B31. El cambio climático y su impacto en la economía. Evidencia y modelos integrados de evaluación. Acuerdos internacionales y principales medidas adoptadas para hacer frente al cambio climático

1. Fundamentos teóricos y empíricos

El análisis parte de dos conceptos de la teoría económica, el bien público global y la externalidad, y los aplica al impacto económico del cambio climático y a la evidencia que lo mide.

1.1. Medio ambiente y bienes públicos globales

Definición: los bienes públicos puros se definen por la no exclusión y la no rivalidad en el consumo. Los **bienes públicos globales** (BPG) añaden la universalidad de sus beneficios en países, población y generaciones.

Tipos: según la exclusión y la rivalidad, son puros, como la mitigación del calentamiento global; impuros o congestionables, como el control de la lluvia ácida, y bienes de club transnacionales, como los canales.

Características:

1. *Externalidades de stock*: el impacto depende sobre todo del *stock* acumulado y no solo del flujo. En el calentamiento global importa la concentración acumulada de CO_2, que permanece varios siglos, y no solo las emisiones anuales.
2. *Dilema de Westfalia* (Nordhaus, 2005): los Tratados de Westfalia (1648) consagraron la soberanía nacional, y no existe un mecanismo global que obligue a los *free riders* a contribuir. La respuesta ha sido la cooperación a través de instituciones como el IPCC o las COP.
3. *Tecnología de agregación*: la provisión eficiente depende de cómo se agregan las contribuciones. Es *aditiva*, $G = \sum_j g_j$, en la reducción de emisiones, donde cada contribución importa; *best-shot*, $G = \max\{g_1, \dots, g_n\}$, en la investigación de una cura, que debe concentrarse en el más eficiente, y de *eslabón más débil*, $G = \min\{g_1, \dots, g_n\}$, en el control de una pandemia, cuyo estándar fija el país que menos se esfuerza.

Provisión: según la **condición de Samuelson** (1954a), el bien público G debe producirse hasta que su coste marginal en términos del privado X iguale la suma de las valoraciones marginales individuales, la valoración marginal social:

$$\sum_h \mathrm{RMS}^h_{XG} = \mathrm{RMT}_{XG}$$

Si el bien es no excluible, nadie revela su verdadera disposición a pagar (*free rider*) y la oferta es inferior a la eficiente, o nula. La intervención pública debe decidir a la vez cómo repartir el coste (capacidad de pago o precios de Lindahl, 1919) y cuánto proveer (mecanismo CGV), y tampoco garantiza la eficiencia.

Financiación: se debate si financiar los BPG con ayuda oficial al desarrollo, por sus economías de alcance con las instituciones multilaterales, o con mecanismos específicos: tratados para los puros, instituciones regionales para los regionales y coordinación hacia el productor más eficiente en los *best-shot*.

1.2. Externalidades medioambientales

Definición: hay **externalidad** cuando la producción o el consumo de un bien afectan al bienestar de terceros sin que el efecto se recoja en el precio. Con externalidades negativas, como la contaminación, los agentes no internalizan los costes que imponen y hay sobreproducción.

Óptimo: el planificador quiere que la empresa internalice la externalidad, con un precio igual al coste marginal social, suma del privado y del daño marginal externo, $\mathrm{Cmg}_E(x) = \partial e(x)/\partial x$:

$$p = \mathrm{Cmg}_P(x) + \frac{\partial e(x)}{\partial x}$$

Mercado: sin intervención, el coste marginal privado iguala al beneficio marginal privado, y la cantidad supera la eficiente, con una pérdida de eficiencia entre el coste marginal social y la demanda.

Corrección: hay tres vías.

1. *Instrumentos pigouvianos* (Pigou, 1920): un impuesto sobre la externalidad negativa o una subvención a la positiva. El impuesto aplica el principio de "quien contamina paga", y su recaudación permite reducir otros impuestos distorsionantes, con un posible **doble dividendo** (Pearce, 1991). Exige, sin embargo, estimar el daño marginal, y su efecto es indirecto.
2. *Derechos de propiedad* (Coase, 1960): con derechos bien definidos, costes de transacción nulos y sin efectos renta, la negociación alcanza la solución eficiente cualquiera que sea la asignación inicial. En problemas globales con millones de agentes, en cambio, los costes de transacción son significativos.
3. *Otros instrumentos*: la regulación directa, las subastas de derechos, los mecanismos de compensación y el *cap and trade*, que combina un techo global con la flexibilidad del mercado para asignar los derechos.

1.3. Impacto económico del cambio climático

1.3.1. Canales de transmisión

Hay dos canales: los **riesgos físicos**, costes de los fenómenos extremos, como huracanes o malas cosechas, y de los cambios graduales, como la subida del nivel del mar, y los **riesgos de transición**, costes de ajuste hacia una economía baja en carbono, como la obsolescencia tecnológica, los activos varados (*stranded assets*) o los cambios abruptos de política.

1.3.2. Variables afectadas

Crecimiento: el cambio climático reduce la dotación de factores y el crecimiento potencial. Las temperaturas extremas reducen la actividad y las horas ofertadas y alteran las migraciones. Los eventos extremos destruyen capital y la incertidumbre deprime la inversión, aunque la transición abre la financiación verde, y la productividad cae al desviarse recursos hacia la reconstrucción.

Inflación: los riesgos físicos son perturbaciones de oferta que elevan los precios, sobre todo de alimentos y energía. Se distinguen la *climateflation*, causada por eventos climáticos; la *fossilflation*, heredada de la dependencia fósil, y la *greenflation*, por el encarecimiento de los minerales críticos de la transición.

Estabilidad financiera: ambos riesgos deterioran los balances de bancos y aseguradoras, por los impagos, la caída del valor del colateral y los activos varados. Su naturaleza sistémica y de largo plazo es la "tragedia del horizonte" (Carney, 2015), porque los daños se materializan más allá del horizonte de decisión de los agentes financieros. Bancos centrales y supervisores respondieron con la NGFS (2017) y las pruebas de estrés climático.

Política económica:

- *Monetaria*: las perturbaciones climáticas de oferta plantean el dilema clásico entre estabilizar precios o actividad. Además, el tipo de interés natural puede caer, por la menor productividad y el mayor ahorro por precaución, lo que estrecha el margen de la política convencional. El BCE incorporó el clima a su revisión estratégica (2021) y a su colateral (2022).
- *Fiscal*: puede aumentar el déficit, por la mitigación, la adaptación y la reconstrucción, y erosiona las bases imponibles fósiles, aunque la imposición verde ofrece ingresos con un posible doble dividendo.
- *Comercial*: la asimetría de políticas entre países genera **fuga de carbono** (*carbon leakage*), que ha motivado el mecanismo de ajuste en frontera por carbono de la UE (MAFC; *CBAM*).

1.3.3. Evidencia empírica

Calentamiento observado: según el IPCC, la influencia humana ha calentado el planeta de forma inequívoca. La temperatura de 2011-2020 superó en 1,1 °C la de 1850-1900. El calentamiento es casi proporcional a las emisiones acumuladas de CO_2, unos 0,45 °C por cada 1000 $GtCO_2$, y duplicar la concentración elevaría probablemente la temperatura entre 2,5 y 4 °C, con una mejor estimación de 3 °C.

Datos recientes: el calentamiento de origen humano alcanzó 1,37 °C en 2025 y avanza a 0,27 °C por década, un ritmo igual al máximo del registro instrumental. El **presupuesto de carbono**, es decir, las emisiones acumuladas compatibles con no superar 1,5 °C con un 50 % de probabilidad, es de unas 130 $GtCO_2$ desde 2026, unos tres años de emisiones al ritmo actual (Forster et al., 2026).

Temperatura y producción: la correlación negativa entre temperatura y renta per cápita no prueba causalidad, porque el clima se confunde con las instituciones y la historia de cada país. Por ello, la nueva literatura explota las fluctuaciones anuales de la temperatura dentro de cada país, que son exógenas, y encuentra efectos significativos y robustos del clima sobre la actividad.

- *Crecimiento*: en los países pobres, un grado más en un año reduce el crecimiento de ese año en unos 1,3 puntos, a través de la agricultura, la industria y la estabilidad política, sin efecto robusto en los ricos. Además, el efecto parece recaer sobre la tasa de crecimiento y no solo sobre el nivel de la producción (Dell et al., 2012).
- *No linealidad*: la productividad es cóncava en la temperatura, con un máximo hacia 13 °C, de modo que el calentamiento daña a los países cálidos, en su mayoría pobres, y puede favorecer a algunos fríos. Sin mitigación y con una adaptación como la pasada, la renta media mundial sería en 2100 un 23 % inferior a la de un mundo sin calentamiento y la desigualdad entre países, mayor (Burke et al., 2015).
- *Temperatura global*: los extremos se asocian sobre todo a la temperatura del planeta. Con ella, un grado más reduce el PIB mundial a largo plazo en más de un 20 %, el extremo superior de la literatura (Bilal y Känzig, 2026).

Nivel frente a crecimiento: la distinción decide el tamaño de los daños. Si el calor reduce el nivel de la producción, la pérdida es una proporción constante del PIB. Si reduce su tasa de crecimiento, en cambio, se compone año tras año y aumenta con el horizonte. La función de daño de DICE es de nivel. Con efectos sobre el crecimiento como los de Dell, Jones y Olken, el **coste social del carbono**, valor presente del daño de una tonelada adicional de CO_2, sube a 220 $ por tonelada, frente a los 37 $ que usaba entonces el Gobierno de EE. UU. (Moore y Diaz, 2015).

Eventos extremos: en EE. UU., el calentamiento elevaría los daños anuales medios por huracanes en unos 10.000 M$ a rentas de 2005, un 0,08 % del PIB, porque el daño crece con una potencia muy alta de la velocidad del viento (Nordhaus, 2010). En el mundo, los ciclones tropicales reducen la renta per cápita de forma persistente, y uno del percentil 90 la deja un 7,4 % por debajo de su tendencia veinte años después (Hsiang y Jina, 2014).

1.3.4. Conclusiones

El cambio climático es una perturbación macroeconómica de primer orden, con daños significativos, crecientes y concentrados en los países en desarrollo. Su magnitud es, sin embargo, muy incierta, porque depende de si el calor afecta al nivel o al crecimiento y de la adaptación, y las estimaciones difieren hasta en un orden de magnitud.

En suma, la mitigación es un BPG puro y aditivo que la provisión voluntaria deja corto, y las emisiones, una externalidad que lleva a emitir por encima del nivel eficiente. La respuesta de la producción a la temperatura determina la función de daño de los modelos.

2. Modelos integrados de evaluación

Comparar los daños con el coste de reducir emisiones exige modelos que integren economía y clima, los modelos integrados de evaluación, que se apoyan en la teoría de los recursos naturales.

2.1. Antecedentes de la modelización

2.1.1. Regla de Hotelling (1931)

Idea: Hotelling analizó la explotación intertemporal de un recurso no renovable. Su renta de escasez debe crecer al tipo de interés, de modo que el propietario sea indiferente entre extraer hoy o mañana.

Planteamiento: en tiempo continuo, con competencia perfecta, horizonte finito y un *stock* inicial S_0, la empresa maximiza el valor presente de los beneficios de extracción:

$$\max_{\{x(t)\}} V = \int_0^T e^{-rt}[p(t)\,x(t) - \mathrm{CT}(x(t))]\,dt \quad \text{s.a.:} \begin{cases} \dot{S} = -x(t) \\ S_0 \text{ dado}, \quad S(T) \geq 0 \end{cases}$$

CPO: la *condición estática* iguala la renta de escasez o *royalty*, $p(t) - \mathrm{Cmg}(x(t))$, al precio sombra del recurso en el yacimiento, $q(t)$. La **regla de Hotelling**, condición dinámica, exige que el *royalty* crezca al tipo de interés, $\dot{q}/q = r$, condición de arbitraje entre extraer hoy e invertir el beneficio o extraer mañana a un precio mayor.

CSO: con coste de extracción convexo, el hamiltoniano es cóncavo en la extracción y la ecuación de estado, lineal, de modo que, con la condición de transversalidad, las CPO son suficientes (Mangasarian).

Conclusiones: ilustra cómo criterios racionales pueden llevar al agotamiento, pero tiene poco respaldo empírico, porque los precios reales de la mayoría de los recursos no han crecido al tipo de interés (Krautkraemer, 1998; Livernois, 2009).

2.1.2. Solow con recursos naturales (Romer, 2012)

Planteamiento: el modelo de Solow se amplía con tierra, T, y recursos agotables, R, como factores:

$$Y = K^{\alpha} R^{\eta} T^{\gamma} (AL)^{1-\alpha-\eta-\gamma}, \qquad \alpha, \eta, \gamma > 0,\ \alpha + \eta + \gamma < 1$$

Equilibrio: en el estado estacionario, el PIB per cápita crece a la tasa:

$$g_y^* = \frac{(1-\alpha-\eta-\gamma)(n+g_A) - \eta b}{1-\alpha} - n$$

Con b la tasa de agotamiento, el crecimiento per cápita puede ser positivo o negativo: el agotamiento, ηb, lo frena y el progreso técnico, g_A, lo impulsa, de modo que es sostenible si la tecnología compensa la escasez, como en los últimos siglos.

Conclusiones: reduce el agotamiento a una carrera cuantificable entre progreso técnico y escasez, pero no incorpora la externalidad climática: los recursos restringen la producción, pero su uso no daña la capacidad productiva.

2.2. Concepto y modelos de Nordhaus

Concepto: los **modelos integrados de evaluación** (IAM) integran economía y clima en un marco de equilibrio general dinámico para simular escenarios, estimar el coste social del carbono y evaluar políticas mediante análisis coste-beneficio. Su pionero es William Nordhaus, Nobel en 2018 junto a Paul Romer.

Diseño: un módulo *económico*, de crecimiento neoclásico, en el que la producción genera emisiones como subproducto, y un módulo *climático*, que traduce emisiones en concentraciones, forzamiento radiativo y temperatura.

2.2.1. Modelo DICE (Nordhaus, 1992)

Idea: el *Dynamic Integrated model of Climate and the Economy* encadena producción, emisiones, concentración y temperatura, y cierra la "cadena de degradación" con la retroalimentación de los daños sobre la producción y el bienestar.

Supuestos: un único país-planeta en tiempo discreto, un planificador benevolente con utilidad CRRA, según Ramsey-Cass-Koopmans, y una Cobb-Douglas con progreso técnico exógeno.

Planteamiento: el planificador elige el consumo per cápita, c_t, y la tasa de reducción de emisiones, μ_t, para maximizar el bienestar social sujeto a la restricción de recursos, a la producción neta y a las emisiones:

$$\max_{\{c_t,\mu_t\}} W = \sum_{t=1}^{\infty} \beta^t \frac{c_t^{1-\theta}}{1-\theta} L_t, \qquad \beta \in (0,1),\ \theta > 0$$

$$\text{s.a.:} \begin{cases} c_t + \left[k_t - (1-\delta)\frac{L_{t-1}}{L_t} k_{t-1}\right] = Q_t \\ Q_t = (1-D_t)(1-\Lambda_t) y_t, \qquad y_t = A_t k_t^{\alpha} \\ E_t = \sigma_t (1-\mu_t) Y_t + \varepsilon_t \end{cases}$$

Aquí β es el factor de descuento, θ la elasticidad de la utilidad marginal y L_t la población. La primera restricción exige que el consumo y la inversión bruta, con δ la depreciación y L_{t-1}/L_t la dilución del capital per cápita por el crecimiento de la población, agoten la producción neta. Esta descuenta de la producción bruta, y_t, con A_t la productividad exógena, los daños, D_t, crecientes y habitualmente cuadráticos en la temperatura, y el coste de reducción, Λ_t, creciente y convexo en μ_t. Las emisiones dependen de la intensidad de carbono, σ_t, decreciente en el tiempo, del esfuerzo de mitigación y de unas emisiones exógenas, ε_t, debidas sobre todo al uso de la tierra.

Módulo climático: encadena concentración, forzamiento radiativo y temperatura:

$$M_t = f(E_t^+, M_{t-1}^+)$$
$$F_t = f(M_t^+)$$
$$T_t = f(F_t^+, T_{t-1}^+)$$

Las emisiones se suman a la masa acumulada de CO_2, M_t, repartida entre la atmósfera, la superficie de los océanos con la biosfera y las profundidades oceánicas, que la intercambian lentamente. La concentración genera un **forzamiento radiativo**, F_t, la variación del balance energético de la atmósfera por la radiación que retienen los GEI. Es aproximadamente logarítmico, de modo que cada duplicación de la concentración añade un forzamiento constante. El forzamiento eleva la temperatura, T_t, con inercia, porque la reserva térmica de los océanos retrasa la respuesta.

CPO: la ecuación de Euler fija la senda de ahorro, y la de μ_t iguala el coste marginal de evitar una tonelada de CO_2 al valor presente de los daños que causaría, el **coste social del carbono**. **CSO**: como los daños multiplican la producción y dependen de la temperatura, no hay concavidad global, y el óptimo se obtiene numéricamente.

Solución (calibración de 2017): el calentamiento es de +4 °C en el escenario base, +3,5 °C con la maximización del bienestar, +2,5 °C con una política de limitación y +2 °C con una muy restrictiva. A 3 °C, el daño es del 2,1 % del PIB mundial, y el coste social del carbono, que en la senda óptima es el precio óptimo del CO_2, ronda los 31 $ por tonelada. Los IAM fundamentan así, en la mayoría de los escenarios, un impuesto al carbono uniforme entre países. En el *cap and trade*, como el RCDE UE, el precio lo fija el mercado.

Conclusiones: ofrece un marco transparente y replicable y hace operativo el coste social del carbono, que usan reguladores como la Comisión Europea. Sus límites son una función de daño *ad hoc*, la sensibilidad a la tasa de descuento, la omisión de los riesgos de cola y los puntos de no retorno (teorema lúgubre de Weitzman, 2009) y la agregación en un solo país-planeta.

2.2.2. Modelo RICE (Nordhaus y Yang, 1996)

Idea: regionaliza el DICE en diez regiones que maximizan su bienestar e interactúan a través del clima común y del comercio de bienes y capital. En RICE-99 (Nordhaus y Boyer, 2000), ocho regiones comercian solo derechos de emisión.

Resultado: los daños son muy dispares. África, la India y los países tropicales de renta baja son los más afectados, y Rusia y las latitudes altas sufren daños menores o incluso ganan en algunos escenarios. Esa asimetría entre responsabilidad histórica y exposición respalda el principio de **responsabilidades comunes pero diferenciadas** de la CMNUCC (1992).

Conclusiones: permite analizar la dimensión distributiva y la negociación internacional, pero hereda las críticas del DICE y no admite migraciones entre regiones.

2.2.3. Modelo PRICE (Nordhaus y Popp, 1997)

Idea: los parámetros clave, como la sensibilidad climática, los daños y los costes de mitigación, dejan de ser valores puntuales y pasan a ser distribuciones de probabilidad.

Resultado: el coste social del carbono supera al de la versión determinista, bajo incertidumbre conviene mitigar más y antes, y se suma una prima de riesgo, la disposición a pagar para evitar catástrofes climáticas imprevistas.

Conclusiones: trata la incertidumbre de forma explícita y permite estimar el valor de la información científica, es decir, cuánto vale reducir la incertidumbre sobre la sensibilidad climática. Sus distribuciones son, sin embargo, en parte subjetivas, y el tratamiento de la incertidumbre eleva notablemente el coste computacional.

2.2.4. Tasa de descuento y coste social del carbono

Idea: la regla de descuento se debe a Ramsey (1928), y el debate nace del Informe Stern (2006) y de la crítica de Nordhaus (2007). El coste social del carbono suma daños de varios siglos, y el descuento pesa en él tanto como la función de daño. Fijarlo es, en última instancia, un juicio ético.

Regla de Ramsey: en el óptimo de un planificador con utilidad CRRA, la tasa social de descuento suma la preferencia temporal pura, ρ, que recoge la impaciencia, y el efecto riqueza, θg_c, porque a generaciones más ricas un mismo daño les cuesta menos utilidad:

$$r = \rho + \theta g_c$$

- *Lectura prescriptiva* (Stern, 2006): los parámetros son juicios éticos. Con $\rho = 0{,}1\,\%$, solo por el riesgo de extinción, $\theta = 1$ y $g_c \approx 1{,}3\,\%$, resulta $r \approx 1{,}4\,\%$. La inacción costaría entre el 5 y el 20 % del PIB mundial frente a un 1 % de la mitigación, y el coste social del carbono rondaría los 85 $.
- *Lectura descriptiva* (Nordhaus, 2007): los parámetros se calibran para que r reproduzca los rendimientos reales de mercado, los de la inversión alternativa a la mitigación. Así, la acción inmediata y drástica que pedía Stern deja de estar justificada y la senda óptima pasa a ser gradual.

Ejemplo: un daño de 1000 $ dentro de cien años vale hoy unos 249 $ al 1,4 % y unos 12 $ al 4,5 %, veinte veces menos:

$$\frac{1.000}{(1+0{,}014)^{100}} \approx 249 \qquad \frac{1.000}{(1+0{,}045)^{100}} \approx 12$$

Descuento decreciente: la incertidumbre sobre la propia tasa lo justifica. El factor de descuento relevante es la media de los posibles, y a largo plazo la dominan las tasas bajas, porque con las altas los daños lejanos valen casi cero. Weitzman (2001) obtiene así una tasa efectiva que decrece con el horizonte, y el Reino Unido y Francia aplican calendarios decrecientes.

Estado actual: DICE-2023 acerca posiciones con un coeficiente de daño casi doble que el de 2016, un ciclo del carbono revisado y un descuento ajustado por riesgo que parte del 4,5 % real y decrece con el tiempo. Así, el coste social del carbono sube a 66 $ y la senda óptima limita el calentamiento a 2,6 °C en 2100, frente a 31 $ y 3,5 °C en 2017 (Barrage y Nordhaus, 2024). Con todo, el objetivo de 2 °C solo supera el análisis coste-beneficio con un descuento del 2 % o con daños mayores.

Conclusiones: la regla separa la impaciencia del efecto riqueza y concreta el desacuerdo en ρ y θ, pero la elección entre lecturas es normativa y la regla ignora las diferencias de renta entre los afectados.

En suma, DICE da el paso que Hotelling y Solow no daban, al hacer que el uso de los recursos dañe la producción, y RICE y PRICE añaden la disparidad regional y la incertidumbre. La función de daño y el descuento, en parte arbitrarios, deciden el coste social del carbono.

3. Acuerdos internacionales y principales medidas adoptadas

Si el clima es un BPG y las emisiones una externalidad, la respuesta exige acuerdos internacionales y políticas internas que los apliquen.

3.1. Tipos de política y cooperación

Mitigación: reduce las emisiones con impuestos sobre el CO_2, *cap and trade*, subvenciones a la reducción, I+D verde y estándares de eficiencia energética.

Adaptación: reduce los daños del cambio ya inevitable con diques, nuevas pautas de cultivo o seguros contra catástrofes.

Coordinación: como la mitigación es un BPG aditivo, el *free riding* condena la acción unilateral a la insuficiencia. Sin sanción supranacional, los acuerdos deben ser **autoejecutables** (*self-enforcing*), lo que limita la cooperación sostenible (Barrett, 2003). Nordhaus (2015) propone por ello los **clubes climáticos**: coaliciones con un precio común del carbono que penalizan arancelariamente a los no miembros y convierten en un coste quedarse fuera.

3.2. Orígenes (1972-1994)

1. *Conferencia de Estocolmo* (1972): primera gran conferencia de la ONU sobre el medio ambiente, de la que nace el PNUMA.
2. *Informe Brundtland* (1987): define el **desarrollo sostenible**, el que satisface las necesidades presentes sin comprometer las de las generaciones futuras.
3. *Protocolo de Montreal* (1987): restringe los clorofluorocarbonos que destruyen la capa de ozono, y es el acuerdo ambiental más exitoso, también por la naturaleza del problema (Barrett).
4. *IPCC* (1988): órgano científico de la OMM y el PNUMA, cuyos informes han documentado la relación causal entre GEI y temperatura y fundamentaron el umbral de 2 °C.
5. *CMNUCC* (1992): firmada en la Cumbre de la Tierra de Río, es el marco legal, con 198 partes, y crea las COP como máximo órgano decisor. Sus principios son la equidad y las responsabilidades comunes pero diferenciadas, la atención a los PED, la precaución y el derecho al desarrollo sostenible, y la Declaración de Río recoge "quien contamina paga".

3.3. Evolución a partir de las COP

3.3.1. Protocolo de Kioto (COP3, 1997)

Objetivos: primer acuerdo vinculante de reducción, un 5,2 % en conjunto respecto a 1990 en 2008-2012.

Miembros: solo los países del Anexo I, desarrollados, están obligados a reducir, con las emisiones medidas en unidades de cantidad atribuida, mientras que los demás, incluida China, asumen compromisos propios sin obligación de reducción.

Mecanismos de flexibilidad: tres, el comercio de derechos, el Mecanismo de Desarrollo Limpio, de inversión en países no Anexo I a cambio de certificados, y la Aplicación Conjunta entre países del Anexo I.

Periodos de compromiso: el primero, de 2008 a 2012, con una reducción del 8 % en la UE, y el segundo, de la Enmienda de Doha (2013-2020), con un 20 % en la UE y un 18 % en conjunto para el Anexo I, como puente hacia el Acuerdo de París.

Conclusiones: creó las primeras obligaciones jurídicas y los mecanismos de mercado del comercio de derechos, pero su alcance se redujo por la no ratificación de EE. UU., con el 20 % de las emisiones, y la exención de China e India.

3.3.2. Acuerdo de París (COP21, 2015)

Objetivos: primer acuerdo universal, adoptado por 196 partes y en vigor desde 2016: mantener el calentamiento muy por debajo de 2 °C, aspirando a 1,5 °C.

Miembros: a diferencia de Kioto, todos los países asumen compromisos, con responsabilidades diferenciadas.

Diseño: híbrido, con **contribuciones determinadas a nivel nacional** (NDC), obligatorias en su presentación pero no en su cumplimiento, y un marco de transparencia y revisión quinquenal. Los desarrollados se comprometieron a movilizar 100.000 M$ anuales de fuentes públicas y privadas, meta fijada en Copenhague (2009) y prorrogada en París hasta 2025, en parte a través del Fondo Verde para el Clima (Cancún, 2010).

Conclusiones: por primera vez todos los países asumen compromisos, pero no son vinculantes y dependen de la voluntad de cada gobierno. Además, las dos salidas de EE. UU. bajo la Administración Trump, la primera efectiva entre noviembre de 2020 y febrero de 2021 y la segunda desde enero de 2026, debilitan el marco.

3.3.3. De Glasgow a Dubái

Glasgow (COP26, 2021): primera mención a la reducción progresiva del carbón (*phase down*), revisión al alza de las NDC, objetivo de duplicar la financiación de adaptación para 2025 y avances en los mercados de carbono del artículo 6.

Sharm el-Sheikh (COP27, 2022): fondo de pérdidas y daños para los países especialmente vulnerables, primer instrumento financiero específico para los daños climáticos ya producidos, aunque sin reconocer responsabilidad jurídica ni obligación de compensación.

Dubái (COP28, 2023): primer balance global del Acuerdo y primer llamamiento a la "transición para abandonar los combustibles fósiles" (*transitioning away*) en su conjunto, cuando Glasgow solo había aludido al carbón y a las subvenciones ineficientes. Fijó además el objetivo de triplicar las renovables y duplicar la mejora de la eficiencia energética para 2030.

3.3.4. Bakú y Belém

Bakú (COP29, 2024): nueva meta de financiación de 300.000 M$ anuales para 2035, insuficiente para los PED, que pedían 1,3 billones, y hoja de ruta de Bakú a Belém para alcanzarlos.

Belém (COP30, 2025): la "COP de la implementación", sin delegación oficial de EE. UU., adoptó por consenso el Paquete de Belém: triplicar la financiación de adaptación para 2035, que sobre la meta de Glasgow supondría unos 120.000 M$ anuales, con 59 indicadores voluntarios de progreso, el Mecanismo de Transición Justa, que sitúa en el centro a trabajadores y comunidades, y diálogos sobre comercio y clima ante medidas unilaterales como el MAFC. El texto reconoce por primera vez la probabilidad de superar transitoriamente (*overshoot*) el umbral de 1,5 °C.

Conclusiones: con las NDC de 2025, las proyecciones pasan de más de 4 °C, el escenario previo a París, a 2,3-2,5 °C si se cumplen plenamente. Pero la hoja de ruta para abandonar los fósiles no entró en el texto por la oposición de los exportadores, pese al apoyo de más de 80 países, y Brasil se comprometió a liderar una voluntaria durante 2026. El Acuerdo

funciona, pero sigue lejos de sus objetivos.

3.4. Principales medidas adoptadas

Las políticas siguen dos vías: poner precio al carbono, como la UE y China, con lógica pigouviana, o subvencionar las tecnologías limpias, como EE. UU., más fácil de aprobar porque no encarece la energía, pero que no incentiva a ahorrarla y recae sobre el presupuesto.

3.4.1. Unión Europea

1. *RCDE UE* (2005): el mayor mercado de derechos de emisión del mundo por valor negociado. Tras años de exceso de derechos, la Reserva de Estabilidad del Mercado (2019) y la reducción del techo han elevado el precio, con una media en subasta de 83,60 €/t en 2023 y 64,74 € en 2024.
2. *Paquete de Clima y Energía 2020*: objetivos "20-20-20", una reducción del 20 % de las emisiones, un 20 % de renovables y un 20 % de eficiencia energética.
3. *Pacto Verde Europeo* (2019): neutralidad climática en 2050 y, para 2030, reducción del 55 % de las emisiones netas (Ley Europea del Clima, 2021), 42,5 % de renovables y 11,7 % de mejora de la eficiencia energética (Fit for 55). Incluye un segundo mercado (ETS2) para edificios y transporte por carretera, el MAFC, el Fondo Social del Clima y el Fondo de Transición Justa. La NDC de 2035 prevé una reducción del 66,25-72,5 % respecto a 1990.
4. *Objetivo para 2040* (2026): reducción neta del 90 % respecto a 1990, con hasta cinco puntos de créditos internacionales desde 2036, de modo que la reducción interna mínima es del 85 %, y retraso del ETS2 a 2028.
5. *MAFC en fase definitiva* (2026): los importadores de cemento, hierro y acero, aluminio, fertilizantes, electricidad e hidrógeno pagan por las emisiones incorporadas un precio ligado al del RCDE UE, a medida que se elimina la asignación gratuita, hasta 2034.

3.4.2. Otras grandes economías

Según el Banco Mundial (2026), 87 impuestos y mercados de derechos cubren casi el 30 % de las emisiones mundiales y recaudaron más de 107.000 M$ en 2025.

China: su mercado nacional, desde 2021, es el mayor por emisiones cubiertas, y en 2025 se amplió del sector eléctrico al acero, el cemento y el aluminio. Asigna derechos por unidad producida, sin techo absoluto, de modo que limita la intensidad y no el volumen, con el máximo de emisiones antes de 2030 y la neutralidad antes de 2060.

Estados Unidos: sin precio federal del carbono, ha optado por subvencionar. La Ley de Reducción de la Inflación (IRA, 2022) concedió créditos fiscales a la electricidad limpia, el vehículo eléctrico, el hidrógeno y la captura de carbono, pero la ley presupuestaria de julio de 2025 los recortó, y la tarificación queda en manos de estados como California.