no miembros típicamente aumentarán como resultado de la disminución en los términos de resistencia de los países liberalizadores.

**Efectos de dotación total de equilibrio general** Constituye el tercer canal a través del cual la liberalización comercial afecta el comercio entre todas las economías del mundo. Este escenario se considera *completo* porque endogeniza el valor de la producción/ingreso nacional ( $Y_i$ ) y el gasto ( $E_i$ ) al permitir que los precios de fábrica ( $p_i$ ) respondan a los cambios en los costos comerciales ( $t_{ij}$ ) y los efectos secundarios asociados en las resistencias multilaterales ( $\Pi_i$  y  $P_j$ ), a través de la ecuación:

$$Y_i = \alpha_i \left( \frac{p_i}{\Pi_i} \right)^{1-\sigma} Q_i \quad (3.6)$$

y luego traducir estos cambios en los precios de fábrica ( $p_i$ ) en cambios en el valor de la producción doméstica ( $Y_i$ ) y el gasto agregado ( $E_i$ ), a través de la ecuación:

$$E_i = \phi_i Y_i = \phi_i p_i Q_i \quad (3.7)$$



Se asume que la producción de cada país  $i$ ,  $Q_i$ , es constante a lo largo del análisis. Es por eso que este escenario se etiqueta como *dotación*, para distinguirlo de los efectos de equilibrio general en un escenario donde las cantidades de producción también son endógenas respecto al comercio y la política comercial.

Los principales efectos de equilibrio general total sobre el valor de la producción se presentan de forma separada. Los efectos directos de equilibrio general sobre el valor de la producción, capturados por las ecuaciones anteriores, ilustran cómo las disminuciones en las resistencias multilaterales externas ( $\Pi_i$ ), definidas como un efecto de equilibrio general de primer orden para los países miembros, se traducen formalmente en precios de fábrica más altos ( $p_i$ ) y, a su vez, en valores de producción ( $Y_i$ ) y gasto ( $E_i$ ) más altos.

El impacto positivo en los valores de producción y gasto se deriva del hecho de que los productores en los países miembros liberalizadores internalizarán el cambio favorable en sus resistencias multilaterales externas aumentando sus precios. Lo contrario ocurrirá en los países no miembros, donde los productores experimentarán una resistencia externa más alta y se verán obligados a disminuir sus precios de fábrica.

Además, los cambios en el valor de la producción como resultado de la reducción de los costos comerciales bilaterales conducirán a efectos directos adicionales sobre el comercio, como se informa en la ecuación de gravedad estructural. Todo lo demás siendo igual, tanto las exportaciones como las importaciones en los países liberalizadores aumentarán después del aumento en el valor de su producción/ingreso nominal, mientras que el comercio en los países no miembros típicamente disminuirá como resultado de la reducción en el valor de su producción/ingreso nominal.

### 3.1.1. Aplicación del modelo de gravedad estructural dentro de un marco de equilibrio general para la simulación de eliminación de barreras comerciales

**Implementación del Análisis GE** Una innovación clave en el análisis de GE con el modelo de gravedad estructural es la aplicación del método GEPPML, que aprovecha la propiedad aditiva del estimador PPML para igualar los términos de gravedad estructural con los efectos fijos direccionales (importador y exportador) correspondientes. Este método permite estimar de manera efectiva cómo las variaciones en políticas comerciales o cambios en las fricciones afectan los flujos de comercio bilateral. Además, este método es especialmente adecuado para abordar la heteroscedasticidad de los datos de comercio y la presencia de ceros.

**Interpretación de Parámetros y Elasticidades** Los parámetros estimados en el modelo de gravedad estructural dentro del análisis de GE ofrecen insights sobre la sensibilidad del comercio a variaciones en las políticas comerciales y otras barreras al comercio.

Los parámetros estimados clave incluyen los costos de comercio y las elasticidades de comercio. Estos parámetros son fundamentales para descomponer los efectos de varios componentes comer-

ciales dentro de los datos que se utilizarán en los contrafactuales. Además, permiten establecer relaciones causales entre variables clave de interés y el comercio, en lugar de asumir simplemente que tales relaciones existen .

El modelo permite estimar los efectos de tres tipos de políticas comerciales: (i) política comercial bilateral, (ii) política unilateral de promoción de exportaciones, y (iii) política de protección comercial no uniforme. Esto se logra mediante la especificación de variables representativas dentro del modelo, como acuerdos de libre comercio (RTA), subsidios a la exportación (ES) y aranceles de nación más favorecida (MFN), interactuando algunas de estas variables con una variable dummy que distingue entre comercio internacional e interno para capturar el hecho de que tales políticas se aplican solo al comercio internacional .

Bajo este contexto, un parámetro clave es la elasticidad de sustitución ( $\sigma$ ) sigma. Este parámetro mide la facilidad con la que se pueden sustituir los bienes importados de diferentes países o la sustitución entre los bienes domésticos y los importados. Específicamente, en el contexto de la formulación del modelo de gravedad, sigma refleja cuánto puede cambiar la proporción de importaciones entre diferentes socios comerciales o entre bienes domésticos e importados en respuesta a cambios relativos en precios o costos de comercio. Por lo tanto, un valor más alto de sigma indicaría una mayor facilidad de sustitución y, por lo tanto, una mayor sensibilidad del comercio a cambios en los costos relativos.

En la formulación matemática, este parámetro influye directamente en cómo los costos de comercio bilaterales y las resistencias multilaterales afectan el flujo de comercio entre países. Este concepto es fundamental en los análisis de equilibrio general utilizando modelos de gravedad estructural porque permite comprender y cuantificar los efectos de las políticas comerciales y otras barreras al comercio en un marco global interconectado.

La estimación adecuada de  $\sigma$  posibilita análisis más precisos sobre cómo las alteraciones en los costos de comercio, ya sea por políticas arancelarias, acuerdos comerciales, o cambios en la infraestructura de transporte, pueden redistribuir los flujos comerciales entre países y afectar el bienestar económico general.

## 3.2. Enfoque estándar para el análisis de equilibrio general con gravedad estructural

### 3.2.1. Modelo Base - Estimación de Costos de Comercio y Elasticidades Comerciales

1. **Estimación de la Ecuación Gravitacional Empírica:** La ecuación gravitacional se estima para obtener los costos comerciales bilaterales y las elasticidades del comercio. Esto se logra a través de la siguiente especificación gravitacional genérica estimada con el estimador PPML:

$$X_{ijt} = \exp(\pi_{it} + \chi_{jt} + \beta_1 RTA_{ijt} + \beta_2 ES_{it} \times INTL_{ij} + \beta_3 MFN_{jt} \times INTL_{ij} + \epsilon_{ijt}) \quad (3.8)$$

donde  $\pi_{it}$  y  $\chi_{jt}$  son los efectos fijos del exportador y el importador en el tiempo, respectivamente, capturando costos de comercio intra-nacionales, y  $\epsilon_{ijt}$  es el término de error.

2. **Construcción de Costos de Comercio de Línea Base:** Basándose en las estimaciones obtenidas, se construyen los costos comerciales de línea base a partir de un enfoque híbrido denominado *estibration*. Este método incorpora las características más atractivas tanto del enfoque de estimación como del de calibración para la construcción de los costos comerciales bilaterales.

- a) **Proceso de Estibration:** Propuesto por Anderson et al. (2015), el proceso de *estibration* combina la estimación de costos comerciales y elasticidades comerciales a partir de una ecuación de gravedad empírica correctamente especificada. Luego, se construyen los costos comerciales de línea base teniendo en cuenta también la información contenida en el término de error. Este enfoque permite una descomposición detallada de los componentes clave de los costos comerciales y la recuperación de parámetros de elasticidad clave, al mismo tiempo que se ajusta perfectamente a los datos comerciales por construcción.
- b) La ecuación utilizada en el proceso de *estibration* para construir los costos comerciales de línea base es la siguiente:

$$\hat{t}_{ijt}^{BLN} = \exp \left( \hat{\mu}_{ijt} + \hat{\epsilon}_{ijt} \times T_{ijt}^{\hat{\beta}} \right)^{1-\hat{\sigma}} \quad (3.9)$$

donde  $\hat{t}_{ijt}^{BLN}$  representa los costos comerciales bilaterales estimados de línea base entre los países  $i$  y  $j$  en el tiempo  $t$ ,  $\hat{\mu}_{ijt}$  es el efecto fijo estimado del par de países,  $\hat{\epsilon}_{ijt}$  es el término de error de la ecuación de gravedad empírica,  $T_{ijt}$  son las variables de política comercial,  $\hat{\beta}$  son los coeficientes estimados de estas variables, y  $\hat{\sigma}$  es la elasticidad de sustitución estimada.

### 3.2.2. Índices Base

1. **Construcción de Índices Base y Cálculo de Resistencias Multilaterales:** Utilizando los efectos fijos estimados del modelo gravitacional, se generan índices base que reflejan las características intrínsecas de cada país en términos de comercio internacional. Estos índices son esenciales para calcular las resistencias multilaterales, que representan la facilidad o dificultad para exportar e importar desde y hacia cada país respectivamente.
2. La ecuación para calcular la resistencia multilateral externa ( $\Pi_i$ ) de cada país es la siguiente:

$$\Pi_{i,t}^{BLN} = Y_{i,t} \times \exp(\hat{\pi}_{i,t}) \times ER_t^{1-\hat{\sigma}} \quad (3.10)$$

donde  $Y_{i,t}$  es la producción total del país  $i$  en el tiempo  $t$ ,  $\hat{\pi}_{i,t}$  son los efectos fijos del exportador estimados a partir del modelo de gravedad,  $ER_t$  es un factor de normalización, y  $\hat{\sigma}$  es la elasticidad de sustitución estimada.

3. De manera similar, la resistencia multilateral interna ( $P_j$ ) se calcula como:

$$P_{j,t}^{BLN} = E_{j,t} \times \exp(\hat{\chi}_{j,t}) \times \frac{1}{ER_t^{1-\hat{\sigma}}} \quad (3.11)$$

donde  $E_{j,t}$  es el gasto total del país  $j$  en el tiempo  $t$ , y  $\hat{\chi}_{j,t}$  son los efectos fijos del importador estimados.

4. Estas resistencias multilaterales se utilizan luego para calcular otros índices de equilibrio general de interés, como los términos de comercio y el bienestar o consumo real.

Estas ecuaciones y procesos detallados aseguran que el modelo de gravedad estructural se calibre adecuadamente con los datos comerciales actuales, permitiendo así una interpretación precisa de los efectos del comercio y las políticas comerciales en un contexto de equilibrio general.

### 3.2.3. Desarrollo del Escenario Contrafactual

1. **Definición del Escenario Contrafactual:** La definición de un escenario contrafactual implica especificar los cambios en las políticas comerciales que afectarán los costos de comercio bilateral. Por ejemplo, la eliminación de barreras comerciales entre dos países resultaría en una disminución de estos costos. En el modelo de gravedad estructural, esto se representa como un cambio en las variables de política comercial que afectan directamente a los costos de comercio bilateral.

La ecuación general para ajustar los costos de comercio bilateral en un escenario contrafactual se da por:

$$\hat{t}_{ij}^{CFL} = \exp(\hat{\mu}_{ij} + \Delta T_{ij}\beta) \quad (3.12)$$

donde  $\hat{t}_{ij}^{CFL}$  representa los costos de comercio bilateral ajustados en el escenario contrafactual entre los países  $i$  y  $j$ ,  $\hat{\mu}_{ij}$  es el efecto fijo estimado de la pareja comercial,  $\Delta T_{ij}$  son los cambios en las variables de política comercial (por ejemplo, la eliminación de aranceles), y  $\beta$  son los coeficientes estimados que reflejan la sensibilidad del comercio a cambios en las políticas comerciales.

2. **Resolución del Modelo bajo el Escenario Contrafactual:** Una vez ajustado el escenario contrafactual, el modelo de gravedad estructural se resuelve para este nuevo escenario. Esto implica re-estimar los flujos de comercio bilateral usando los costos de comercio ajustados. La re-estimación del modelo se realiza bajo ciertas restricciones para reflejar el escenario contrafactual, lo cual lleva a calcular los nuevos índices de resistencia multilateral y ajustar todas las variables endógenas del modelo hasta alcanzar un nuevo equilibrio.

Los efectos de equilibrio general condicional se obtienen re-estimando la especificación econométrica de gravedad, bajo el escenario contrafactual de que ciertas políticas comerciales, como la existencia de fronteras internacionales, no aplican. La re-estimación se lleva a cabo con la siguiente ecuación:

$$X_{ij} = \exp\left(\pi_i^{CFL} + \chi_j^{CFL} - 0.791 \times \ln(DIST_{ij}) + 0.674 \times CNTG_{ij} + \varepsilon_{ij}^{CFL}\right) \quad (3.13)$$

Donde  $\pi_i^{CFL}$  y  $\chi_j^{CFL}$  son los efectos fijos del exportador y del importador en el escenario contrafactual, respectivamente y  $\varepsilon_{ij}^{CFL}$  es el término de error en el escenario contrafactual.

**Efectos de Equilibrio General Condicional** Los efectos de equilibrio general condicional se construyen en dos etapas:

- a) Primero, se re-estima el modelo de gravedad con el estimador PPML, incluyendo las nuevas variables dependientes y bajo las restricciones impuestas por el escenario contrafactual.
- b) Después, se utilizan las nuevas estimaciones de los efectos fijos para construir los índices de resistencia multilateral condicional, las exportaciones totales y el consumo real para cada uno de los países en la muestra. Es importante normalizar los términos de resistencia multilateral, eligiendo a un país de referencia, por ejemplo, Alemania, para establecer uno de estos términos igual a uno.

**Efectos de Equilibrio General de Dotación Completa** Esta etapa entrega los efectos de equilibrio general de dotación completa de la eliminación de fronteras internacionales mediante un procedimiento iterativo de cuatro etapas que permite el ajuste endógeno de los precios de fábrica, ingresos, gastos y comercio al choque contrafactual. Este procedimiento iterativo es fundamental para capturar los efectos completos de las políticas comerciales en un contexto de equilibrio general.

Este proceso detallado subraya la profundidad del análisis que se puede realizar utilizando el modelo de gravedad estructural para evaluar los efectos de las políticas comerciales, ofreciendo una base sólida para comprender las complejidades del comercio internacional y las políticas comerciales.

### 3.2.4. Procedimiento Iterativo

La implementación de un procedimiento iterativo es esencial para ajustar las variables clave como la producción ( $Y_i$ ), el gasto ( $E_j$ ), y los precios de fábrica ( $P_{f,i}$ ) en respuesta al escenario contrafactual de eliminación de barreras comerciales entre países específicos. Este enfoque iterativo se describe en los siguientes pasos:

1. **Ajuste Inicial:** Se inicia con los valores base de producción, gasto y precios de fábrica derivados del análisis de la línea base del modelo gravitacional. Estos sirven como punto de partida para el proceso iterativo.
2. **Estimación del Modelo Gravitacional:** Se estima el modelo gravitacional utilizando el método PPML para el escenario contrafactual.
3. **Recalibración de Variables Endógenas:** Con los resultados de la estimación, se recalibran las variables de producción, gasto y precios de fábrica. Este paso es crucial para reflejar los efectos del escenario contrafactual en las dinámicas del mercado y las interacciones económicas.

4. **Iteración hasta Convergencia:** Se repiten los pasos 2 y 3 iterativamente, recalibrando las variables endógenas en cada iteración, hasta alcanzar un nuevo equilibrio donde los ajustes en las variables clave ya no produzcan cambios significativos en los resultados del modelo.

# Referencias

- [1] World Trade Organization (WTO) and United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD). (2023). *Advanced Guide to Trade Policy Analysis: The Structural Gravity Model*. Geneva, Switzerland: World Trade Organization.
- [2] Anderson, James E. (1979). *A Theoretical Foundation for the Gravity Equation*. American Economic Review, 69(1), 106-116.
- [3] Eaton, Jonathan y Kortum, Samuel (2002). *Technology, Geography, and Trade*. Econometrica, 70(5), 1741-1779.
- [4] Anderson, James E. y van Wincoop, Eric (2003). *Gravity with Gravitas: A Solution to the Border Puzzle*. American Economic Review, 93(1), 170-192.
- [5] Anderson, James E. y Yotov, Yoto V. (2010). *The Changing Incidence of Geography*. American Economic Review, 100(5), 2157-2186.
- [6] Anderson, James E., Yotov, Yoto V. y Larch, Mario (2015). *Estimation: Estimation and Calibration of Gravity Models*.