



FACULTAD DE DERECHO

¿Cómo estimar el tipo de interés neutral o de equilibrio para EEUU? También se estudiará la Regla de Sahm como instrumento de detección en tiempo real del cambio de fase de Expansión a Recesión, para activar estabilizadores automáticos.

Autor: Gonzalo Álvarez Núñez 5º

E3-Analytics

Tutor: Ramón Bermejo Climent

Madrid

Abril 2025

Resumen

Este trabajo de fin de grado explora el papel del tipo de interés neutral como variable clave en el análisis macroeconómico y en la formulación de política monetaria. A partir de una revisión teórica y empírica, se examinan distintos métodos de estimación del tipo de interés neutral en la economía estadounidense, prestando especial atención al enfoque estructural de Laubach y Williams. Asimismo, se analiza la utilidad de este tipo de interés en combinación con indicadores laborales y financieros para anticipar recesiones. En concreto, se propone un conjunto de herramientas empíricas, entre ellas modelos econométricos y reglas heurísticas, que permiten evaluar si la política monetaria se sitúa en un territorio expansivo o restrictivo, y si ello incrementa el riesgo de una recesión a corto plazo. El estudio combina elementos de teoría macroeconómica, análisis de datos y modelización estadística, con el objetivo final de comprender mejor la interacción entre política monetaria y ciclo económico.

Palabras clave: Tipo de interés neutral, política monetaria, Reserva Federal, Regla de Sahm, ciclo económico, recesión, mercados financieros, mercado de acciones.

Abstract

This thesis explores the role of the natural rate of interest as a key variable in macroeconomic analysis and monetary policy design. Through both theoretical and empirical perspectives, it examines various approaches to estimate the natural rate of interest in the U.S. economy, with particular attention to the structural model developed by Laubach and Williams. Additionally, the study analyzes the usefulness of this rate in conjunction with labor and financial indicators to anticipate recessions. Specifically, it proposes a set of empirical tools, including econometric models and heuristic rules, aimed at assessing whether monetary policy is in an accommodative or restrictive stance and whether this increases the likelihood of a near-term recession. The study combines elements of macroeconomic theory, data analysis, and statistical modeling with the ultimate goal of improving our understanding of the interplay between monetary policy and the business cycle.

Key words: neutral interest rate, monetary policy, Federal Reserve, Sahm Rule, economic cycle, recession, financial markets, stock market.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	6
1.1 Motivación y objetivo del estudio.....	6
1.2 Justificación académica y relevancia económica.....	6
1.3 Estructura del trabajo	7
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	7
2.1 La política monetaria de la Reserva Federal.....	7
2.2 Definición de tipo de interés neutral	10
2.2.1. Concepto y fundamentos teóricos	10
2.2.2. El tipo neutral como variable no observable.....	10
2.2.3. Factores determinantes del tipo de interés neutral	11
2.2.4. Evolución histórica y estimaciones empíricas	13
2.2.5. Modelos de estimación: el enfoque Laubach-Williams	14
2.2.6. Implicaciones para la política monetaria	15
2.3 La Regla de Sahm: Concepto y aplicación	17
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA Y DESARROLLO TÉCNICO.....	20
3.1 Fuentes de datos	20
3.2 Algoritmo de estimación del tipo de interés neutral: implementación del modelo Laubach-Williams	22
3.3 Cálculo de la brecha $i - r^*$ y análisis histórico.....	24
3.4 Implementación de la Regla de Sahm en Python.....	25
3.5 Modelo logit y regla heurística de probabilidad de recesión: formulación e interpretación	27
3.6 Limitaciones y robustez de los enfoques	29
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS EMPÍRICO Y RESULTADOS	29
4.1 Estimación histórica del tipo de interés neutral	29
4.2 Análisis de la brecha de tipos como señal de recesión	31
4.3 Eficacia de la Regla de Sahm en detección de recesiones	32
4.4 Resultados del modelo logit y de la regla heurística.....	33
4.5 Relevancia para política monetaria y mercados financieros	36
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES DEL ESTUDIO.....	38
5.1 Síntesis de hallazgos	38
5.2 Valor añadido del estudio	39
5.3 Limitaciones y propuestas de mejora futura	39

5.4 Reflexión final	40
CAPÍTULO 6. DECLARACIÓN DE USO DE HERRAMIENTAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL GENERATIVA	40
CAPÍTULO 7. BIBLIOGRAFÍA	42
ANEXO I – CÓDIGO PYTHON.....	45
Construcción base de datos	45
Estimación del tipo neutral	48
Aplicación Regla de Sahm.....	50
Creación modelo logit.....	52
Creación regla heurística.....	55

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación y objetivo del estudio

La anticipación de los ciclos económicos ha sido, históricamente, una preocupación central tanto para los responsables de política monetaria como para los analistas financieros. La capacidad de prever el inicio de una recesión con varios meses de antelación permite no solo adaptar las decisiones de política económica, sino también establecer criterios preventivos en ámbitos como el empleo, la inversión o la sostenibilidad fiscal. En los últimos años, el resurgimiento de modelos estructurales que estiman el tipo de interés neutral —como el propuesto por Laubach y Williams (2003)— ha reavivado el debate en torno al valor informativo de la política monetaria real respecto al ciclo económico. Este trabajo se enmarca precisamente en ese contexto: analizar empíricamente si la diferencia entre el tipo de interés real y su nivel neutral contiene información útil para anticipar recesiones.

El presente estudio se estructura en torno a dos objetivos principales. El primero es estimar de forma mensual el tipo de interés neutral de Estados Unidos a partir de un modelo basado en fundamentos macroeconómicos, combinando datos del output gap, la inflación y el tipo de interés nominal. A partir de dicha estimación, se calcula una medida de brecha monetaria que servirá como variable clave a lo largo del análisis. El segundo objetivo es evaluar la capacidad de dicha brecha —en combinación con otras variables macro-financieras— para anticipar la entrada de la economía estadounidense en fase recesiva. Para ello, se construyen dos enfoques predictivos: un modelo estadístico de regresión logística (logit) y una regla heurística interpretativa de diseño propio, denominada Regla heurística.

1.2 Justificación académica y relevancia económica

Este trabajo se apoya en una literatura cada vez más amplia que explora la relación entre condiciones monetarias, expectativas del mercado y evolución del ciclo económico. Frente a aproximaciones más tradicionales basadas en la pendiente de la curva de tipos o en la evolución del PIB, la utilización de la brecha entre el tipo real y el tipo neutral ofrece una perspectiva más estructural, basada en el supuesto de que los tipos de interés tienen un componente cíclico y otro fundamental. La originalidad de este trabajo reside tanto en la implementación empírica mensual del modelo de Laubach-Williams como en el contraste entre un enfoque estadístico y otro heurístico. Esta doble vía permite evaluar la robustez de los resultados y proponer herramientas prácticas de alerta temprana con distintos niveles de complejidad.

Desde un punto de vista económico, la posibilidad de anticipar una recesión tiene implicaciones directas sobre la política monetaria, fiscal y financiera. Una señal bien calibrada puede, por ejemplo, activar de forma preventiva estabilizadores automáticos o facilitar la toma de decisiones en el ámbito de la inversión institucional. Asimismo, este trabajo contribuye a clarificar el papel del tipo neutral como variable de referencia para la Reserva Federal, especialmente en entornos donde las señales tradicionales de recesión, como la curva de tipos, pueden resultar ambiguas o poco temporales.

1.3 Estructura del trabajo

El trabajo se divide en cinco capítulos. En el capítulo 2 se presentan los fundamentos teóricos del análisis, incluyendo una revisión conceptual del tipo de interés neutral, el marco de política monetaria de la Reserva Federal y la formulación de la Regla de Sahm como criterio de alerta. El capítulo 3 detalla la metodología empírica y el desarrollo técnico del estudio: fuentes de datos, estimación del tipo neutral mediante el modelo de Laubach-Williams, construcción de la brecha de tipos histórica, implementación de la Regla de Sahm, y formulación de los modelos predictivos. En el capítulo 4 se presentan y analizan los resultados obtenidos: evolución histórica del tipo neutral, comportamiento de la brecha monetaria, precisión del modelo logit y rendimiento de la Regla heurística. El capítulo 5 recoge las principales conclusiones, limitaciones del estudio y posibles líneas futuras de investigación.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1 La política monetaria de la Reserva Federal

La Reserva Federal de los Estados Unidos (en adelante, la “**Fed**”) constituye el banco central del país y una de las instituciones más influyentes del sistema financiero global. Creada en 1913 mediante la *Federal Reserve Act*, su diseño institucional respondió, en origen, a la necesidad de estabilizar el sistema bancario estadounidense y de prevenir crisis de liquidez como las que se habían producido de forma recurrente en las décadas anteriores. Desde entonces, su estructura y competencias han evolucionado considerablemente, configurándose como un modelo de referencia para otros bancos centrales en materias como el mandato legal, la independencia institucional y el marco operativo.

El sistema de la Fed combina elementos centralizados y descentralizados. La Junta de Gobernadores, con sede en Washington D.C., ejerce funciones de supervisión y regulación

financiera a nivel nacional. A su vez, existen doce bancos regionales, distribuidos geográficamente, que operan como entidades semiautónomas dentro del sistema. El órgano encargado de formular la política monetaria es el Comité Federal de Mercado Abierto (*Federal Open Market Committee*, FOMC), compuesto por los siete miembros de la Junta y cinco presidentes de bancos regionales con derecho a voto rotatorio. Esta arquitectura pretende asegurar tanto la coherencia técnica como la representatividad territorial en las decisiones adoptadas¹.

Uno de los elementos más singulares de la Fed es su mandato dual, establecido en 1977 como enmienda a la legislación original. A diferencia de otros bancos centrales, cuyo mandato se limita a la estabilidad de precios, la Fed debe perseguir simultáneamente dos objetivos: el pleno empleo y la estabilidad de precios. Esta doble misión, recogida explícitamente en la sección 2A de la *Federal Reserve Act*, introduce una complejidad adicional en la formulación de política, ya que, en determinados contextos, ambos objetivos pueden entrar en tensión. Tal dualidad obliga al banco central a ponderar cuidadosamente la evolución del mercado laboral, el crecimiento económico y la inflación subyacente (Clarida, Galí & Gertler, 1999; Mishkin, 2007)^{2 3}.

En cuanto a los instrumentos disponibles para alcanzar dichos fines, la Fed utiliza una combinación de herramientas convencionales y no convencionales. Las principales son las operaciones de mercado abierto (*open market operations*), mediante las cuales compra o vende activos financieros para influir sobre la liquidez y el tipo de interés de corto plazo; las facilidades permanentes, como la ventanilla de descuento; y la remuneración de reservas bancarias a través del *Interest on Reserve Balances* (IORB). El tipo de referencia operacional es el *federal funds rate*, que representa el coste del dinero a un día en el mercado interbancario. A través del control de este tipo, la Fed incide sobre la estructura de tipos en toda la economía, afectando al coste del crédito, la inversión, el consumo y, en última instancia, al nivel de precios y al empleo (Woodford, 2003)⁴.

Desde la crisis financiera global de 2008, la Fed ha complementado estos mecanismos con

¹ Federal Reserve Board. (2023). *The Structure of the Federal Reserve System*.

<https://www.federalreserve.gov/aboutthefed/structure-federal-reserve-system.htm>

² Clarida, R., Galí, J., & Gertler, M. (1999). The science of monetary policy: A New Keynesian perspective. *Journal of Economic Literature*, 37(4), 1661–1707. <https://doi.org/10.1257/jel.37.4.1661>

³ Mishkin, F. S. (2007). *Monetary Policy Strategy*. MIT Press.

⁴ Woodford, M. (2003). *Interest and Prices: Foundations of a Theory of Monetary Policy*. Princeton University Press.

instrumentos no convencionales como las compras de activos a gran escala (*quantitative easing*) y la orientación de expectativas (*forward guidance*), especialmente cuando el tipo de interés nominal se ha acercado a su límite inferior efectivo. Estas medidas han tenido como objetivo mantener condiciones monetarias expansivas en entornos de baja inflación y débil crecimiento, ampliando el repertorio tradicional del banco central (Bernanke, 2017; Federal Reserve Board, 2022)^{5 6}.

El proceso de toma de decisiones del FOMC combina análisis empírico riguroso y juicio profesional. En su práctica cotidiana, la Fed monitorea una amplia variedad de indicadores: inflación observada y esperada, evolución del PIB, tasa de desempleo, salarios, condiciones financieras, tipo de cambio, expectativas del mercado y proyecciones macroeconómicas internas. Además, utiliza marcos normativos como las denominadas reglas de política monetaria —entre ellas, la Regla de Taylor (Taylor, 1993)⁷— que relacionan el tipo de interés nominal con la brecha de inflación y el ciclo económico, si bien su aplicación no es mecánica sino orientativa.

Dentro de estos marcos, algunas variables de referencia como el *output gap* o el tipo de interés neutral permiten evaluar si la política monetaria adoptada es contractiva, expansiva o neutra. No obstante, estos indicadores no son directamente observables, y su estimación implica un grado relevante de incertidumbre. La propia Fed reconoce que, si bien estas referencias pueden guiar la formulación de política, deben interpretarse con prudencia y siempre dentro de un contexto más amplio de información económica y financiera (Federal Reserve Board, *Monetary Policy Report*, 2022; Williams, 2018)^{8 9}.

En suma, la política monetaria de la Reserva Federal se articula sobre una arquitectura institucional sofisticada y un mandato normativo exigente, que obliga a ponderar simultáneamente la evolución del empleo y de los precios. Su estrategia combina herramientas convencionales con innovaciones recientes y se apoya en una lectura integral de la coyuntura económica. En los siguientes apartados se desarrollarán, con mayor detalle, los conceptos

⁵ Bernanke, B. S. (2017). *The Courage to Act: A Memoir of a Crisis and Its Aftermath*. W. W. Norton & Company.

⁶ Federal Reserve Bank of New York. (2022). *Statement Regarding Repurchase Operations and Treasury Bill Purchases*. https://www.newyorkfed.org/markets/opolicy/operating_policy_200909a

⁷ Taylor, J. B. (1993). Discretion versus policy rules in practice. *Carnegie-Rochester Conference Series on Public Policy*, 39, 195–214. [https://doi.org/10.1016/0167-2231\(93\)90009-L](https://doi.org/10.1016/0167-2231(93)90009-L)

⁸ Federal Reserve Board. (2022). *Monetary Policy Report – July 2022*. https://www.federalreserve.gov/monetarypolicy/mpr_default.htm

⁹ Williams, J. C. (2018). The Future Fortunes of R-Star: Are They Really Rising? *Federal Reserve Bank of New York*. <https://www.newyorkfed.org/newsevents/speeches/2018/wil180219>

fundamentales que sustentan su actuación, entre ellos el tipo de interés neutral y su utilización como brújula de orientación en contextos macroeconómicos cambiantes.

2.2 Definición de tipo de interés neutral

2.2.1. Concepto y fundamentos teóricos

El tipo de interés neutral, también denominado tipo de interés de equilibrio o tasa natural de interés (r^*), constituye un concepto central en el análisis macroeconómico moderno y en la formulación de la política monetaria. Este concepto encuentra su origen en la obra del economista sueco Knut Wicksell, quien en *Geldzins und Güterpreise (Interest and Prices)* (1898)¹⁰ postuló la existencia de una tasa de interés natural que es neutra en relación con el precio de las materias primas, y que ni lo aumenta ni lo disminuye. En el marco wickselliano, cualquier desviación entre la tasa de interés del mercado y la tasa natural generaría desequilibrios: si la tasa de mercado era inferior a la natural, se inducía inflación; si era superior, se provocaba deflación.

Este planteamiento ha sido incorporado y formalizado en modelos macroeconómicos contemporáneos, en particular en los denominados modelos dinámicos estocásticos de equilibrio general (DSGE). En este contexto, la tasa neutral se define como la tasa real de interés que permite que el producto interno bruto (PIB) se sitúe en su nivel potencial y que la inflación se mantenga en su objetivo, en ausencia de perturbaciones temporales (Woodford, 2003)¹¹. Dicha tasa cumple una función de anclaje: representa el tipo de interés que, si se adoptara como política monetaria, no generaría presiones inflacionarias ni contractivas.

Cabe destacar que la tasa neutral no es un valor observable en los mercados financieros, sino una variable latente que debe inferirse a partir del comportamiento conjunto de variables macroeconómicas como el PIB real, la inflación y los tipos de interés nominales. Su estimación, por tanto, requiere la aplicación de modelos estructurales o técnicas econométricas específicas.

2.2.2. El tipo neutral como variable no observable

Una de las principales particularidades del tipo de interés neutral es que no se puede observar directamente en los datos, a diferencia de los tipos nominales que fija la autoridad monetaria.

¹⁰ Wicksell, K. (1936). *Interest and Prices* (R. F. Kahn, Trans.). Macmillan. (Original work published 1898)

¹¹ Woodford, M. (2003). *Interest and Prices: Foundations of a Theory of Monetary Policy*. Princeton University Press.

Esta tasa, más que una magnitud empírica, es una construcción teórica: representa el tipo real de interés que permitiría que la economía creciera a su ritmo potencial, sin generar tensiones inflacionarias ni deflacionarias. Sin embargo, como no se publica ni se mide de forma explícita, debe ser estimada a partir del comportamiento de otras variables macroeconómicas.

Por esta razón, en los últimos años se han desarrollado distintos métodos para tratar de aproximarla con la mayor precisión posible. Uno de los enfoques más utilizados es el modelo de Laubach y Williams (2003)¹², que ha servido de base para muchas estimaciones tanto académicas como institucionales. Este modelo permite obtener estimaciones del tipo neutral, del producto potencial y de su tasa de crecimiento, a partir de una combinación de datos sobre inflación, PIB y tipos de interés, empleando una técnica conocida como filtro de Kalman.

Lo interesante de este método es que tiene en cuenta que la tasa neutral no es fija, sino que cambia a lo largo del tiempo como reflejo de transformaciones más profundas en la economía, como la evolución demográfica o la productividad. Así lo demuestran también las extensiones del modelo aplicadas a distintas economías desarrolladas (Holston, Laubach y Williams, 2017)¹³.

En definitiva, el hecho de que el tipo neutral no se observe directamente implica que su estimación siempre conlleva cierto grado de incertidumbre. Por ello, su uso como referencia para la política monetaria debe ser cuidadoso, y conviene contrastarlo con otros indicadores que ayuden a interpretar en qué fase del ciclo se encuentra realmente la economía.

2.2.3. Factores determinantes del tipo de interés neutral

El tipo de interés neutral no es una constante, sino una variable que cambia con el tiempo en función de distintas características estructurales de la economía. Aunque se trata de un concepto teórico, su valor está influido por elementos reales como la productividad, la demografía o el comportamiento del ahorro y la inversión, entre otros. Comprender qué factores determinan su evolución es clave para interpretar sus variaciones y estimar su valor con mayor precisión.

Uno de los elementos más importantes es el crecimiento tendencial del producto, es decir, la

¹² Laubach, T., & Williams, J. C. (2003). *Measuring the Natural Rate of Interest*. *Review of Economics and Statistics*, 85(4), 1063–1070.

¹³ Holston, K., Laubach, T., & Williams, J. C. (2017). *Measuring the Natural Rate of Interest: International Trends and Determinants*. *Journal of International Economics*, 108, S59–S75.

tasa a la que una economía puede expandirse de forma sostenida sin generar presiones inflacionistas. A mayor crecimiento potencial, suele asociarse una mayor rentabilidad del capital, lo que lleva a un tipo de interés neutral más elevado. De hecho, en el modelo de Laubach y Williams (2003)¹⁴, esta relación se representa de forma explícita, mediante un coeficiente positivo que liga directamente ambas variables.

La demografía es otro factor relevante. En economías con poblaciones que envejecen, tiende a aumentar la propensión al ahorro, al mismo tiempo que disminuye la inversión productiva. Este cambio en el equilibrio entre ahorro e inversión presiona a la baja la tasa de interés neutral, como se ha señalado en trabajos recientes centrados en el fenómeno de la estancación secular (Eggertsson, Mehrotra y Robbins, 2019)¹⁵.

También influyen otros elementos, como el grado de incertidumbre económica o la preferencia por activos seguros. En contextos de inestabilidad, los inversores tienden a demandar bonos públicos o instrumentos de bajo riesgo, lo que reduce sus rendimientos reales y, con ello, el nivel estimado de r^* . A este fenómeno se suma el papel que puede jugar la política fiscal: déficits persistentes, si son percibidos como sostenibles, pueden aumentar la demanda de crédito público y, por tanto, elevar la tasa neutral (Laubach, 2009)¹⁶. Sin embargo, este efecto no es automático y depende también de la respuesta del sector privado y de las condiciones de financiación globales.

Por último, en un mundo económicamente interconectado, los factores internacionales adquieren un peso creciente. En la medida en que los mercados de capital están integrados, las tasas neutras tienden a converger entre países, y shocks globales —como un cambio en el crecimiento de China o una caída persistente de los precios de las materias primas— pueden tener efectos directos sobre las condiciones financieras internas de cualquier economía avanzada.

En conjunto, estos factores muestran que el tipo de interés neutral es el resultado de un equilibrio complejo entre distintas fuerzas de fondo. Su evolución depende no solo de las características internas de cada país, sino también del contexto internacional y de los cambios

¹⁴ Laubach, T., & Williams, J. C. (2003). *Measuring the Natural Rate of Interest*. *Review of Economics and Statistics*, 85(4), 1063–1070.

¹⁵ Eggertsson, G. B., Mehrotra, N. R., & Robbins, J. A. (2019). *A Model of Secular Stagnation*. *American Economic Journal: Macroeconomics*, 11(1), 1–48.

¹⁶ Laubach, T. (2009). *New Evidence on the Interest Rate Effects of Budget Deficits and Debt*. *Journal of the European Economic Association*, 7(4), 858–885.

en las preferencias de los agentes económicos a lo largo del tiempo.

2.2.4. Evolución histórica y estimaciones empíricas

A lo largo de las últimas décadas, el tipo de interés neutral ha experimentado un descenso sostenido en la mayoría de economías avanzadas, especialmente desde finales del siglo XX. Aunque no existe una única estimación oficial —ya que, como se ha señalado, se trata de una variable no observable—, los distintos métodos utilizados por investigadores y bancos centrales muestran una tendencia bastante clara: r^* ha ido perdiendo altura de forma progresiva y estructural.

En el caso de Estados Unidos, los primeros trabajos de Laubach y Williams (2003)¹⁷ situaban la tasa neutral real en torno al 3 % a mediados de los años noventa. Sin embargo, las actualizaciones posteriores de su modelo revelan una caída significativa a partir de la crisis financiera de 2008. En su estudio de 2015, los autores estiman que r^* se habría reducido hasta niveles cercanos a cero, sin una recuperación clara en los años posteriores (Laubach y Williams, 2015)¹⁸.

Estas conclusiones han sido respaldadas por otras aproximaciones metodológicas. Por ejemplo, las tasas reales implícitas en los bonos ligados a la inflación (TIPS) también han mostrado un descenso acusado, reflejando una menor rentabilidad esperada en términos reales. Además, las encuestas a analistas —como las proyecciones a largo plazo del Blue Chip Economic Indicators— apuntan en la misma dirección, reforzando la idea de que no se trata de un fenómeno transitorio, sino de un cambio más profundo en la estructura económica (Hamilton, Harris, Hatzius y West, 2015)¹⁹.

Este patrón descendente no es exclusivo de Estados Unidos. El trabajo de Holston, Laubach y Williams (2017)²⁰ amplía el análisis a otras economías avanzadas, como la zona euro, el Reino Unido y Canadá, y encuentra dinámicas similares. En todos los casos, la combinación de menor crecimiento potencial, envejecimiento demográfico y una elevada demanda de activos seguros

¹⁷ Laubach, T., & Williams, J. C. (2003). *Measuring the Natural Rate of Interest*. *Review of Economics and Statistics*, 85(4), 1063–1070.

¹⁸ Laubach, T., & Williams, J. C. (2015). *Measuring the Natural Rate of Interest Redux*. Hutchins Center Working Paper #15.

¹⁹ Hamilton, J. D., et al. (2015). *The Equilibrium Real Funds Rate: Past, Present and Future*. U.S. Monetary Policy Forum.

²⁰ Holston, K., Laubach, T., & Williams, J. C. (2017). *Measuring the Natural Rate of Interest: International Trends and Determinants*. *Journal of International Economics*, 108, S59–S75.

parece haber empujado la tasa neutral hacia niveles históricamente bajos.

Estas observaciones han dado lugar a interpretaciones como la hipótesis del estancamiento secular, popularizada por Lawrence Summers (2014)²¹, que sostiene que algunas economías podrían estar atrapadas en un entorno en el que el tipo neutral es tan bajo que incluso tipos nominales cercanos a cero resultan insuficientes para estimular la demanda agregada de forma efectiva.

En definitiva, la evolución histórica del tipo de interés neutral refleja una transformación estructural en los fundamentos macroeconómicos de largo plazo. Esta caída plantea retos importantes para la política monetaria, ya que reduce el margen de maniobra disponible y obliga a reconsiderar tanto los instrumentos tradicionales como los objetivos perseguidos por los bancos centrales.

2.2.5. Modelos de estimación: el enfoque Laubach-Williams

Entre los distintos métodos utilizados para estimar el tipo de interés neutral, uno de los más influyentes y extendidos es el modelo desarrollado por Laubach y Williams (2003). Este enfoque ha sido adoptado por varios bancos centrales y organismos internacionales, y se ha convertido en una referencia habitual tanto en la literatura empírica como en los análisis aplicados a la política monetaria.

Se trata de un modelo estructural que permite estimar, de forma conjunta, tres variables que no se observan directamente: el tipo de interés neutral, el nivel del producto potencial y su tasa de crecimiento tendencial. Para hacerlo, utiliza información disponible sobre el PIB real, la inflación y los tipos de interés nominales, aplicando un filtro estadístico conocido como filtro de Kalman. Esta técnica permite ir actualizando las estimaciones a medida que se incorporan nuevos datos, ofreciendo así una visión dinámica de la evolución de las variables latentes.

La relación fundamental que estructura el modelo es bastante intuitiva: la tasa de interés neutral se define como una combinación del crecimiento tendencial de la economía y un componente adicional no observado que recoge otros factores estructurales. Es decir, la fórmula básica que se plantea es:

²¹ Summers, L. H. (2014). *U.S. Economic Prospects: Secular Stagnation, Hysteresis, and the Zero Lower Bound*. *Business Economics*, 49(2), 65–73.

$$r_t^* = c \cdot g_t^* + z_t$$

Donde r_t^* representa el tipo neutral en el momento t , g_t^* es la tasa de crecimiento del producto potencial, c es un coeficiente estimado, y z_t es un término estocástico que sigue un paseo aleatorio, destinado a captar variaciones estructurales no atribuibles directamente al crecimiento.

Además de esta ecuación central, el modelo incorpora una curva IS estimada, que relaciona el ciclo económico (output gap) con la diferencia entre el tipo real observado y el tipo neutral, y una curva de Phillips ampliada, que vincula la inflación con la brecha de producto y otras variables adicionales como los precios energéticos o los precios de importación.

Lo interesante de este modelo es que no parte de una suposición fija sobre el tipo neutral, sino que lo deja evolucionar libremente en el tiempo en función de cómo cambian los datos y los equilibrios macroeconómicos. De hecho, en su actualización más reciente, Laubach y Williams (2015) muestran que gran parte de la caída de r^* en Estados Unidos desde la crisis financiera puede explicarse tanto por una menor tasa de crecimiento potencial como por factores más difíciles de identificar, captados por el componente z_t .

El enfoque también ha sido extendido a otras economías desarrolladas en el trabajo de Holston, Laubach y Williams (2017), lo que permite realizar comparaciones internacionales y detectar patrones comunes, como la convergencia hacia niveles más bajos del tipo neutral en los últimos años.

En resumen, el modelo de Laubach-Williams ofrece una herramienta robusta para estimar el tipo de interés neutral de forma coherente con los fundamentos de la economía. Aunque no está exento de limitaciones —especialmente en lo que respecta a la sensibilidad a revisiones de datos o a la incertidumbre sobre los parámetros—, su contribución ha sido clave para entender cómo ha cambiado el equilibrio macroeconómico en las últimas décadas y para valorar si la política monetaria está bien alineada con ese nuevo contexto.

2.2.6. Implicaciones para la política monetaria

El tipo de interés neutral cumple una función central como punto de referencia para interpretar la orientación de la política monetaria. Si el tipo de interés real de mercado se sitúa por debajo del nivel neutral estimado, se considera que la política es expansiva, ya que estaría estimulando la demanda agregada. Por el contrario, si se encuentra por encima, la interpretación habitual es

que se está aplicando una política restrictiva, con el objetivo de moderar el crecimiento o controlar las presiones inflacionistas.

Esta lógica ha dado lugar al uso del tipo neutral como componente clave en reglas de política monetaria como la de Taylor, donde r^* aparece como el nivel normativo de los tipos reales que guiaría las decisiones del banco central en un contexto de estabilidad (Taylor, 1993)²². En estos marcos, la diferencia entre el tipo real efectivo y la tasa neutral —conocida como brecha del tipo de interés— permite medir el grado de acomodación o de restricción que implica la política vigente.

Ahora bien, dado que r^* no es observable y su estimación está sujeta a incertidumbre, su uso operativo no está exento de riesgos. Como advierten Orphanides y Williams (2002)²³, errores en la estimación del tipo neutral pueden conducir a decisiones de política monetaria mal calibradas, sobre todo si se adoptan reglas demasiado mecánicas sin tener en cuenta márgenes de error o señales complementarias del ciclo económico. Por este motivo, muchos bancos centrales prefieren utilizar rangos estimativos o combinaciones de modelos, en lugar de apoyarse en una única cifra puntual.

Además, la caída estructural del tipo de interés neutral en las últimas décadas ha reducido el margen de actuación de los bancos centrales, ya que en contextos de baja inflación y bajo crecimiento, los tipos nominales pueden acercarse rápidamente a su límite inferior (el conocido *zero lower bound*). Esta situación obliga a recurrir con mayor frecuencia a medidas no convencionales, como las compras de activos (*quantitative easing*) o la orientación futura de expectativas (*forward guidance*), con el fin de mantener condiciones financieras acomodaticias cuando los instrumentos tradicionales ya no resultan eficaces.

Algunos economistas han sugerido incluso la necesidad de replantear los objetivos de inflación para dar más espacio de actuación a la política monetaria. Blanchard, Dell’Ariccia y Mauro (2010)²⁴, por ejemplo, propusieron explorar la posibilidad de elevar ligeramente el objetivo del 2 % para ampliar el colchón disponible frente a shocks negativos, aunque esta idea sigue siendo objeto de debate.

²² Taylor, J. B. (1993). *Discretion versus Policy Rules in Practice*. Carnegie-Rochester Conference Series on Public Policy, 39, 195–214.

²³ Orphanides, A., & Williams, J. C. (2002). *Robust Monetary Policy Rules with Unknown Natural Rates*. Brookings Papers on Economic Activity, 2002(2), 63–145.

²⁴ Blanchard, O., Dell’Ariccia, G., & Mauro, P. (2010). *Rethinking Macroeconomic Policy*. IMF Staff Position Note, SPN/10/03.

En definitiva, conocer y seguir la evolución del tipo de interés neutral resulta indispensable para valorar si la política monetaria está alineada con el ciclo económico y los objetivos de estabilidad de precios. Aunque su estimación es compleja y su uso debe ir acompañado de prudencia, r^* continúa siendo una referencia teórica y práctica de enorme valor para los responsables de política económica y para los analistas de mercados.

2.3 La Regla de Sahm: Concepto y aplicación

El análisis del ciclo económico ha sido tradicionalmente uno de los pilares de la macroeconomía aplicada, con especial relevancia para el diseño de políticas públicas contracíclicas. En este contexto, la capacidad de identificar el momento de entrada en una recesión es fundamental para activar respuestas oportunas, tanto en el ámbito fiscal como monetario. Sin embargo, los métodos convencionales de datación de recesiones presentan limitaciones importantes, especialmente en términos de rapidez y operatividad.

En términos económicos generales, una recesión se define como una contracción significativa de la actividad económica que se prolonga durante varios meses y que afecta de forma simultánea a variables como el producto interior bruto (PIB), el empleo, la inversión, la producción industrial y el consumo. Aunque la definición popular suele aludir a dos trimestres consecutivos de caída del PIB real, esta aproximación resulta excesivamente mecánica. En Estados Unidos, la referencia oficial es la establecida por el *National Bureau of Economic Research* (NBER), que considera una recesión como “una disminución significativa de la actividad económica que se extiende por toda la economía y que dura más de unos pocos meses” (NBER, 2020)²⁵. Esta perspectiva adopta un enfoque cualitativo y multivariable, lo que, si bien aporta riqueza analítica, también introduce retrasos en la identificación formal del punto de giro cíclico.

En este contexto surge la denominada Regla de Sahm, que ha emergido en los últimos años como una herramienta sencilla y robusta para detectar en tiempo real los cambios de fase en el ciclo económico, a partir del comportamiento del mercado laboral. Esta regla fue formulada por la economista Claudia Sahm, ex asesora del *Council of Economic Advisers* (CEA) de la Casa Blanca y ex investigadora de la Reserva Federal, con el objetivo de establecer un umbral empírico que permitiera anticipar el inicio de una recesión de forma operativa.

²⁵ National Bureau of Economic Research. (2020). US Business Cycle Expansions and Contractions. <https://www.nber.org/research/data/us-business-cycle-expansions-and-contractions>

En su formulación original (Sahm, 2019)²⁶, la regla establece que puede considerarse iniciada una recesión cuando la media móvil de tres meses de la tasa de desempleo aumenta al menos 0,50 puntos porcentuales respecto al mínimo de los doce meses previos. Esta condición ha demostrado una capacidad de señalización notable en todos los ciclos económicos estadounidenses desde la década de 1970, sin haber generado falsos positivos en periodos de expansión.

La lógica subyacente a esta regla es relativamente simple: en fases tempranas de una contracción económica, el mercado laboral suele deteriorarse de forma más rápida y sensible que otras variables macroeconómicas, como el PIB o el gasto agregado, cuyas revisiones y ajustes suelen retrasarse. En este sentido, el desempleo actúa como un indicador adelantado confiable. A diferencia de la cronología oficial del NBER, que declara el inicio de una recesión varios meses después de que esta haya comenzado —una vez consolidados los datos de PIB, consumo, inversión y producción industrial—, la Regla de Sahm permite una identificación temprana, lo que la convierte en una herramienta potencialmente operativa para activar políticas públicas de forma más ágil (Sahm, 2020)²⁷.

En términos prácticos, esta regla ha sido considerada como un mecanismo automatizable para poner en marcha estabilizadores fiscales automáticos. En su etapa como asesora del CEA durante la Administración Obama, Sahm propuso vincular determinados pagos directos a los hogares —como cheques de estímulo— a la activación de la regla, de modo que su aplicación no dependiera de negociaciones políticas ni de la cronología del NBER. El argumento de fondo es que, si se desea que el estímulo fiscal cumpla una función verdaderamente estabilizadora, debe llegar a los hogares en la fase inicial de la recesión, no cuando sus efectos ya están plenamente desplegados (Sahm, 2019)²⁸.

Desde el punto de vista de la política monetaria, la Regla de Sahm puede ser útil como señal complementaria para calibrar el tono de las decisiones del banco central. En particular, si bien la Reserva Federal no utiliza esta regla como guía formal, su capacidad de anticipación respecto al NBER la hace relevante en escenarios de alta incertidumbre. De hecho, en su *Monetary*

²⁶ Sahm, C. (2019). *Direct stimulus payments to individuals*. Brookings Institution.

<https://www.brookings.edu/research/direct-stimulus-payments-to-individuals/>

²⁷ Sahm, C. (2020). Recession ready: The need for automatic stabilizers. In H. Boushey, R. Nunn, & J. Eberly (Eds.), *Recession Ready: Fiscal Policies to Stabilize the American Economy* (pp. 3–21). Brookings Institution Press.

²⁸ Sahm, C. (2019). *Direct stimulus payments to individuals*. Brookings Institution.

<https://www.brookings.edu/research/direct-stimulus-payments-to-individuals/>

Policy Report de julio de 2020, la propia Fed reconocía la utilidad de algunos indicadores del mercado laboral —entre ellos, las medias móviles del desempleo— para detectar de forma más temprana cambios en la dinámica macroeconómica (Federal Reserve Board, 2020)²⁹. Asimismo, el *Congressional Budget Office* (CBO) ha incorporado simulaciones basadas en reglas similares para proyectar escenarios de impacto fiscal en recesiones futuras (CBO, 2022)³⁰.

Ahora bien, como toda herramienta empírica, la Regla de Sahm no está exenta de limitaciones. Una de las principales es que no anticipa la recesión en sentido estricto, sino que la confirma en su fase incipiente. Es decir, cuando la condición técnica se cumple, la economía ya ha empezado a deteriorarse, lo que puede limitar parcialmente su utilidad como herramienta preventiva en política monetaria. No obstante, su capacidad de detección rápida —entre uno y dos meses tras el punto de giro— supone una ventaja sustancial frente a métodos tradicionales.

Otra limitación reside en su dependencia del comportamiento estructural del mercado laboral. Si este experimentara cambios significativos —por ejemplo, una menor sensibilidad del desempleo al ciclo, o una mayor volatilidad transitoria por efectos tecnológicos—, la regla podría perder fiabilidad o requerir una recalibración. Asimismo, su diseño implica una cierta sensibilidad a revisiones estadísticas: aunque se basa en datos del *Current Population Survey* (CPS), que se publican mensualmente de forma regular, estos datos pueden estar sujetos a pequeñas correcciones que, en contextos cercanos al umbral del 0,5 %, podrían modificar la activación de la señal.

En cualquier caso, los resultados históricos respaldan con solidez la eficacia de la regla. En un ejercicio de *backtesting* retrospectivo sobre los últimos siete ciclos económicos en EE. UU., la condición de Sahm se ha cumplido en todos los casos, sin generar falsos positivos. Esto la convierte en un ejemplo valioso de cómo reglas simples, basadas en datos públicos y de alta frecuencia, pueden aportar criterios operativos robustos para la formulación de políticas económicas más ágiles y efectivas (Bivens, 2020)³¹.

A lo largo del presente trabajo se utilizará esta regla como instrumento empírico de validación

²⁹ Federal Reserve Board. (2020). *Monetary Policy Report – July 2020*.

https://www.federalreserve.gov/monetarypolicy/mpr_default.htm

³⁰ Congressional Budget Office. (2022). *The Budget and Economic Outlook: 2022 to 2032*.

<https://www.cbo.gov/publication/57950>

³¹ Bivens, J. (2020). *A simple rule can help guide stimulus checks to the right people at the right time*. Economic Policy Institute. <https://www.epi.org/blog/a-simple-rule-can-help-guide-stimulus-checks-to-the-right-people-at-the-right-time/>

del ciclo económico, complementando la estimación del tipo de interés neutral. En concreto, se aplicará sobre datos históricos para identificar con precisión los momentos de entrada en recesión y evaluar en qué medida una política monetaria mal alineada —con un tipo de interés real por encima del neutral estimado— puede coincidir o incluso preceder al deterioro del mercado laboral, generando así condiciones propicias para la activación de la regla.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA Y DESARROLLO TÉCNICO

3.1 Fuentes de datos

Para llevar a cabo la estimación empírica del tipo de interés neutral mediante el modelo de Laubach-Williams, así como para aplicar posteriormente indicadores de alerta como la Regla de Sahm o la Regla heurística, se ha construido una base de datos macroeconómica y financiera de frecuencia mensual que incorpora las principales variables relevantes para el análisis. Las fuentes utilizadas han sido principalmente la plataforma *Federal Reserve Economic Data* (FRED), gestionada por la Reserva Federal de San Luis, y la cronología oficial de recesiones publicada por el *National Bureau of Economic Research* (NBER).

La elección de FRED se ha fundamentado en su acceso abierto, su fiabilidad metodológica y la consistencia histórica de sus series. En concreto, se han recopilado las siguientes variables económicas y financieras de referencia:

- Effective Federal Funds Rate (FEDFUNDS): tipo de interés nominal diario utilizado como principal instrumento de política monetaria.
- Rendimientos del bono del Tesoro a 2 y 10 años (GS2 y GS10): indicadores de expectativas de tipos en distintos horizontes temporales.
- Breakeven inflation a 10 años (T10YIE): medida de inflación esperada derivada de la diferencia entre bonos nominales y ligados a la inflación (TIPS).
- Índices de precios PCE (PCEPI) y Core PCE (PCEPILFE): utilizados para calcular la inflación general y subyacente, respectivamente.
- Producto Interior Bruto real (GDPC1) y potencial (GDPPOT): necesarios para estimar el output gap, componente central del modelo de tipo neutral.
- Tasa de desempleo civil (UNRATE): variable clave para evaluar el ciclo laboral y

construir tanto la Regla de Sahn como indicadores derivados.

Adicionalmente, se han incorporado nuevas variables financieras que permiten enriquecer el análisis empírico y construir modelos predictivos más completos:

- Volatilidad implícita del mercado (VIX): proxy del sentimiento de riesgo agregado.
- Índice S&P 500 (SP500): del cual se han derivado los retornos logarítmicos acumulados a 3 y 6 meses como indicador adelantado de expectativas bursátiles.
- Spread de crédito a 10 años: calculado como la diferencia entre el rendimiento de bonos corporativos grado inversión (BAA10Y) y los bonos del Tesoro a 10 años (GS10), reflejando el riesgo percibido por el mercado.
- Recesiones oficiales (USREC): variable binaria proporcionada por el NBER que indica los periodos de contracción económica.

En términos de tratamiento de datos, se ha llevado a cabo un proceso de homogeneización de frecuencias temporales. Mientras que la mayoría de las series se han obtenido directamente en frecuencia mensual desde FRED, los datos de PIB real y PIB potencial, originalmente trimestrales, se han interpolado linealmente para obtener valores mensuales. Este procedimiento, ampliamente utilizado en macroeconomía, asume una evolución lineal entre trimestres consecutivos, lo cual es razonable dado el comportamiento tendencial y de baja volatilidad del PIB.

Los retornos del S&P 500 se han calculado a partir del precio ajustado mensual (Adj Close) obtenido a través de la plataforma Yahoo Finance. Para garantizar coherencia temporal con el resto de la base, se ha aplicado un resampleo mensual, tomando el último valor de cada mes, y se han computado retornos logarítmicos acumulados en ventanas de 3 y 6 meses.

El spread de crédito se ha calculado internamente como variable derivada, y tanto este como el índice VIX y los rendimientos de los bonos del Tesoro han sido tratados sin interpolación adicional, dado que sus frecuencias son mensuales y sus series suficientemente extensas.

El horizonte temporal cubierto por la base de datos se ha extendido desde enero de 1960 hasta el periodo más reciente disponible, lo que permite analizar múltiples ciclos económicos, contrastar resultados en distintos contextos históricos y robustecer los ejercicios predictivos posteriores.

En caso de que se integren otras variables adicionales en fases futuras del trabajo —como indicadores adelantados, encuestas de confianza o medidas alternativas de inflación esperada—, su incorporación será debidamente justificada en el capítulo correspondiente.

En conclusión, la base de datos elaborada constituye un insumo sólido, amplio y estructurado que permite implementar de forma rigurosa la estimación del tipo neutral, así como evaluar la validez predictiva de diversos modelos empíricos aplicados al ciclo económico estadounidense.

3.2 Algoritmo de estimación del tipo de interés neutral: implementación del modelo Laubach-Williams

Para estimar el tipo de interés neutral en Estados Unidos se ha implementado el modelo estructural de Laubach y Williams (2003), utilizando el procedimiento estadístico del Filtro de Kalman. Este modelo, ampliamente utilizado tanto en investigación académica como por bancos centrales, permite inferir variables no observables—como el propio tipo neutral, el producto potencial y su tasa de crecimiento tendencial—a partir del comportamiento conjunto de variables observadas.

En nuestro caso particular, el procedimiento técnico seguido ha involucrado varias etapas claramente definidas y algunas adaptaciones específicas respecto al modelo original, que merece la pena destacar:

En primer lugar, las variables observadas empleadas para la estimación del modelo han sido dos: el crecimiento interanual del Producto Interior Bruto (PIB) real y la inflación subyacente medida por el índice Core PCE. Es relevante señalar que, a diferencia del modelo original que emplea datos trimestrales, nosotros hemos decidido realizar la estimación con frecuencia mensual, con el fin de aumentar la granularidad y precisión temporal del análisis. Esto ha implicado realizar una interpolación lineal de las series trimestrales del PIB real y del PIB potencial proporcionado por la Congressional Budget Office (CBO), obteniendo así valores mensuales para ambas variables.

En segundo lugar, y como paso previo indispensable para mejorar la estabilidad numérica del modelo, ambas variables observadas (crecimiento del PIB e inflación) fueron estandarizadas. Esta transformación no es explícitamente utilizada en el modelo original, pero fue incorporada en nuestro caso tras diversas pruebas iniciales que mostraron dificultades de convergencia numérica. Concretamente, se aplicó la estandarización típica (restando la media y dividiendo

por la desviación estándar de cada serie), facilitando así el proceso posterior de estimación mediante el Filtro de Kalman.

Una vez preprocesados los datos, se estableció la estructura de nuestro modelo en forma de espacio de estados. Siguiendo fielmente el planteamiento teórico, definimos cuatro variables latentes principales:

- Output gap (brecha de producto), entendido como la desviación del PIB observado respecto a su nivel potencial.
- Crecimiento tendencial del producto potencial, que captura la dinámica subyacente del crecimiento económico estructural.
- Componente estructural adicional (z_t), que incorpora factores latentes adicionales no directamente observables que influyen sobre el tipo neutral.
- Tipo de interés neutral (r_t^*), obtenido como combinación lineal del crecimiento tendencial y el componente adicional z_t .

Respecto a la parametrización técnica del modelo, se introdujeron ciertas adaptaciones específicas:

- La matriz de transición, que define cómo evolucionan los estados latentes a lo largo del tiempo, fue configurada como una matriz identidad. Esto supone asumir que cada estado latente sigue un proceso de paseo aleatorio, acorde con la propuesta original.
- La matriz de covarianzas del error de transición fue definida diagonalmente, con varianzas ajustadas manualmente, después de múltiples pruebas realizadas para asegurar un balance adecuado entre flexibilidad del modelo y estabilidad numérica. En concreto, establecimos valores relativamente moderados en las varianzas de los estados latentes (por ejemplo, 0.01 para el output gap y 0.001 para el componente estructural z_t), asegurando suficiente flexibilidad para capturar cambios estructurales sin comprometer la estabilidad del algoritmo.
- La matriz de observación, que vincula los estados latentes con las variables observadas, fue especificada de acuerdo con las ecuaciones estructurales del modelo original. No obstante, fijamos el valor del coeficiente ccc, que liga el crecimiento tendencial con el tipo neutral, en un valor unitario ($c = 1$) tras constatar en las pruebas preliminares que

dicho valor facilitaba la convergencia y resultaba razonable desde una perspectiva económica.

- Finalmente, la covarianza del error de observación también fue ajustada manualmente (0.5 para crecimiento del PIB y 0.2 para inflación), reflejando de forma aproximada la incertidumbre observada en los datos históricos reales.

El algoritmo implementado utiliza el paquete de Python pykalman para ejecutar el Filtro de Kalman, estimando los estados latentes de forma suavizada (óptima) a partir de los datos observados. Una vez obtenidos estos estados latentes (entre ellos el tipo neutral), se procedió a su reescalado a unidades económicas interpretables, deshaciendo la estandarización inicial, para permitir un análisis económico adecuado en el capítulo posterior del estudio.

En resumen, la implementación del modelo Laubach-Williams realizada en este trabajo mantiene la estructura fundamental y coherente con el marco teórico original, pero incorpora adaptaciones metodológicas y técnicas específicas diseñadas para mejorar la precisión, estabilidad numérica y frecuencia temporal del análisis. Estas decisiones se adoptaron tras una exploración preliminar de los datos y distintos ensayos numéricos, buscando siempre asegurar la solidez y la robustez empírica de las estimaciones obtenidas, las cuales serán interpretadas en detalle en el capítulo siguiente.

3.3 Cálculo de la brecha $i - r^*$ y análisis histórico

Una vez realizada la estimación mensual del tipo de interés neutral mediante el modelo estructural de Laubach-Williams descrito anteriormente, el siguiente paso metodológico consistió en calcular una variable adicional denominada brecha de tipos de interés o *gap r*. Esta variable se define como la diferencia entre el tipo de interés real observado y el tipo de interés neutral estimado, y constituye un indicador central para evaluar empíricamente la orientación de la política monetaria en cada momento del tiempo.

Desde un punto de vista técnico, el cálculo de esta brecha implicó los siguientes pasos concretos:

En primer lugar, se obtuvo una serie histórica del **tipo de interés real efectivo**. Para ello, utilizamos como referencia la tasa nominal mensual del tipo de interés de los fondos federales (*Effective Federal Funds Rate*), a la que restamos la tasa mensual de inflación interanual subyacente medida mediante el índice Core PCE. La elección del índice Core PCE (frente a

otras alternativas como la inflación general o el CPI) se justificó técnicamente por su menor volatilidad y por ser el indicador preferido por la Reserva Federal en sus análisis oficiales.

A continuación, la serie del tipo de interés real así calculada fue combinada con la estimación mensual obtenida previamente para el tipo de interés neutral (r_t^*) mediante el modelo Laubach-Williams. De esta manera, definimos la brecha como:

$$gap\ r_t = i_t^{real} - r_t^*$$

donde i_t^{real} es el tipo de interés real mensual calculado, y r_t^* es la estimación del tipo neutral obtenida en el apartado anterior.

Este cálculo resultó directo, al disponer de ambas variables en frecuencia mensual desde 1960 hasta la actualidad. Con el fin de preservar la coherencia en la base de datos y facilitar análisis posteriores, el resultado fue añadido como una nueva columna en el dataset general utilizado en todo el trabajo empírico, etiquetado explícitamente como *gap_r*.

Finalmente, desde una perspectiva metodológica, preparamos el análisis histórico del comportamiento de la brecha *gap r* en relación con las fases de expansión y recesión de la economía estadounidense. Para ello, realizamos un tratamiento adicional de los datos históricos, incorporando en la base general la variable binaria "recesión" facilitada por el NBER (USREC). Esta información fue integrada en forma mensual, codificando con un valor 1 los periodos oficialmente identificados como recesivos, y 0 para los periodos expansivos.

Gracias a esta estructura final del conjunto de datos, en el capítulo posterior dedicado al análisis empírico (capítulo 4), será posible examinar con precisión la evolución histórica de la brecha de tipos en relación con el inicio de recesiones oficiales. Concretamente, se evaluará visualmente (mediante gráficos) y estadísticamente si la brecha tiende a tomar valores extremos positivos (indicando una política monetaria restrictiva) en los meses previos al inicio de una recesión.

En conclusión, el procedimiento técnico descrito en este apartado proporcionó las bases empíricas necesarias para analizar en detalle, en la siguiente fase del trabajo, la relación dinámica entre la política monetaria aplicada (representada por la brecha de tipos) y el ciclo económico observado históricamente en Estados Unidos.

3.4 Implementación de la Regla de Sahm en Python

Como complemento empírico al análisis del tipo de interés neutral, se ha implementado técnicamente la Regla de Sahm con el objetivo de identificar, en tiempo real, cambios de fase del ciclo económico estadounidense, particularmente el inicio temprano de las recesiones. Dicha implementación se ha llevado a cabo utilizando lenguaje Python, siguiendo una estructura lógica que permite trasladar la formulación teórica de esta regla hacia un indicador empírico replicable.

Desde un punto de vista metodológico, en primer lugar, se ha empleado la tasa mensual de desempleo civil estadounidense (*Civilian Unemployment Rate* - UNRATE), obtenida directamente de la base de datos FRED mencionada en el apartado 3.1. Esta serie se ha utilizado sin requerir ningún tipo de tratamiento adicional, dado que se encuentra disponible con la frecuencia mensual adecuada y no presenta vacíos significativos que requieran interpolación.

Posteriormente, para aplicar la definición concreta de la Regla de Sahm, se ha generado una nueva serie derivada a partir de la tasa original de desempleo. Dicha serie corresponde a la tasa de desempleo suavizada mediante una media móvil simple de tres meses. Para ello, se ha utilizado la función `rolling` del paquete `pandas` en Python, capaz de calcular promedios móviles de forma rápida y precisa.

Adicionalmente, se ha calculado también una segunda serie, que representa el mínimo valor alcanzado por la tasa suavizada durante los doce meses anteriores (mínimo móvil anual). Este procedimiento también se ha implementado mediante la función `rolling(min_periods=12)` combinada con el método `.min()`, asegurando así que el cálculo siempre contemple exactamente los doce meses previos al mes actual.

Siguiendo la lógica original de Sahm, se ha obtenido finalmente una señal binaria de alerta de recesión. Esta señal toma valor 1 cuando la tasa de desempleo suavizada supera en al menos 0,50 puntos porcentuales al mínimo móvil anual previamente calculado.

La señal resultante ha sido integrada directamente en la base de datos general que sustenta todo el análisis empírico, bajo la denominación clara y específica de *sahm_signal*. De esta manera, se ha obtenido una serie histórica en frecuencia mensual que identifica de forma exacta aquellos meses en los cuales se habría activado la alerta de recesión según los criterios definidos por la Regla de Sahm, desde el año 1960 hasta la actualidad.

En definitiva, esta implementación técnica de la Regla de Sahm ha proporcionado una

herramienta robusta y clara para identificar cambios cíclicos tempranos en Estados Unidos, sentando las bases necesarias para el análisis detallado y la discusión empírica sobre su desempeño predictivo y relevancia económica en el capítulo de resultados del presente trabajo

3.5 Modelo logit y regla heurística de probabilidad de recesión: formulación e interpretación

En esta última sección metodológica se expone el proceso seguido para construir un sistema de predicción del ciclo económico centrado en la detección anticipada de recesiones. A tal fin, se han desarrollado dos enfoques complementarios: por un lado, un modelo estadístico de regresión logística (logit) y, por otro, una regla heurística interpretativa basada en la combinación de señales económicas, denominada en el resto del trabajo como la “Regla heurística”.

Ambos métodos comparten el mismo objetivo: estimar si Estados Unidos entrará en recesión en los próximos seis meses, siendo esta variable binaria el objetivo del análisis predictivo. Sin embargo, su naturaleza técnica y su grado de complejidad son diferentes: el modelo logit permite cuantificar probabilidades estimadas de forma continua y ajustada estadísticamente, mientras que la Regla heurística opera como un criterio binario, activado bajo determinadas condiciones macroeconómicas combinadas.

Modelo logit

El desarrollo del modelo logit ha seguido una lógica exploratoria y empírica, en la que se han probado diferentes combinaciones de variables explicativas para identificar aquella estructura que ofreciese el mejor compromiso entre interpretabilidad económica y rendimiento predictivo. Inicialmente, se valoró el uso del tipo de interés de los fondos federales como variable directa, pero tras diversas pruebas se optó por utilizar su variación en los últimos tres meses, por capturar mejor los cambios recientes en la postura de política monetaria. Igualmente, se consideró la inclusión de la pendiente de la curva de tipos, variable clásica en la literatura predictiva de recesiones, aunque finalmente fue descartada por su limitada contribución marginal y por su dificultad para anticipar con precisión el horizonte temporal deseado.

En cuanto a las variables que sí conforman la versión final del modelo, se seleccionaron: (i) la brecha entre el tipo de interés real ex post y el tipo neutral estimado, que refleja la orientación estructural de la política monetaria respecto a su nivel neutral; (ii) la variación en tres meses de

los tipos de interés de la Reserva Federal, como reflejo de endurecimiento reciente; (iii) la variación del desempleo en seis meses, que permite detectar deterioro acumulado del mercado laboral; y (iv) los retornos acumulados en tres meses del índice S&P 500, utilizados como indicador de las expectativas de los mercados financieros.

El modelo se ha entrenado y validado utilizando validación cruzada temporal (*TimeSeriesSplit*), garantizando que los conjuntos de entrenamiento y prueba respetan el orden cronológico. En cada partición, se ha calculado el área bajo la curva ROC (AUC) como métrica principal de evaluación, y se han promediado los coeficientes estimados para cada variable, con el fin de analizar su signo, su magnitud relativa y su consistencia.

Regla heurística

Junto al modelo logit, se ha diseñado una regla heurística binaria con el objetivo de proporcionar un sistema de alerta sencillo, robusto y fácil de interpretar. Esta regla no depende de un algoritmo estadístico, sino que se activa únicamente cuando se cumplen simultáneamente tres condiciones moderadas de deterioro económico: (i) el tipo de interés real supera al neutral en más de tres cuartos de punto, lo que indica una orientación contractiva de la política monetaria; (ii) el desempleo ha aumentado ligeramente en los últimos seis meses, lo que puede interpretarse como señal temprana de enfriamiento laboral; y (iii) el S&P 500 ha caído más de un 2 % en términos reales, lo que suele asociarse a revisiones negativas de las perspectivas macroeconómicas por parte de los inversores.

La construcción de esta regla ha sido el resultado de un proceso iterativo en el que se exploraron múltiples combinaciones: versiones más estrictas (con dos condiciones) resultaron en tasas de acierto insuficientes; otras más laxas (por ejemplo, activación con una sola condición o con umbrales muy bajos) generaron señales falsas de forma recurrente. También se probaron variantes anidadas que permitían activación por caminos alternativos (por ejemplo, deterioro laboral o bursátil combinado con una brecha de tipos menos exigente), pero en la mayoría de los casos, el modelo se volvió menos interpretable o perdió capacidad de discriminación. La versión final, con los tres umbrales moderados y simultáneos, logra un equilibrio entre sensibilidad y precisión, manteniendo la claridad conceptual.

En los apartados siguientes del trabajo se analiza empíricamente el rendimiento de ambas propuestas, tanto en términos de capacidad predictiva como de anticipación temporal. Su comparación permitirá valorar si un enfoque estadístico formal aporta ventajas claras respecto

a una regla estructural bien calibrada, o si ambos pueden ser considerados herramientas complementarias para el análisis prospectivo del ciclo económico.

3.6 Limitaciones y robustez de los enfoques

Como todo trabajo empírico en macroeconomía aplicada, este estudio presenta una serie de limitaciones que conviene reconocer y tener en cuenta al interpretar sus resultados. En primer lugar, la estimación del tipo de interés neutral mediante el modelo estructural de Laubach y Williams, aunque ampliamente respaldada en la literatura académica, requiere supuestos no observables —como la evolución del producto potencial o la tasa natural de desempleo— que introducen un margen de incertidumbre en los valores obtenidos. A ello se añade el hecho de que ciertas series de datos, como el PIB potencial o el desempleo, deben ser interpoladas o suavizadas para su uso mensual, lo que puede generar pequeñas distorsiones temporales en las estimaciones.

Desde el punto de vista metodológico, las regresiones y reglas predictivas construidas en este trabajo se enfrentan al reto de modelar eventos relativamente escasos, como son las recesiones, lo que condiciona la distribución de la variable dependiente y puede afectar a la potencia estadística de algunos resultados. Aunque se han utilizado técnicas de validación cruzada temporal y se ha buscado evitar el sobreajuste, no puede garantizarse que los modelos conserven la misma capacidad predictiva en futuros entornos económicos significativamente distintos.

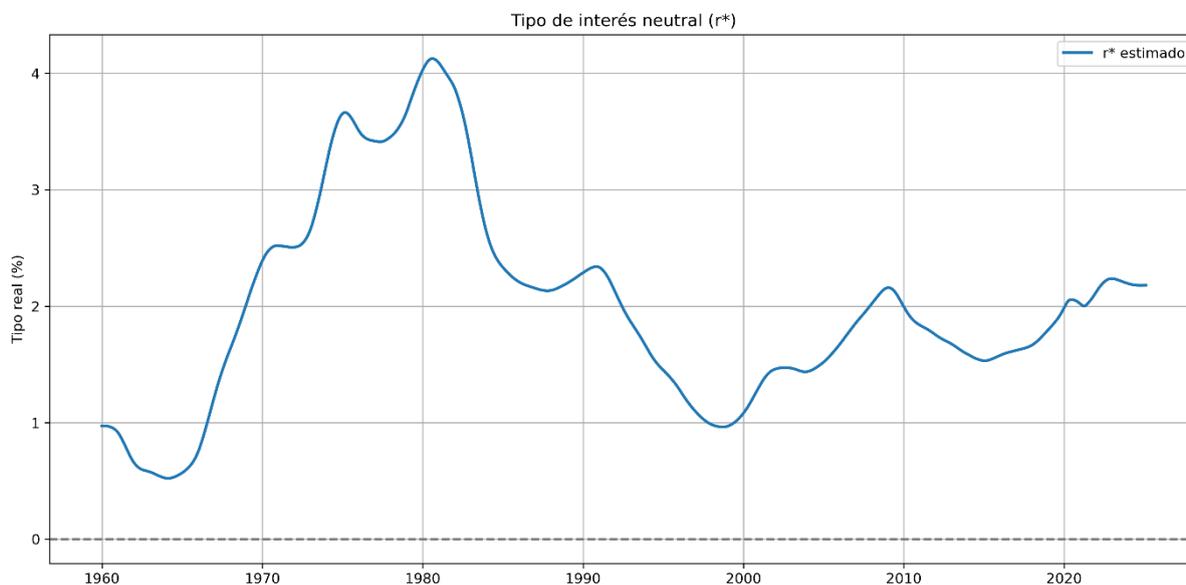
Por último, tanto el modelo logit como la Regla heurística se basan en relaciones empíricas observadas en el pasado, lo que implica asumir una cierta estabilidad estructural en la forma en que las variables económicas se relacionan con el ciclo. Este supuesto puede no mantenerse ante cambios profundos en la política monetaria, en los mercados financieros o en el funcionamiento del mercado laboral. No obstante, el diseño de ambos modelos —uno estadístico y otro heurístico— responde precisamente a la voluntad de explorar enfoques complementarios que aporten robustez analítica desde perspectivas distintas pero compatibles.

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS EMPÍRICO Y RESULTADOS

4.1 Estimación histórica del tipo de interés neutral

Una vez implementado el modelo de Laubach y Williams, se ha obtenido una estimación mensual del tipo de interés neutral real de la economía estadounidense (r^*) desde 1960 hasta

comienzos de 2025. La serie resultante refleja una trayectoria coherente con los grandes movimientos estructurales de la economía, lo cual refuerza la validez del modelo como aproximación empírica a esta variable no observable.



En las primeras décadas de la muestra, r^* se mantiene en niveles relativamente altos, superando el 3 % durante buena parte de los años 70. Este comportamiento puede interpretarse en el contexto de una economía caracterizada por altas tasas de inflación, tipos nominales elevados y una mayor preferencia por la liquidez, lo que requería tipos reales sustanciales para estabilizar la demanda agregada. En el entorno post-shock petrolero y durante el endurecimiento monetario de la Reserva Federal bajo Paul Volcker, el tipo neutral estimado alcanza incluso valores superiores al 4 %, reflejo de una economía tensionada y con expectativas inflacionistas aún ancladas en niveles elevados.

A partir de los años 80 y, de forma más clara desde los 90, se observa una tendencia descendente sostenida. El modelo estima una caída progresiva de r^* , que llega a situarse en el entorno del 2 % a comienzos de los 2000 y continúa su descenso durante las décadas posteriores. Esta dinámica es consistente con una economía madura, con menor crecimiento potencial, mayor estabilidad de precios y un entorno financiero más globalizado y propenso al ahorro estructural. El punto más bajo de la serie se alcanza en el periodo 2013–2015, con valores cercanos al 1.5–1.6 %, lo que resulta coherente con los años de tipos cero tras la crisis financiera global.

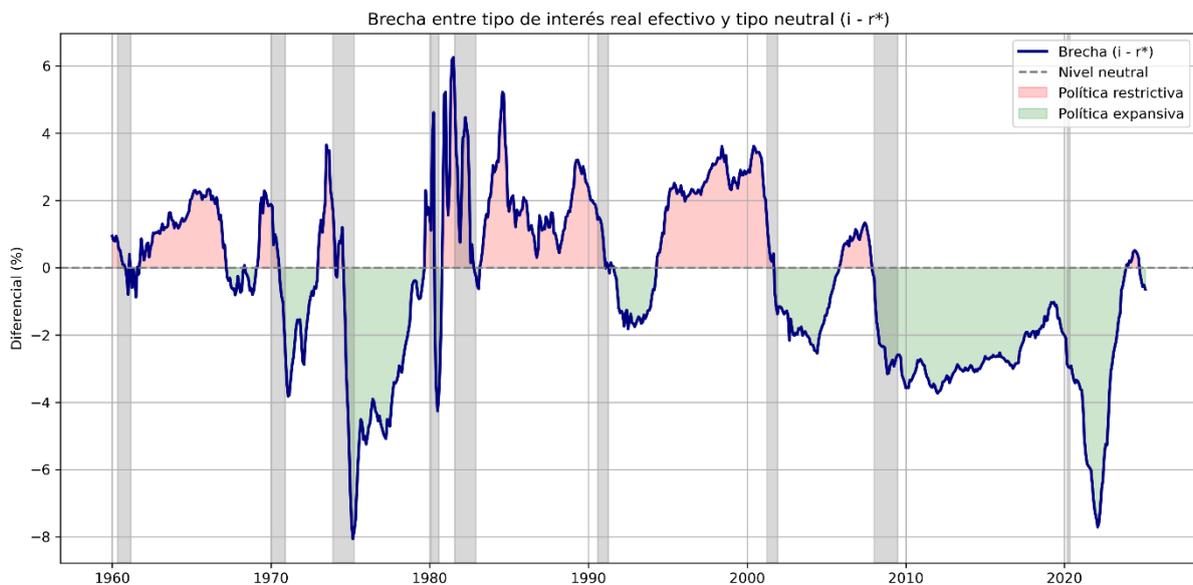
En los años recientes, la estimación muestra una ligera recuperación. Desde 2021 en adelante, coincidiendo con el fuerte repunte inflacionario post-COVID y el giro de política monetaria de

la Reserva Federal, r^* ha vuelto a situarse por encima del 2 %, alcanzando máximos cercanos al 2.2 % en el año 2023. Este rebote debe interpretarse con cautela, ya que podría reflejar tanto un ajuste transitorio de expectativas como un verdadero desplazamiento del equilibrio neutral debido a cambios estructurales en el ahorro, la inversión o la productividad.

En resumen, el modelo permite identificar tres grandes fases en la evolución de r^* : una etapa inicial de niveles elevados (1960–1985), una tendencia descendente prolongada (1985–2015), y una fase reciente de estabilización o ligero repunte (2015–2024). Esta evolución refuerza la idea de que el tipo neutral no es un parámetro fijo, sino una variable dinámica y endógena al contexto económico. En los siguientes apartados, esta serie será utilizada para calcular la brecha de tipos y analizar su valor informativo en la anticipación de recesiones.

4.2 Análisis de la brecha de tipos como señal de recesión

La diferencia entre el tipo de interés real observado y el tipo de interés neutral estimado — conocida como brecha $i - r^*$ — constituye un indicador crucial para interpretar el tono de la política monetaria. Esta brecha adopta valores positivos cuando la política es contractiva (tipo real por encima de su nivel de equilibrio) y negativos cuando es expansiva. Su evolución histórica permite, además, observar regularidades en la dinámica del ciclo económico estadounidense.



A partir del modelo desarrollado en el apartado 3.2, se ha construido una serie mensual de la brecha entre el tipo real efectivo (calculado como el tipo de los fondos federales menos la inflación subyacente interanual) y el tipo neutral estimado. La visualización conjunta con los

episodios de recesión definidos por el NBER revela una pauta coherente: en la mayoría de los ciclos, la brecha tiende a volverse claramente positiva antes del inicio de una recesión, reflejando un endurecimiento de la política monetaria. Tal fue el caso en las recesiones de 1970, 1974-75, 1980 y 1981-82, donde el diferencial superó en ocasiones los tres o incluso los cinco puntos porcentuales. Un comportamiento similar, aunque de menor magnitud, puede observarse en 1989-90 y 2000-01.

Durante las fases recesivas, la brecha cae abruptamente y alcanza valores negativos sostenidos, lo que refleja los esfuerzos de la Reserva Federal por estabilizar la economía mediante recortes del tipo nominal. El ejemplo más claro es la Gran Recesión de 2008-09, durante la cual la brecha descendió por debajo de -3 %, y permaneció en terreno negativo durante la larga recuperación posterior. También destaca el episodio de 2020, donde la combinación de un colapso de la actividad y un recorte agresivo del tipo de referencia llevó a una brecha inferior a -5 %, el nivel más bajo de toda la muestra.

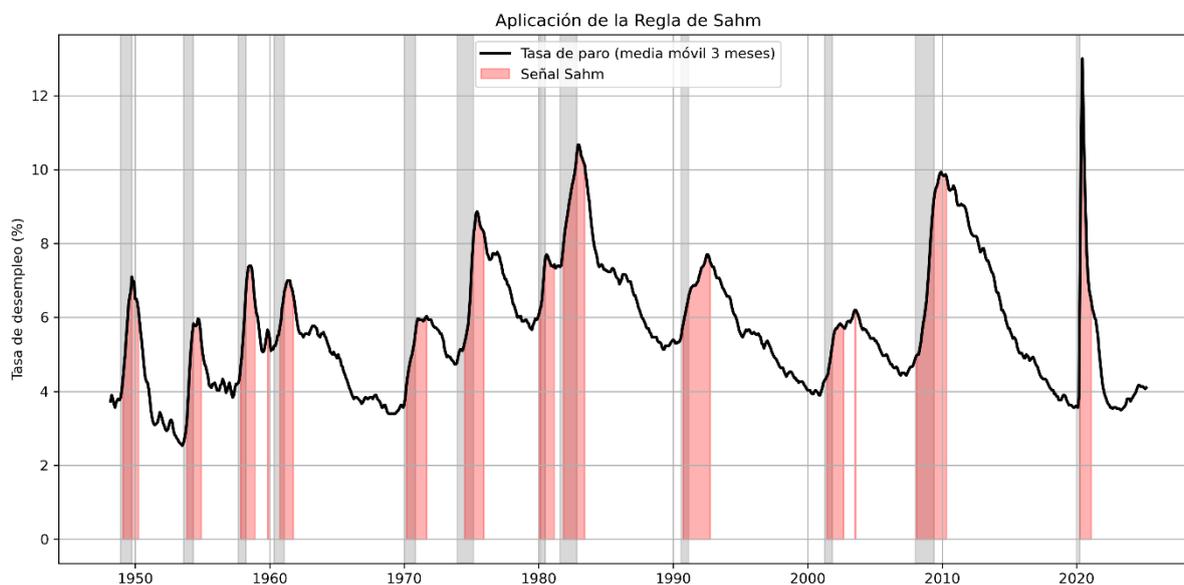
En el periodo más reciente, a partir de 2022, se produce un ajuste significativo en la política monetaria, con subidas acumuladas del tipo de los fondos federales superiores a 500 puntos básicos. Sin embargo, este endurecimiento no se ha traducido en una brecha claramente positiva. Si bien se ha reducido con respecto a los mínimos extremos de la pandemia, la brecha se ha mantenido en valores negativos o ligeramente por debajo de cero, alcanzando un máximo de aproximadamente +0,5 % en el verano de 2024. Esta evolución indica que, desde el punto de vista de los tipos reales ajustados por r^* , la política de la Fed ha seguido siendo neutral o levemente expansiva, en parte debido a la persistencia de una inflación subyacente elevada.

En definitiva, el análisis de la brecha $i - r^*$ revela una notable capacidad para anticipar giros del ciclo económico, aunque con diferencias relevantes entre episodios. La ausencia de valores significativamente positivos en el último ciclo podría sugerir que las condiciones financieras, pese al endurecimiento nominal, no han sido restrictivas en términos reales, lo que complica el diagnóstico sobre una posible recesión inminente.

4.3 Eficacia de la Regla de Sahm en detección de recesiones

La aplicación de la Regla de Sahm al conjunto de datos mensuales de desempleo desde 1948 permite observar con claridad su estrecha relación con los episodios recesivos identificados por el NBER. En cada una de las once recesiones desde la posguerra, sombreadas en el gráfico en gris, la señal se activa con un ligero desfase respecto al inicio oficial del ciclo bajista,

detectando en todos los casos un deterioro significativo y sostenido del mercado laboral. Esta sensibilidad al cambio temprano en la tasa de paro convierte a la regla en un instrumento fiable de diagnóstico cíclico.



A diferencia de otros indicadores adelantados de recesión, como el diferencial de tipos o determinados agregados monetarios, la Regla de Sahn presenta una ventaja singular: la ausencia total de falsos positivos. En los más de setenta años de muestra histórica, nunca ha emitido una señal que no haya sido seguida por una recesión reconocida oficialmente. Esta característica la dota de una gran robustez estadística, lo que explica su creciente uso como referencia complementaria por parte de bancos centrales y analistas privados.

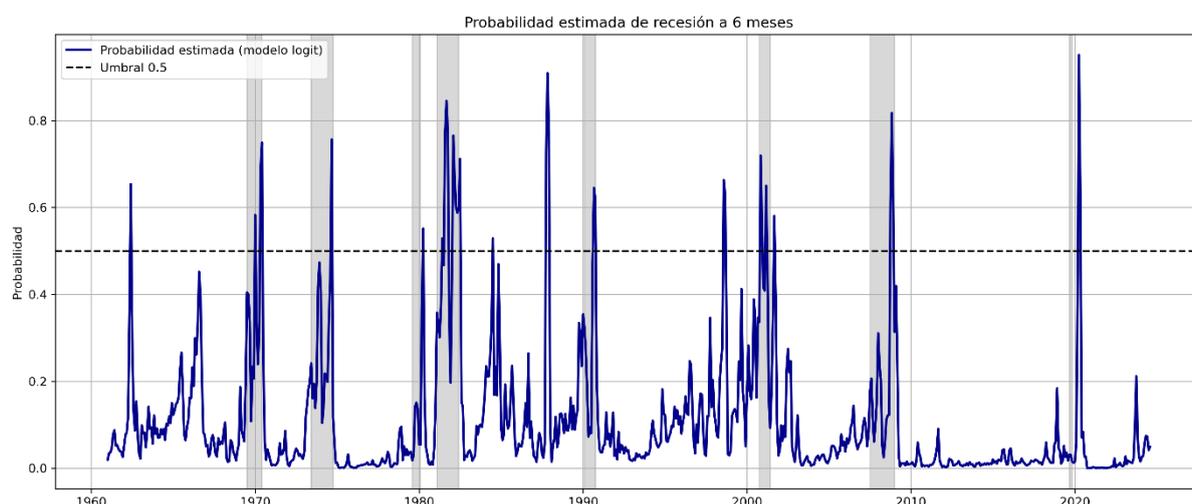
El gráfico generado a partir de su implementación muestra un patrón recurrente: las zonas en las que se activa la señal coinciden casi exactamente con los períodos de recesión sombreada definidos por el NBER. Además, en los ciclos más recientes —como las crisis de 2008 o 2020—, la señal se produce de forma temprana, reflejando de manera rápida y automática el deterioro del empleo. Esta capacidad de anticipación, sumada a su parsimonia formal y facilidad de cálculo, justifica su inclusión como variable estructural dentro de los modelos predictivos de recesión desarrollados en este trabajo.

4.4 Resultados del modelo logit y de la regla heurística

Este apartado constituye el núcleo del presente trabajo, al contrastar dos enfoques complementarios en la predicción de recesiones: un modelo logit probabilístico, basado en variables macro-financieras, y una regla heurística de activación binaria que sintetiza criterios

económicos fácilmente observables. Ambos parten de la misma hipótesis central: el deterioro simultáneo del tipo de interés real en relación con su nivel neutral, del mercado laboral y de las condiciones bursátiles anticipa con alta fiabilidad la llegada de recesiones.

En primer lugar, el modelo logit incorpora como variables explicativas cuatro indicadores: (i) la brecha entre el tipo de interés real y el tipo neutral estimado, (ii) el cambio acumulado del tipo oficial a tres meses, (iii) el aumento de la tasa de paro en seis meses y (iv) el rendimiento del S&P500 en ese mismo periodo. A través de un procedimiento de validación cruzada temporal (*TimeSeriesSplit*), el modelo muestra una elevada capacidad discriminadora, con un AUC medio del 0,876 en los cinco bloques válidos analizados. En particular, destaca su rendimiento en los periodos previos a recesiones históricas bien conocidas, donde el área bajo la curva ROC alcanza valores de hasta 0,959.



AUC por bloque temporal (solo splits válidos):

- Split 1: AUC = 0.959
- Split 2: AUC = 0.809
- Split 3: AUC = 0.940
- Split 4: AUC = 0.933
- Split 5: AUC = 0.740

AUC medio del modelo (basado en 5 splits válidos): 0.876

Tabla de coeficientes del modelo logit:

Variable	Coefficiente promedio	Sentido económico	Magnitud relativa
delta_unemployment_6m	1.7028	↑ riesgo	1.0000
gap_r	0.8872	↑ riesgo	0.5210
delta_fed_funds	-0.2872	↓ riesgo	0.1687
ret_sp500_3m	-0.1126	↓ riesgo	0.0661

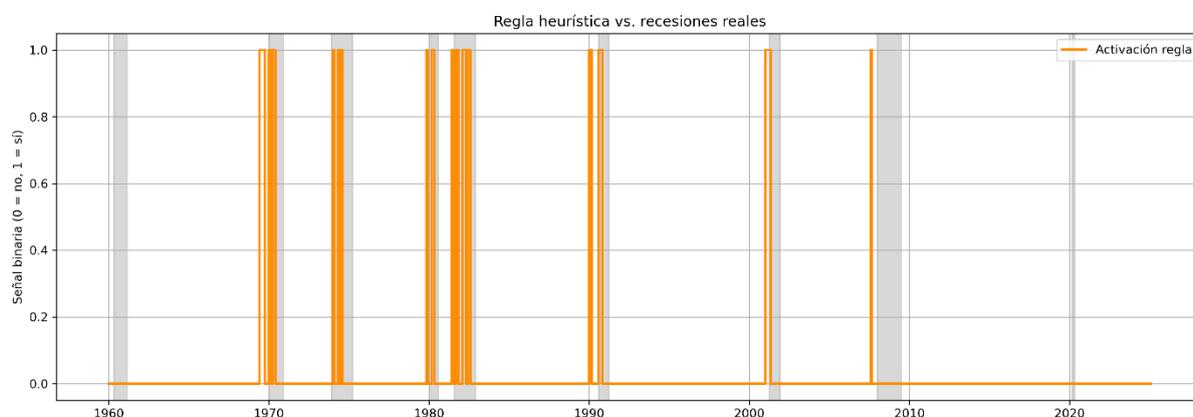
El análisis de coeficientes confirma el sentido económico de las variables seleccionadas: el aumento del desempleo es el predictor más potente del riesgo de recesión, seguido por la brecha

de tipos reales. En ambos casos, valores crecientes de estas variables se asocian a una mayor probabilidad de contracción económica, lo que valida empíricamente la hipótesis de partida. En cambio, el endurecimiento de la política monetaria y las caídas bursátiles aparecen con coeficientes negativos, como era de esperar, al representar factores que tensionan la demanda agregada.

Como complemento interpretativo, se propone una regla heurística sencilla, basada en criterios simultáneos pero fácilmente verificables, que activa una alerta si se cumplen tres condiciones: una brecha de tipos superior al 0,75%, un aumento del desempleo superior al 1% en los últimos seis meses, y un retorno negativo del S&P500 superior al -2 % en ese mismo periodo. Esta formulación combina de forma concisa tres pilares del deterioro macroeconómico: política monetaria restrictiva, enfriamiento del mercado laboral y señales de aversión al riesgo en los activos financieros.

Habrà recesión en los próximos 6 meses si:

$$(i - r^*) > 0,75\% \quad \wedge \quad \Delta \text{Desempleo}_{6m} > 1,0\% \quad \wedge \quad \text{Rentabilidad}_{S\&P500, 3m} < -2,0\%$$



🔑 Matriz de confusión:

```
[[675  8]
 [ 63 30]]
```

📊 Informe de clasificación (precisión, recall, F1-score):

	precision	recall	f1-score	support
0.0	0.915	0.988	0.950	683
1.0	0.789	0.323	0.458	93
accuracy			0.909	776
macro avg	0.852	0.655	0.704	776
weighted avg	0.900	0.909	0.891	776

La evaluación de esta regla a partir de la serie histórica confirma su utilidad como mecanismo de alerta temprana. Si bien su recall estadístico es moderado (32 %), ello responde a una limitación inherente al método de evaluación: el cálculo se restringe estrictamente a si la señal se activa en los seis meses inmediatamente anteriores al inicio de una recesión. Esta exigencia metodológica penaliza señales tempranas, lo cual es especialmente injusto en contextos donde la anticipación previa a un año sigue siendo económicamente valiosa. De hecho, el análisis gráfico revela que, con la excepción de la crisis del COVID-19 —un episodio singular y exógeno—, la regla heurística se activó en todos los casos al menos una vez en los doce meses anteriores a cada recesión desde 1960. Este comportamiento refuerza su valor como herramienta preventiva más allá de la exactitud estadística puntual.

Además, la regla presenta una elevada precisión (91 %), una tasa muy baja de falsos positivos y una implementación inmediata sin necesidad de modelos econométricos. Frente al modelo logit, que requiere procesamiento técnico y validación empírica, la regla heurística ofrece una guía simple, transparente y fácilmente replicable por analistas, inversores o responsables de política económica. En particular, su capacidad para sintetizar información clave en una señal binaria y su robustez a lo largo del tiempo la convierten en una alternativa práctica y eficaz.

En definitiva, tanto el modelo logit como la regla heurística convergen en señalar la utilidad predictiva del tipo de interés neutral como variable estructural del ciclo económico. No obstante, mientras el modelo logit optimiza el rendimiento cuantitativo con un enfoque más técnico, la regla heurística aporta una solución pragmática con alta aplicabilidad operativa. Su carácter anticipador y su consistencia empírica histórica la consagran como una de las principales contribuciones de este trabajo.

4.5 Relevancia para política monetaria y mercados financieros

Los resultados presentados a lo largo de este trabajo no solo tienen interés desde un punto de vista académico, sino que ofrecen implicaciones concretas para el diseño y evaluación de la política monetaria, así como para la toma de decisiones en los mercados financieros. En particular, tanto la estimación del tipo de interés neutral como la construcción de indicadores derivados —la brecha de tipos, el modelo logit y la regla heurística— permiten reinterpretar el ciclo económico a través de una lente estructural, en lugar de meramente coyuntural.

Desde la perspectiva de los bancos centrales, el seguimiento dinámico de la brecha entre el tipo real y su nivel neutral proporciona un marco operativo para calibrar el grado de restrictividad o expansión de la política monetaria más allá de los tipos nominales. Esta medida ayuda a evitar diagnósticos erróneos derivados de ignorar cambios en el equilibrio subyacente de la economía. Así, una brecha persistentemente positiva puede interpretarse como un signo de endurecimiento excesivo, especialmente si coincide con otras señales de desaceleración, como el aumento del desempleo o caídas bursátiles.

En este sentido, la introducción de un modelo logit que incorpore la brecha de tipos como variable estructural ha permitido validar empíricamente su relevancia predictiva. La alta capacidad discriminadora del modelo (AUC medio de 0,876) refuerza la idea de que la distancia respecto al tipo neutral contiene información valiosa sobre el riesgo de recesión. Para los bancos centrales, este tipo de evidencia podría ser útil tanto para anticipar la necesidad de un cambio de rumbo en la política como para justificar decisiones que, en términos nominales, podrían parecer prematuras o insuficientes.

Por otro lado, la formulación de una regla heurística basada en umbrales moderados de tres indicadores clave —brecha de tipos, deterioro laboral y caída bursátil— aporta una herramienta sencilla, replicable y operativa, con potencial de uso tanto en entornos institucionales como en análisis de mercado. Su valor no reside únicamente en su precisión cuantitativa, sino en su carácter interpretativo: permite activar alertas tempranas sin necesidad de complejos modelos econométricos. Aunque su tasa de acierto inmediata (recall) sea modesta bajo un criterio estricto de seis meses, el análisis gráfico revela que, con la única excepción de la crisis del COVID-19, la regla se activa de forma sistemática en los doce meses previos a cada recesión registrada desde 1960. Esta regularidad sugiere un alto valor informativo para operadores financieros, gestores de carteras o responsables de política económica que busquen indicadores anticipados con una lógica económica sólida.

Por último, conviene destacar que tanto el modelo estadístico como la regla heurística integran

señales de naturaleza estructural (como la brecha $i - r^*$) y señales de mercado (como los retornos del S&P 500), lo cual permite tender puentes entre la macroeconomía y el análisis financiero. En un entorno de creciente volatilidad y complejidad, la capacidad de sintetizar esta información en criterios claros y estables puede contribuir a mejorar la formulación de estrategias de política monetaria y la gestión del riesgo en los mercados de capitales.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES DEL ESTUDIO

5.1 Síntesis de hallazgos

A lo largo de este trabajo se ha abordado un análisis integral del tipo de interés neutral como variable central para la comprensión del ciclo económico y la formulación de la política monetaria. Partiendo de una revisión teórica sólida y una implementación empírica rigurosa, se ha estimado una serie mensual del tipo neutral mediante un modelo estructural inspirado en la metodología de Laubach y Williams, integrando dinámicas de inflación, producto potencial y tipo de interés. A partir de esta estimación, se ha calculado la brecha real entre el tipo efectivo y el tipo neutral, interpretada como un indicador directo del sesgo cíclico de la política monetaria.

Este *gap_r* ha sido posteriormente incorporado, junto con otras variables macroeconómicas y financieras —como la variación del tipo de los fondos federales, el deterioro del mercado laboral y el comportamiento del S&P500— en un modelo logit orientado a predecir recesiones con seis meses de antelación. El modelo ha mostrado un rendimiento muy notable, con un AUC medio del 0,876 en validación cruzada temporal, y ha revelado que la variable con mayor poder explicativo es el deterioro reciente del mercado laboral, seguido de cerca por la brecha de tipos. En paralelo, se ha formulado una regla heurística que, con un criterio binario simple y tres condiciones simultáneas, permite activar una alerta de recesión sin necesidad de estimar ningún modelo complejo.

Ambos enfoques —modelo logit y regla heurística— convergen en una misma dirección: existe una señal anticipada consistente, interpretable y operativa cuando la política monetaria se sitúa en terreno contractivo, la tasa de paro comienza a deteriorarse y los mercados financieros corrigen con fuerza. La utilidad de esta señal es doble: permite discriminar entre fases de desaceleración cíclica y riesgos de recesión genuina, y ofrece una herramienta práctica para la toma de decisiones de política económica, análisis de riesgos o estrategia de inversión.

5.2 Valor añadido del estudio

El valor añadido de este trabajo radica, por un lado, en la traducción de un concepto económico abstracto —el tipo de interés neutral— en una variable operativa y cuantificable; y por otro, en la construcción de herramientas predictivas que, sin renunciar al rigor, mantienen un alto grado de interpretabilidad y aplicabilidad. A diferencia de muchos modelos de predicción que funcionan como “cajas negras” difíciles de auditar, las herramientas aquí desarrolladas son transparentes en su lógica, reproducibles con datos públicos y adaptables a contextos distintos.

Adicionalmente, el enfoque seguido ha permitido ilustrar cómo la integración de información macroeconómica (como la tasa de desempleo o la política monetaria efectiva) y financiera (como el retorno del S&P500) puede mejorar sensiblemente la capacidad anticipadora frente a recesiones, en comparación con señales individuales tradicionales como la inversión de la curva de tipos o el repunte del desempleo de forma aislada. En particular, se ha demostrado que la combinación de estas señales, bajo condiciones moderadas pero simultáneas, ofrece una capacidad predictiva superior y un riesgo contenido de falsos positivos.

5.3 Limitaciones y propuestas de mejora futura

Este trabajo, no obstante, no está exento de limitaciones. La primera y más evidente reside en la propia estimación del tipo de interés neutral, que depende de supuestos estructurales difíciles de validar empíricamente. La incertidumbre en torno al producto potencial o a las expectativas de inflación puede introducir sesgos en la estimación de r^* , especialmente en momentos de alta volatilidad económica. En este sentido, una línea futura relevante consistiría en explorar métodos alternativos de estimación, como modelos bayesianos o técnicas semiestructurales basadas en series temporales con aprendizaje automático.

En segundo lugar, el modelo logit presenta una relación lineal entre las variables explicativas y la probabilidad estimada de recesión, lo que limita su capacidad para captar efectos umbral o no lineales. Futuras extensiones podrían considerar modelos más flexibles como random forests, modelos de boosting o incluso modelos de redes neuronales, siempre cuidando que el aumento en precisión no implique una pérdida sustancial de interpretabilidad.

Por otro lado, la regla heurística, aunque eficaz, se basa en umbrales calibrados de forma empírica mediante prueba y error. Si bien esta aproximación ha funcionado razonablemente bien en backtesting, sería deseable contar con un procedimiento más sistemático y optimizado

para fijar estos umbrales, por ejemplo, a través de técnicas de maximización de métricas como el F1-score o la sensibilidad específica en periodos precrisis.

5.4 Reflexión final

Este trabajo ha tratado de contribuir a una cuestión de gran relevancia práctica y académica: la capacidad de anticipar las recesiones de forma rigurosa, comprensible y útil. En un mundo en el que la política monetaria enfrenta tensiones crecientes entre credibilidad, eficacia y estabilidad financiera, disponer de señales tempranas que permitan ajustar expectativas, calibrar decisiones y evitar errores de diagnóstico resulta más valioso que nunca.

El tipo de interés neutral, lejos de ser una entelequia teórica, puede convertirse —como se ha mostrado aquí— en un eje estructurador de análisis económico, siempre que se sepa estimar e interpretar adecuadamente. Y su integración en una lógica heurística, simple pero poderosa, permite democratizar su uso y acercarlo a perfiles profesionales diversos, desde analistas macroeconómicos hasta gestores de riesgo o responsables de estrategia institucional.

Si bien la historia no se repite, sí rima. Y en esas rimas —a veces sutiles, a veces estruendosas— se esconden patrones que, con las herramientas adecuadas, pueden ser descifrados. Este trabajo ha tratado de construir una brújula que, sin prometer certezas, permita al menos orientarse con antelación en el laberinto de los ciclos económicos. La combinación de solidez teórica, rigurosidad empírica y claridad operativa es, quizás, el mejor antídoto frente a la sorpresa y la improvisación.

CAPÍTULO 6. DECLARACIÓN DE USO DE HERRAMIENTAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL GENERATIVA

Por la presente, yo, Gonzalo Álvarez Núñez, estudiante de E3-analytics de la Universidad Pontificia Comillas al presentar mi Trabajo Fin de Grado titulado "*¿Cómo estimar el tipo de interés neutral o de equilibrio para EEUU? También se estudiará la Regla de Sahm como instrumento de detección en tiempo real del cambio de fase de Expansión a Recesión, para activar estabilizadores automáticos*", declaro que he utilizado la herramienta de Inteligencia Artificial Generativa ChatGPT u otras similares de IAG de código sólo en el contexto de las actividades descritas a continuación:

- Brainstorming de ideas de investigación: Utilizado para idear y esbozar posibles áreas de investigación.

- Crítico: Para encontrar contra-argumentos a una tesis específica que pretendo defender.
- Referencias: Usado conjuntamente con otras herramientas, como Science, para identificar referencias preliminares que luego he contrastado y validado.
- Metodólogo: Para descubrir métodos aplicables a problemas específicos de investigación.
- Interpretador de código: Para realizar análisis de datos preliminares.
- Estudios multidisciplinares: Para comprender perspectivas de otras comunidades sobre temas de naturaleza multidisciplinar.
- Corrector de estilo literario y de lenguaje: Para mejorar la calidad lingüística y estilística del texto.
- Sintetizador y divulgador de libros complicados: Para resumir y comprender literatura compleja.
- Revisor: Para recibir sugerencias sobre cómo mejorar y perfeccionar el trabajo con diferentes niveles de exigencia.
- Traductor: Para traducir textos de un lenguaje a otro.

Afirmo que toda la información y contenido presentados en este trabajo son producto de mi investigación y esfuerzo individual, excepto donde se ha indicado lo contrario y se han dado los créditos correspondientes (he incluido las referencias adecuadas en el TFG y he explicitado para que se ha usado ChatGPT u otras herramientas similares). Soy consciente de las implicaciones académicas y éticas de presentar un trabajo no original y acepto las consecuencias de cualquier violación a esta declaración.

Fecha: 10/04/2025 Firma: ___GONZALO ÁLVAREZ_____

CAPÍTULO 7. BIBLIOGRAFÍA

1. Bernanke, B. S. (2017). *The Courage to Act: A Memoir of a Crisis and Its Aftermath*. W. W. Norton & Company.
2. Bivens, J. (2020). *A simple rule can help guide stimulus checks to the right people at the right time*. Economic Policy Institute. <https://www.epi.org/blog/a-simple-rule-can-help-guide-stimulus-checks-to-the-right-people-at-the-right-time/>
3. Blanchard, O., Dell’Ariccia, G., & Mauro, P. (2010). *Rethinking macroeconomic policy*. IMF Staff Position Note, SPN/10/03. Fondo Monetario Internacional.
4. Clarida, R., Galí, J., & Gertler, M. (1999). The science of monetary policy: A New Keynesian perspective. *Journal of Economic Literature*, 37(4), 1661–1707. <https://doi.org/10.1257/jel.37.4.1661>
5. Congressional Budget Office. (2022). *The Budget and Economic Outlook: 2022 to 2032*. <https://www.cbo.gov/publication/57950>
6. Eggertsson, G. B., Mehrotra, N. R., & Robbins, J. A. (2019). *A model of secular stagnation: Theory and quantitative evaluation*. *American Economic Journal: Macroeconomics*, 11(1), 1–48. <https://doi.org/10.1257/mac.20170367>
7. Federal Reserve Bank of New York. (2022). *Statement Regarding Repurchase Operations and Treasury Bill Purchases*. https://www.newyorkfed.org/markets/opolicy/operating_policy_200909a
8. Federal Reserve Bank of New York. (s.f.). *Measuring the natural rate of interest*. <https://www.newyorkfed.org/research/policy/rstar>
9. Federal Reserve Board. (2020). *Monetary Policy Report – July 2020*. https://www.federalreserve.gov/monetarypolicy/mpr_default.htm
10. Federal Reserve Board. (2022). *Monetary Policy Report – July 2022*. https://www.federalreserve.gov/monetarypolicy/mpr_default.htm
11. Federal Reserve Board. (2023). *The Structure of the Federal Reserve System*. <https://www.federalreserve.gov/aboutthefed/structure-federal-reserve-system.htm>

12. Hamilton, J. D., Harris, E. S., Hatzius, J., & West, K. D. (2015). *The equilibrium real funds rate: Past, present and future*. U.S. Monetary Policy Forum. Retrieved from https://www.brookings.edu/wp-content/uploads/2016/07/USMPF_2015_report.pdf
13. Holston, K., Laubach, T., & Williams, J. C. (2017). *Measuring the natural rate of interest: International trends and determinants*. *Journal of International Economics*, 108, S59–S75. <https://doi.org/10.1016/j.jinteco.2017.01.004>
14. Laubach, T. (2009). *New evidence on the interest rate effects of budget deficits and debt*. *Journal of the European Economic Association*, 7(4), 858–885. <https://doi.org/10.1162/JEEA.2009.7.4.858>
15. Laubach, T., & Williams, J. C. (2003). *Measuring the natural rate of interest*. *Review of Economics and Statistics*, 85(4), 1063–1070. <https://doi.org/10.1162/003465303772815934>
16. Laubach, T., & Williams, J. C. (2015). *Measuring the natural rate of interest redux*. Hutchins Center Working Paper #15, Brookings Institution. <https://www.brookings.edu/research/measuring-the-natural-rate-of-interest-redux/>
17. Mishkin, F. S. (2007). *Monetary Policy Strategy*. MIT Press.
18. National Bureau of Economic Research. (2020). *US Business Cycle Expansions and Contractions*. <https://www.nber.org/research/data/us-business-cycle-expansions-and-contractions>
19. Orphanides, A., & Williams, J. C. (2002). *Robust monetary policy rules with unknown natural rates*. *Brookings Papers on Economic Activity*, 2002(2), 63–145. <https://doi.org/10.1353/eca.2002.0020>
20. Sahm, C. (2019). *Direct stimulus payments to individuals*. Brookings Institution. <https://www.brookings.edu/research/direct-stimulus-payments-to-individuals/>
21. Sahm, C. (2020). Recession ready: The need for automatic stabilizers. In H. Boushey, R. Nunn, & J. Eberly (Eds.), *Recession Ready: Fiscal Policies to Stabilize the American Economy* (pp. 3–21). Brookings Institution Press.

22. Summers, L. H. (2014). *U.S. economic prospects: Secular stagnation, hysteresis, and the zero lower bound*. *Business Economics*, 49(2), 65–73.
<https://doi.org/10.1057/be.2014.13>
23. Taylor, J. B. (1993). *Discretion versus policy rules in practice*. *Carnegie-Rochester Conference Series on Public Policy*, 39, 195–214. [https://doi.org/10.1016/0167-2231\(93\)90009-L](https://doi.org/10.1016/0167-2231(93)90009-L)
24. Wicksell, K. (1936). *Interest and prices: A study of the causes regulating the value of money* (R. F. Kahn, Trans.). Macmillan. (Original work published 1898)
25. Williams, J. C. (2018). The Future Fortunes of R-Star: Are They Really Rising? *Federal Reserve Bank of New York*.
<https://www.newyorkfed.org/newsevents/speeches/2018/wil180219>
26. Woodford, M. (2003). *Interest and prices: Foundations of a theory of monetary policy*. Princeton University Press.

ANEXO I – CÓDIGO PYTHON

Construcción base de datos

```
# =====
# CONSTRUCCIÓN COMPLETA DE LA BASE DE DATOS MACROECONÓMICA
# =====

# -----
# BLOQUE 1: Importación de librerías
# -----

from fredapi import Fred
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns
import datetime
import yfinance as yf

# -----
# BLOQUE 2: Conexión con FRED (requiere introducir mi API Key personal)
# -----

fred = Fred(api_key='38e866da0f5371e9c3e22142a378e40b')

# -----
# BLOQUE 3: Definición de series FRED a descargar
# -----

series_fred = {
    'fed_funds': 'FEDFUNDS',
    'pce': 'PCEPI',
    'core_pce': 'PCEPILFE',
    'unemployment': 'UNRATE',
    'gdp_real': 'GDPC1',
    'gdp_potential': 'GDPPOT',
    'rate_2y': 'GS2',
    'rate_10y': 'GS10',
    'breakeven_10y': 'T10YIE',
    'vix': 'VIXCLS',          # Volatilidad implícita del S&P500
    'baa_10y': 'BAA10Y'      # Bonos corporativos grado inversión (10 años)
}
```

```

# -----
# BLOQUE 4: Descarga y resamplero mensual desde FRED
# -----

series_dict = {}

for nombre, codigo in series_fred.items():
    serie = fred.get_series(codigo)
    df_temp = pd.DataFrame(serie)
    df_temp.columns = [nombre]
    df_temp.index.name = 'date'
    df_temp.index = pd.to_datetime(df_temp.index)
    df_temp = df_temp.resample('MS').mean()
    series_dict[nombre] = df_temp

# -----
# BLOQUE 5: Unión de todas las series (outer join por fecha)
# -----

df = pd.concat(series_dict.values(), axis=1, join='outer')
hoy = pd.to_datetime(datetime.datetime.today().date())
df = df[df.index <= hoy]

# -----
# BLOQUE 6: Interpolación mensual de series trimestrales
# -----

gdp_real_m = df['gdp_real'].resample('MS').mean()
gdp_real_interp = gdp_real_m.interpolate(method='linear')

gdp_potential_m = df['gdp_potential'].resample('MS').mean()
gdp_potential_interp = gdp_potential_m.interpolate(method='linear')

df['gdp_real_interp'] = gdp_real_interp
df['gdp_potential_interp'] = gdp_potential_interp

# -----
# BLOQUE 7: Incorporación de la variable de recesión (USREC)
# -----

usrec = fred.get_series('USREC')
usrec = pd.DataFrame(usrec)
usrec.columns = ['recession']
usrec.index.name = 'date'

```

```

usrec.index = pd.to_datetime(usrec.index)
usrec = usrec.resample('MS').max()
usrec = usrec[usrec.index <= hoy]

df = df.merge(usrec, left_index=True, right_index=True, how='left')

# =====
# BLOQUE 8: DESCARGA DEL S&P500 DESDE YAHOO FINANCE
# =====

sp500_yahoo = yf.download("^GSPC", start="1950-01-01", interval="1d",
group_by="ticker", auto_adjust=False)

# Ajustar estructura de columnas si viene con MultiIndex
if isinstance(sp500_yahoo.columns, pd.MultiIndex):
    if "^GSPC" in sp500_yahoo.columns.levels[0]:
        sp500_yahoo = sp500_yahoo["^GSPC"][["Adj Close"]]
    else:
        sp500_yahoo = sp500_yahoo[["Adj Close"]]
else:
    sp500_yahoo = sp500_yahoo[["Adj Close"]]

# Renombrar y asegurar estructura limpia
sp500_yahoo.rename(columns={"Adj Close": "sp500"}, inplace=True)

# Resamplear a inicio de mes ("MS") para alinearlo con tu DataFrame principal
sp500_mensual = sp500_yahoo.resample("MS").last()

# Calcular retornos acumulados logarítmicos
sp500_mensual["log_sp500"] = np.log(sp500_mensual["sp500"])
sp500_mensual["ret_sp500_3m"] = sp500_mensual["log_sp500"].diff(3) * 100
sp500_mensual["ret_sp500_6m"] = sp500_mensual["log_sp500"].diff(6) * 100

# Unir las columnas relevantes con el DataFrame macroeconómico principal
df = df.merge(sp500_mensual[["sp500", "ret_sp500_3m", "ret_sp500_6m"]], how="left",
left_index=True, right_index=True)

# -----
# BLOQUE 9: Cálculo del spread crediticio
# -----

df['spread_crediticio'] = df['baa_10y'] - df['rate_10y']

# -----

```

```

# BLOQUE 10: Limpieza final y exportación
# -----

df = df.dropna(how='all')

print("\nBase de datos creada con éxito.")
print("Número de observaciones:", len(df))
print("Variables disponibles:", list(df.columns))

# Guardar CSV final
nombre_archivo = 'datos_TFG_NeutralRate.csv'
df.to_csv(nombre_archivo, index=True, date_format='%Y-%m-%d', float_format='%.4f')
print(f"\n✅ Archivo '{nombre_archivo}' guardado correctamente.")

```

Estimación del tipo neutral

```

# =====
# CÁLCULO DEL TIPO DE INTERÉS NEUTRAL
# =====

import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from pykalman import KalmanFilter
from sklearn.preprocessing import StandardScaler

# -----
# 1. CARGA Y PREPROCESADO
# -----

# Cargar datos
df = pd.read_csv("datos_TFG_NeutralRate.csv", parse_dates=["date"])
df.set_index("date", inplace=True)

# Variables observadas
df["producto"] = np.log(df["gdp_real_interp"])
df["gdp_growth"] = df["producto"].diff(12) * 100 # crecimiento interanual del PIB
df["inflacion"] = df["core_pce"].pct_change(12, fill_method=None) * 100 # inflación
interanual

# Eliminar valores nulos
df_modelo = df[["gdp_growth", "inflacion"]].dropna()

# Escalar las series observadas para estabilizar el modelo

```

```

scaler = StandardScaler()
observaciones = scaler.fit_transform(df_modelo.values)

# -----
# 2. DEFINICIÓN DEL MODELO CON 4 ESTADOS
# -----

# Estados: [output_gap, trend_growth, z, r_star = c * trend + z]
# Matriz de transición: random walk en gap, trend y z (r* es derivada)
transition_matrix = np.eye(4)

# 🛠 Ajuste de varianzas: (utilizamos una varianza de z moderada (0.0001))
transition_covariance = np.diag([0.01, 0.002, 0.001, 0.0])

# Coeficiente c de la relación  $r^* = c * trend + z$ 
c = 1.0

# Matriz de observación
observation_matrix = np.array([
    [1.0, 1.0 - c, -1.0, 0.0], # crecimiento del PIB
    [1.0, 0.0, 0.0, 0.0]     # inflación
])

# Varianza del error de medición: ajustada manualmente
observation_covariance = np.diag([0.5, 0.2])

# Estado inicial
initial_state_mean = [0.0, 2.0, 0.0, 2.0]

# -----
# 3. FILTRO DE KALMAN CON PARÁMETROS FIJOS
# -----

kf = KalmanFilter(
    transition_matrices=transition_matrix,
    observation_matrices=observation_matrix,
    initial_state_mean=initial_state_mean,
    transition_covariance=transition_covariance,
    observation_covariance=observation_covariance
)

# Aplicar suavizado
state_means, _ = kf.smooth(observaciones)

```

```

# -----
# 4. EXTRACCIÓN Y GRÁFICO DE RESULTADOS
# -----

# Fechas
fechas = df_modelo.index

# Extraer estados
output_gap = state_means[:, 0]
trend = state_means[:, 1]
z = state_means[:, 2]
r_star = c * trend + z # tipo de interés neutral

# Gráfico
plt.figure(figsize=(12, 6))
plt.plot(fechas, r_star, label="r* estimado", linewidth=2)
plt.axhline(0, linestyle="--", color="gray")
plt.title("Tipo de interés neutral (r*)")
plt.ylabel("Tipo real (%)")
plt.grid(True)
plt.legend()
plt.tight_layout()
# Guardar imagen
plt.savefig("grafico_r_star.png", dpi=300) # Puedes cambiar el nombre y la resolución
plt.show()

# -----
# 5. EXPORTACIÓN DE LA SERIE r*
# -----

# Crear DataFrame con la serie estimada y su descomposición
df_r_star = pd.DataFrame({
    "date": df_modelo.index,
    "output_gap": state_means[:, 0],
    "trend": state_means[:, 1],
    "z": state_means[:, 2],
    "r_star": c * state_means[:, 1] + state_means[:, 2]
})

# Guardar en CSV
df_r_star.to_csv("serie_NeutralRate.csv", index=False)

```

Aplicación Regla de Sahm

```

# =====
# APLICACIÓN REGLA DE SAHM
# =====

import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib.patches import Patch
from matplotlib.lines import Line2D

# -----
# 1. PREPARACIÓN DE LA TASA DE PARO (SUAVIZADA)
# -----

# Cargar datos
df = pd.read_csv("datos_TFG_NeutralRate.csv", parse_dates=["date"])
df.set_index("date", inplace=True)

# Media móvil de 3 meses de la tasa de paro
df["unemp_ma3"] = df["unemployment"].rolling(window=3).mean()

# Mínimo móvil de los últimos 12 meses de esa media móvil
df["sahm_min12"] = df["unemp_ma3"].rolling(window=12, min_periods=1).min()

# Cálculo de la diferencia y señal
df["sahm_diff"] = df["unemp_ma3"] - df["sahm_min12"]
df["sahm_signal"] = (df["sahm_diff"] >= 0.5).astype(int)

# -----
# 2. VISUALIZACIÓN CON SEÑALES Y RECESIONES
# -----

plt.figure(figsize=(12, 6))
plt.plot(df.index, df["unemp_ma3"], label="Tasa de paro (media móvil 3 meses)",
color="black", linewidth=2)

# Sombrear recesiones según NBER (recession == 1)
recession_periods = df["recession"] == 1
recession_blocks = (recession_periods != recession_periods.shift()).cumsum()
for _, group in df[recession_periods].groupby(recession_blocks):
    plt.axvspan(group.index[0], group.index[-1], color="gray", alpha=0.3)

# Sombrear activación de la señal Sahm

```

```

plt.fill_between(df.index, 0, df["unemp_ma3"],
                 where=(df["sahm_signal"] == 1),
                 color="red", alpha=0.3, label="Señal Sahm")

legend_elements = [
    Patch(facecolor="gray", alpha=0.3, label="Recesión (NBER)"),
    Patch(facecolor="red", alpha=0.3, label="Señal Sahm"),
    plt.Line2D([0], [0], color="black", lw=2, label="Tasa de paro (MA 3 meses)")
]
plt.legend(handles=legend_elements)

plt.title("Aplicación de la Regla de Sahm")
plt.ylabel("Tasa de desempleo (%)")
plt.grid(True)
plt.legend()
plt.tight_layout()
plt.savefig("grafico_Sahm.png", dpi=300)
plt.show()
# -----
# 3. EXPORTACIÓN DE RESULTADOS
# -----

df[["unemployment", "unemp_ma3", "sahm_diff",
"sahm_signal"]].to_csv("serie_Regla_de_Sahm.csv")

```

Creación modelo logit

```

# -----
# MODELO LOGIT PARA RECESIÓN EN 6 MESES
# -----

import pandas as pd
import numpy as np
from sklearn.linear_model import LogisticRegression
from sklearn.model_selection import TimeSeriesSplit
from sklearn.metrics import roc_auc_score
import matplotlib.pyplot as plt

# -----
# 1. CREACIÓN DE VARIABLES
# -----

df["inflacion"] = df["core_pce"].pct_change(12, fill_method=None) * 100
df["real_rate"] = df["fed_funds"] - df["inflacion"]

```

```

df["gap_r"] = df["real_rate"] - df["r_star"]
df["delta_fed_funds"] = df["fed_funds"] - df["fed_funds"].shift(3)
df["ret_sp500_3m"] = np.log(df["sp500"]).diff(3) * 100
df["delta_unemployment_6m"] = df["unemployment"] - df["unemployment"].shift(6)
df["recesion_futura_6m"] = df["recesion"].shift(-6)

# -----
# 2. CONFIGURACIÓN DEL MODELO
# -----

variables = ["gap_r", "delta_fed_funds", "delta_unemployment_6m", "ret_sp500_3m"]
df_model = df[variables + ["recesion_futura_6m"]].dropna()
X = df_model[variables].values
y = df_model["recesion_futura_6m"].values
fechas = df_model.index

# -----
# 3. VALIDACIÓN CRUZADA TEMPORAL
# -----

tscv = TimeSeriesSplit(n_splits=5)
auc_scores = []
coef_matriz = []
splits_validos = 0

print("\n📊 AUC por bloque temporal (solo splits válidos):")

for i, (train_index, test_index) in enumerate(tscv.split(X), 1):
    y_test = y[test_index]
    if np.sum(y_test) == 0:
        print(f" - Split {i}: sin clase positiva → ignorado")
        continue

    X_train, X_test = X[train_index], X[test_index]
    y_train = y[train_index]

    model = LogisticRegression()
    model.fit(X_train, y_train)
    y_pred_proba = model.predict_proba(X_test)[:, 1]

    auc = roc_auc_score(y_test, y_pred_proba)
    auc_scores.append(auc)
    coef_matriz.append(model.coef_[0])
    splits_validos += 1

```

```

print(f" - Split {i}: AUC = {auc:.3f}")

# -----
# 4. ANÁLISIS DE COEFICIENTES
# -----

coef_prom = np.mean(coef_matriz, axis=0)
magnitud_relativa = np.abs(coef_prom) / np.max(np.abs(coef_prom))
sentido_economico = ["↑ riesgo" if c > 0 else "↓ riesgo" for c in coef_prom]

tabla_resultado = pd.DataFrame({
    "Variable": variables,
    "Coeficiente promedio": coef_prom,
    "Sentido económico": sentido_economico,
    "Magnitud relativa": magnitud_relativa
}).sort_values("Magnitud relativa", ascending=False)

# -----
# 5. RESULTADOS FINALES
# -----

print(f"\n🎯 AUC medio del modelo (basado en {splits_validos} splits válidos):
{np.mean(auc_scores):.3f}")
print("\n📊 Tabla de coeficientes del modelo logit:\n")
print(tabla_resultado.to_string(index=False, float_format="%.4f"))

# -----
# 6. VISUALIZACIÓN DE LA PROBABILIDAD ESTIMADA
# -----

modelo_full = LogisticRegression()
modelo_full.fit(X, y)
df_model["probabilidad_logit"] = modelo_full.predict_proba(X)[:, 1]

plt.figure(figsize=(14, 6))

in_recession = False
for i in range(len(df_model)):
    if not in_recession and df_model["recesion_futura_6m"].iloc[i] == 1:
        start = df_model.index[i]
        in_recession = True
    elif in_recession and df_model["recesion_futura_6m"].iloc[i] == 0:
        end = df_model.index[i]
        plt.axvspan(start, end, color='gray', alpha=0.3)

```

```

    in_recession = False
if in_recession:
    plt.axvspan(start, df_model.index[-1], color='gray', alpha=0.3)

plt.plot(df_model.index, df_model["probabilidad_logit"], label="Probabilidad estimada
(modelo logit)",
         color="darkblue", linewidth=2)
plt.axhline(0.5, linestyle="--", color="black", label="Umbral 0.5")

plt.title("Probabilidad estimada de recesión a 6 meses")
plt.ylabel("Probabilidad")
plt.grid(True)
plt.legend()
plt.tight_layout()
plt.savefig("grafico_logit.png", dpi=300)
plt.show()

```

Creación regla heurística

```

# -----
# REGLA HEURÍSTICA
# -----

# Versión con tres condiciones moderadas
cond_recesion = (
    (df["gap_r"] > 0.75) &
    (df["delta_unemployment_6m"] > 0.01) &
    (df["ret_sp500_3m"] < -2)
)

# Activación si se cumple cualquiera de las dos
df["alerta_gonzalo"] = (cond_recesion).astype(int)

# Visualización
import matplotlib.pyplot as plt

plt.figure(figsize=(14, 5))

# Sombreado de recesiones reales
in_recession = False
for i in range(len(df)):
    if not in_recession and df["recesion"].iloc[i] == 1:
        start = df.index[i]
        in_recession = True

```

```

elif in_recession and df["recession"].iloc[i] == 0:
    end = df.index[i]
    plt.axvspan(start, end, color="gray", alpha=0.3)
    in_recession = False
if in_recession:
    plt.axvspan(start, df.index[-1], color="gray", alpha=0.3)

# Línea de señal binaria
plt.plot(df.index, df["alerta_gonzalo"], label="Activación regla",
         drawstyle="steps-post", color="darkorange", linewidth=2)

plt.title("Regla heurística vs. recesiones reales")
plt.ylabel("Señal binaria (0 = no, 1 = sí)")
plt.grid(True)
plt.legend()
plt.tight_layout()
plt.savefig("grafico_regla.png", dpi=300)
plt.show()

```