

Modelo econométrico estructural de emisiones de CO₂e y cambio climático para América Latina

Dr. Luis Miguel Galindo colaboración de Oscar García Cervantes

Índice

- Introducción
- Marco general
- Estructura del ME3C3
- Especificaciones econométricas
- Escenarios prospectivos

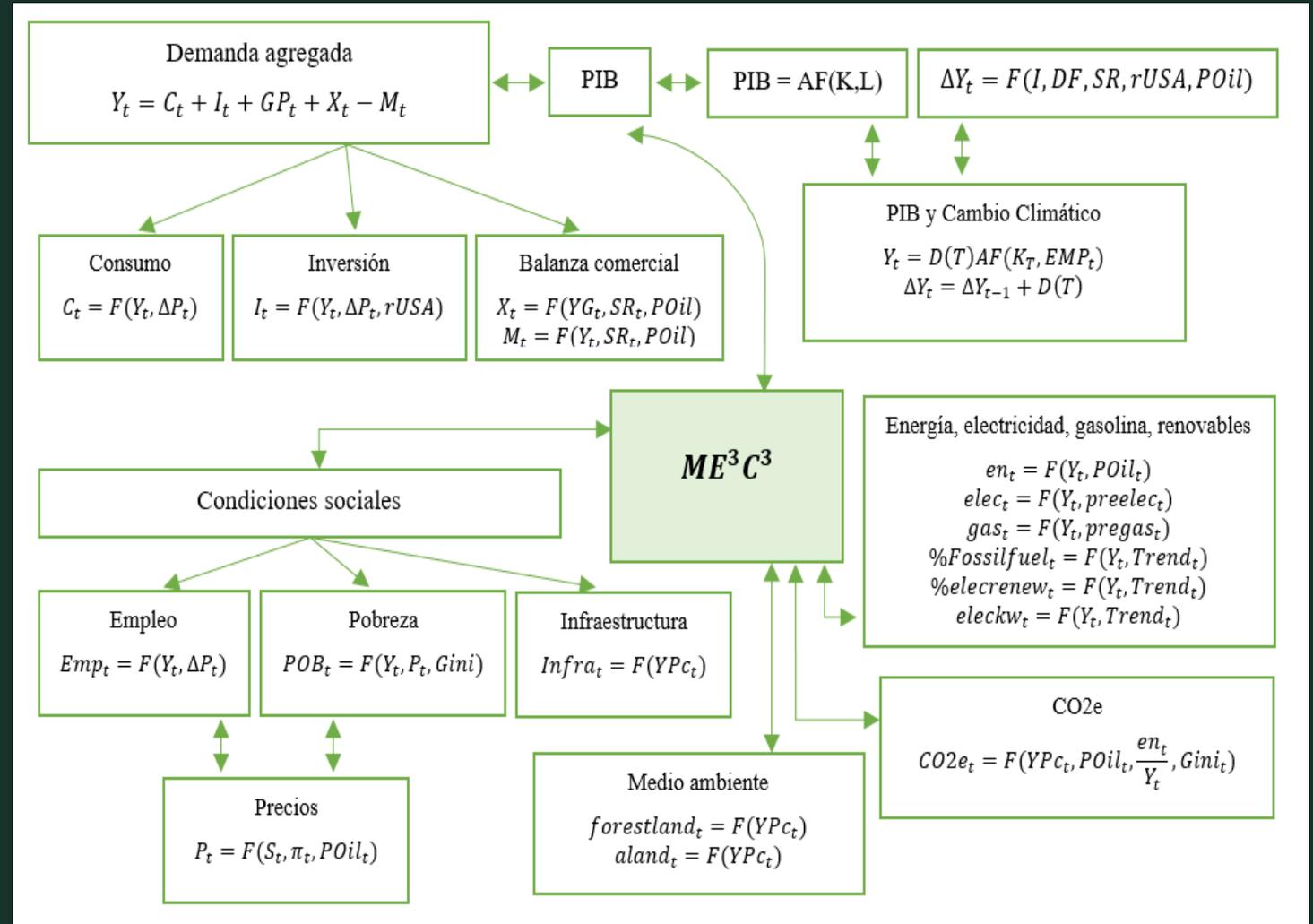
Introducción

- Modelo econométrico de pequeña escala para ALC (Modelo Econométrico Estructural de Emisiones de CO₂e y Cambio Climático, ME3C3)
- Análisis empírico de las relaciones entre macroeconomía y cambio climático.
- La base conceptual del ME3C3 tiene fundamento en los nuevos enfoques keynesianos (New Keynesian Models) y en la Nueva Economía del Clima (NEC).
- El cambio climático es un problema de desarrollo.

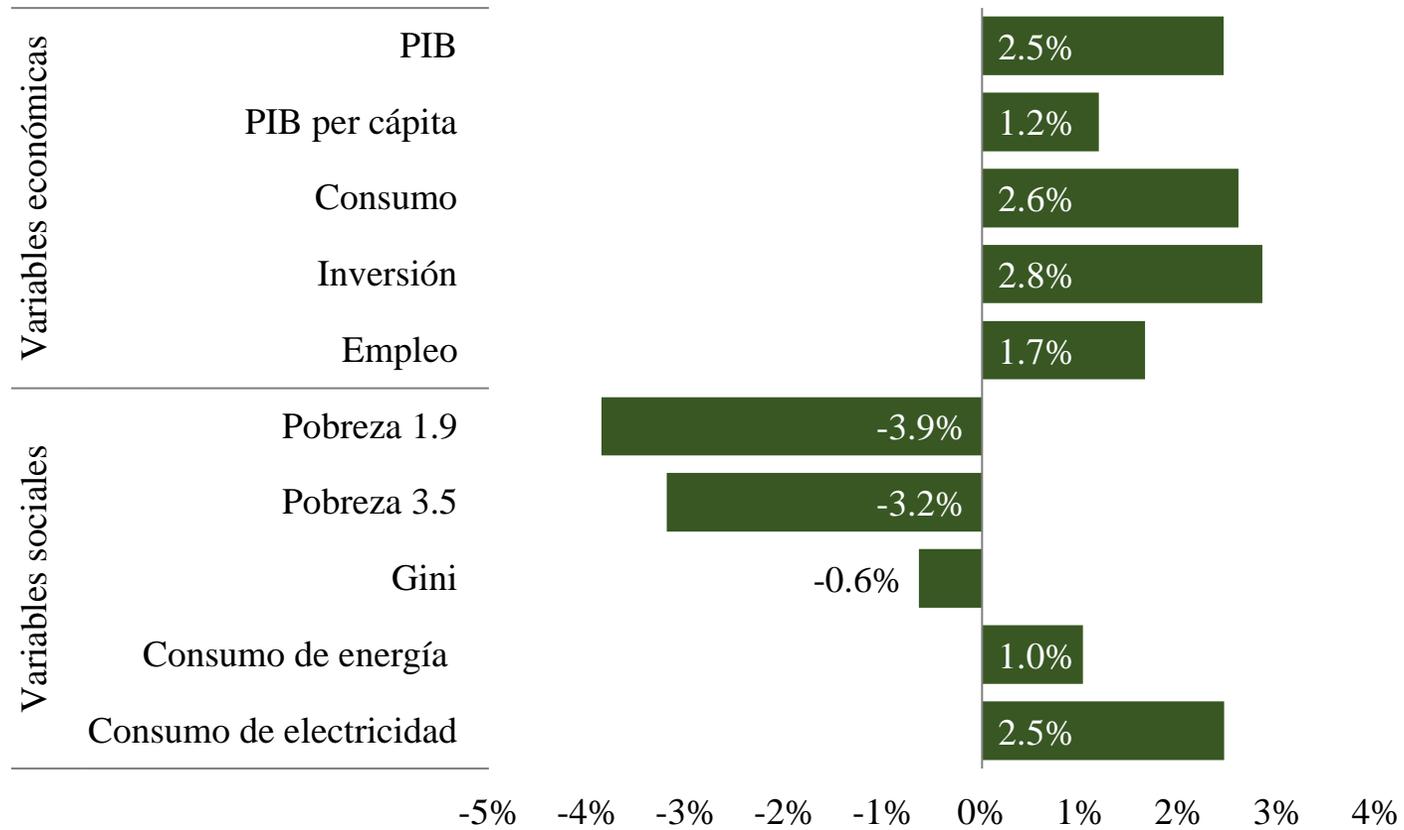
Marco general

- El ME3C3 es un modelo de pequeña escala para propósitos de política pública que incluye un conjunto de ecuaciones fundamentalmente de demanda que incorporan de forma explícita el cambio climático.
- Las variables ambientales y las externalidades negativas se integran en la modelización de acuerdo con la NEC y un tipo de curva de Kuznets ambiental.
- El modelo busca identificar relaciones de largo plazo.
- Escenarios no pronósticos.
- Cambio climático es un problema de desarrollo.
- Las especificaciones econométricas utilizadas tienen limitaciones, se ajustaron de acuerdo con la disponibilidad de datos, a los comportamientos atípicos derivados de la pandemia del Covid-19 y la recuperación económica posterior.

Estructura del ME³C³



Base de datos



Especificaciones econométricas del ME3C3

- PIB y cambio climático
- Producto y demanda agregada
- Consumo de energía
- Empleo y condiciones sociales
- Emisiones de gases de efecto invernadero
- Medio ambiente
- Precios

Marco:

- Función de producción:

- (5)
$$Y_t = D(T_t)TFP_t F(K_t, Emp_t),$$

-

- TFP_t :

- (6)
$$TFP_t = Y_t^p - Y_t,$$

- La función de producción en términos *per cápita* como:

- (7)
$$y_t = K_t^\alpha TFP_t^{1-\alpha},$$

- Puede expresarse como:

- (8)
$$\frac{Y_t}{L_t} = \alpha \frac{K_t}{L_t} + (1 - \alpha)TFP_t + u_t.$$

Marco:

- La evolución de la TFP puede modelarse como:

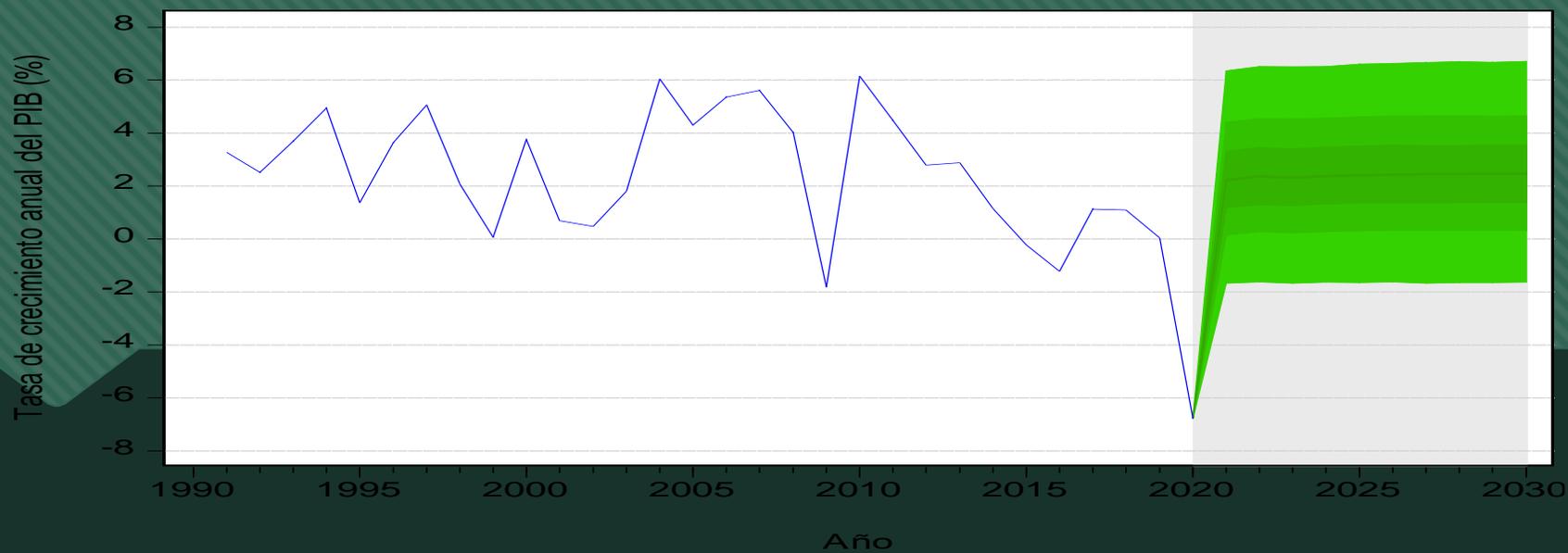
- (14)
$$\log TFP_t = \log TFP_{t-1} + \Delta(T),$$

- El efecto de la temperatura sobre la tasa de crecimiento se puede modelar como:

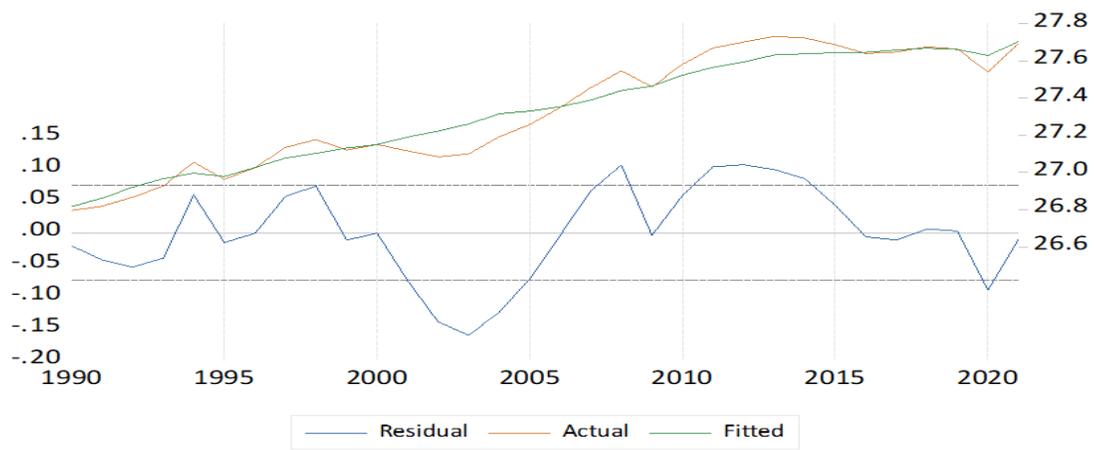
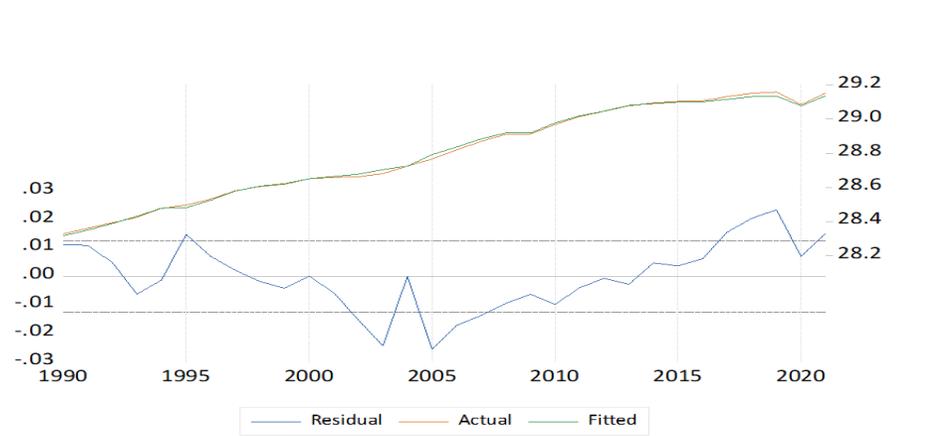
- (15)
$$\frac{\Delta TFP_{it}}{TFP_{it}} = g_i + \gamma T_{it},$$



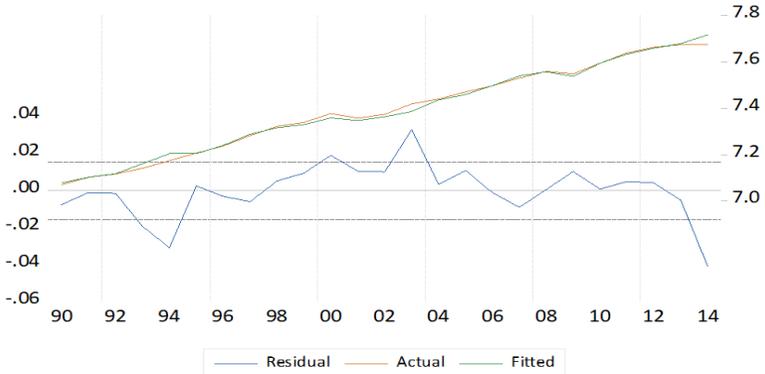
Tasa de crecimiento del PIB



Función de producción, TFP, consumo e inversion



Pobreza, CO2e transporte, electricidad y gasolinas



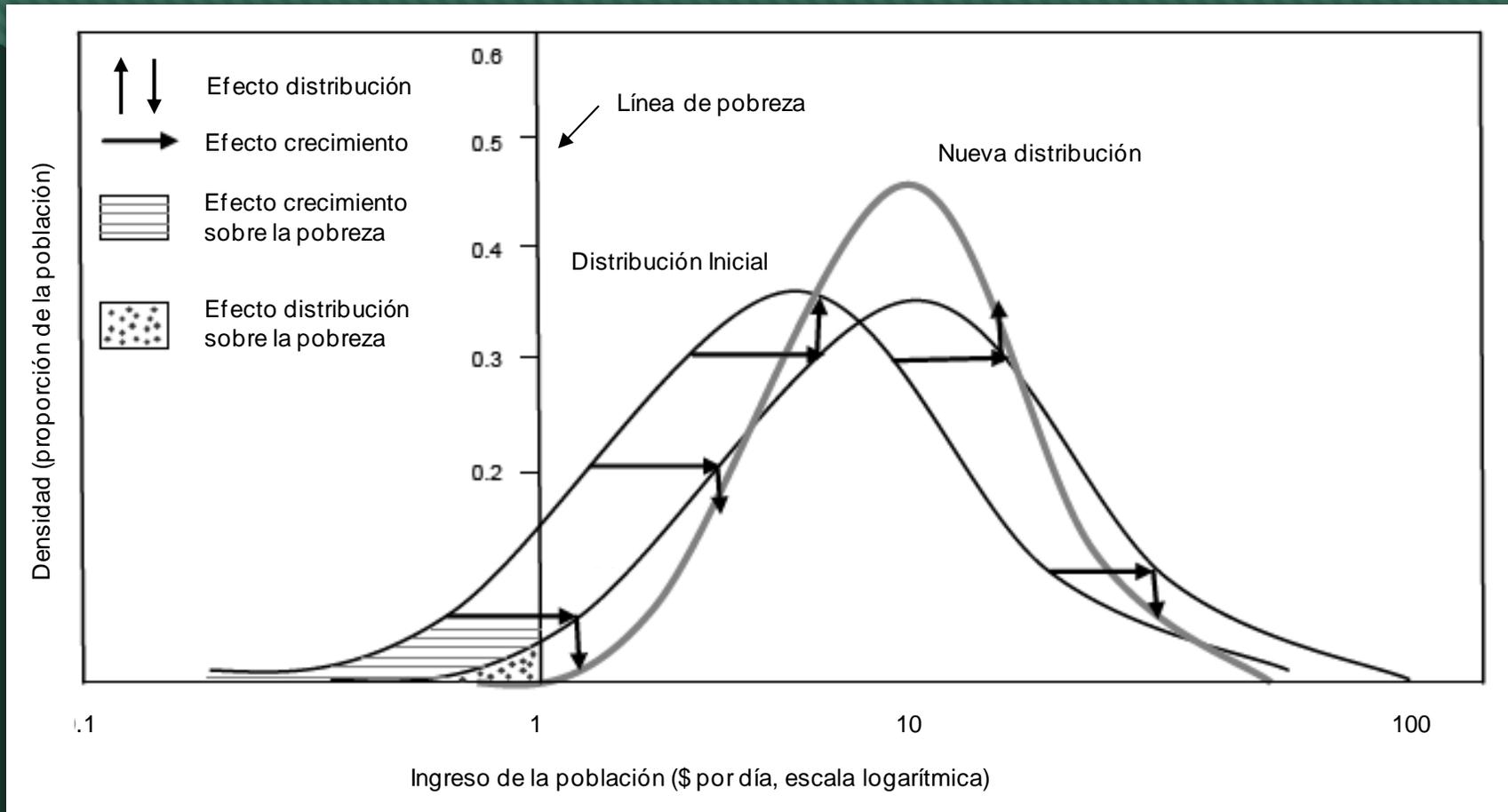
Consumo de energía

Variable	Ecuación	Comentarios
Consumo de energía	$en_t = -9.00 + 0.55Y_t - 0.005\Delta POil_t - 0.004Trend$ $ADF(1) = -2.95 \text{ (} p\text{-value } 0.005)$	Baja sensibilidad a precios
Consumo electricidad	$elec_t = -23.10 + 1.04Y_t - 0.15preelec_t$ $ADF(1) = -1.72 \text{ (} p\text{-value } 0.079)$	Baja sensibilidad a precios
Consumo de gasolinas	$gas_t = -18.46 + 0.75Y_t - 0.21pregas$ $ADF(1) = -1.86 \text{ (} p\text{-value } 0.061)$	Baja sensibilidad a precios
Consumo de energía con fuentes fósiles	$\%Fossilfuel_t = 0.51Y_t - 0.08POil_t$ $ADF(1) = -2.73 \text{ (} p\text{-value } 0.008)$	Baja sensibilidad a precios
Consumo de energía renovable	$\%elecrenew_t = -1.28 + 0.63Y_t - 0.01Trend$ $ADF(1) = -2.74 \text{ (} p\text{-value } 0.008)$	Caída
Producción de electricidad con fuentes renovables	$eleckw_t = 0.81Y_t + 0.05Trend$ $ADF(1) = -1.58 \text{ (} p\text{-value } 0.104)$	Tendencia

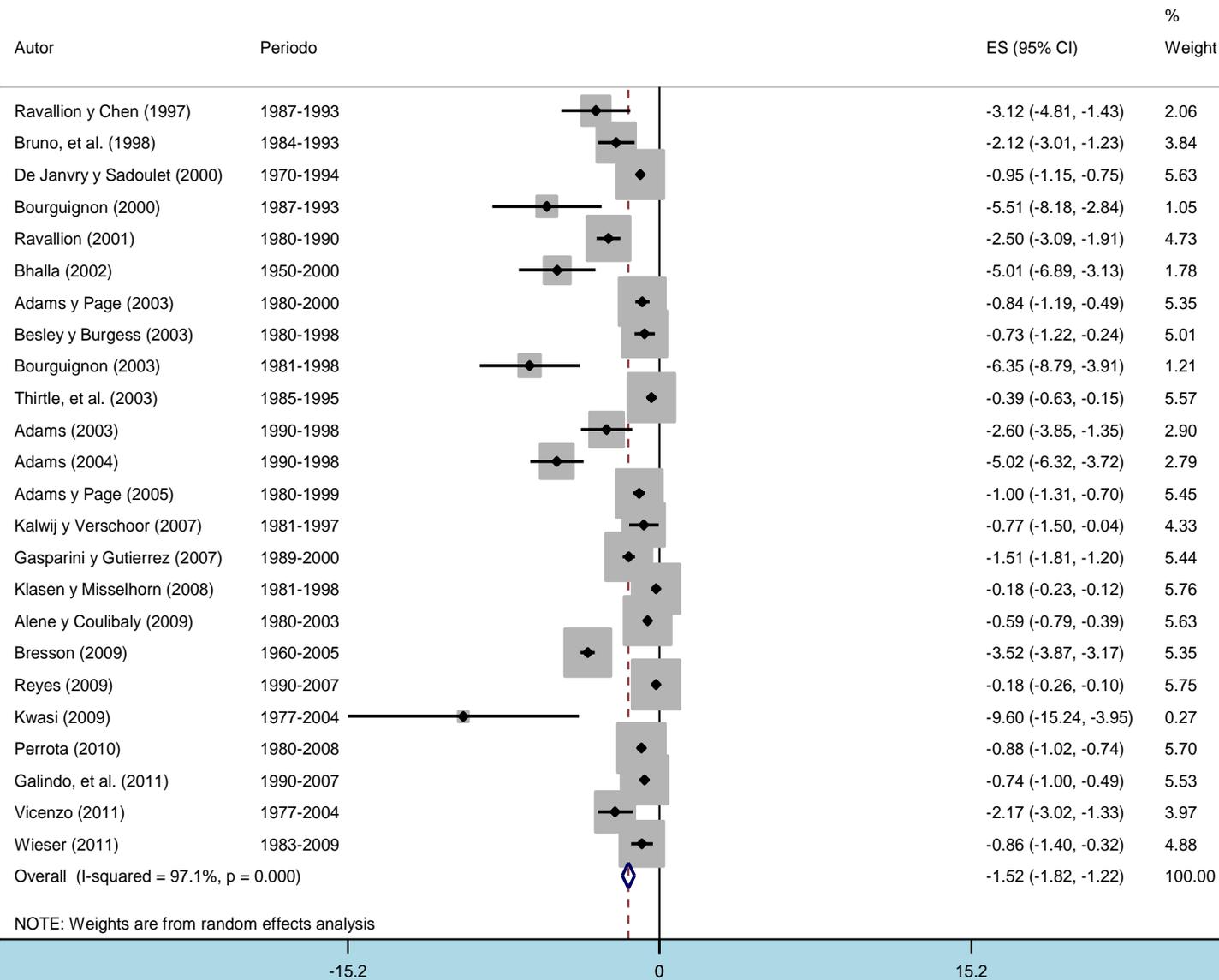
Condiciones sociales

Variable	Ecuación	Comentarios
Empleo	$\text{Emp}_t = -0.26 + 0.67Y_t - 0.01\Delta P_t$ $\text{ADF}(1) = -1.72 \text{ (} p\text{-value } 0.080\text{)}$	Consistente con la función de producción.
Pobreza1.9	$\Delta\%pobreza1.9 = -0.03 - 0.76\Delta Ypc_t + 2.35\Delta Gini_t$	Impacto bajo Ypc y efecto alto Gini
Pobreza3.5	$\Delta\%pobreza3.5 = -0.03 - 0.56\Delta Ypc_t + 1.63\Delta Gini_t$	Impacto bajo Ypc y efecto alto Gini
Tasa de mortalidad infantil	$morinfant_t = 20.92 - 1.99Ypc_t - 4.57\Delta Gini_t$ $\text{ADF}(1) = -3.36 \text{ (} p\text{-value } 0.002\text{)}$	Impacto Gini
Gasto en infraestructura	$infratot_t = -10.59 + 2.39Ypc_t$ $\text{ADF}(1) = -0.57 \text{ (} p\text{-value } 0.825\text{)}$	

Diagrama: Descomposición del cambio en pobreza en efecto ingreso y efecto distribución.



Fuente: Bourguignon, F. (2002) "The growth elasticity of poverty reduction: Explaining heterogeneity across country and the times period". En: T. S. Eicher y S. J. Turnovsky (eds.), *Inequality and Growth: Theory and policy implications*. CESifo Seminar Series.



NOTE: Weights are from random effects analysis

Gráfico: Meta-análisis de la elasticidad de cambios en la pobreza con respecto al crecimiento económico.

Fuente: Elaboración propia con base en la información estadística de la revisión de los estudios.
 Nota: El gráfico muestra los valores reportados en cada estudio. La línea horizontal que cruza el punto es la desviación estándar de la estimación y el punto implica la estimación puntual. La región gris muestra la ponderación de cada estudio en el meta-análisis, mientras que la línea punteada roja muestra el promedio ponderado de los estudios.

Emisiones de gases de efecto invernadero

Variable	Ecuación	Comentarios
Emisiones totales	$CO2eT_t = 0.55Y_t + 1.33gini_t$ $ADF(1) = -0.76 \text{ (p - value 0.377)}$	Baja sensibilidad a precios
Emisiones totales de energía	$CO2eEN_t = 7.21 + 1.84Ypc_t + 0.57Gini_t + 1.12\left(\frac{en_t}{Y_t}\right) - 0.5POil_t$ $ADF(1) = -2.54 \text{ (p - value 0.012)}$	Baja sensibilidad a precios
Emisiones de electricidad	$CO2eELEC_t = 3.00 + 1.79Ypc_t + 1.09Gini_t + 0.77\left(\frac{elec_t}{Y_t}\right)$ $ADF(1) = -2.03 \text{ (p - value 0.042)}$	Importancia del Gini
Emisiones de transporte	$CO2eTRANS_t = -6.04 + 1.96Y_t - 0.02POil_t + 0.37\left(\frac{en_t}{Y_t}\right)$ $ADF(1) = -2.73 \text{ (p - value 0.008)}$	Precio petróleo.
Emisiones industria	$CO2eIND_t = -37 + 1.43Y_t - 0.002poil_t$ $ADF(1) = -2.01 \text{ (p - value 0.045)}$	Importancia del Gini.
Emisiones agricultura	$CO2eAGRI_t = -13.38 + 0.72y_t + 1.29Gini_t$ $ADF(1) = -2.28 \text{ (p - value 0.025)}$	Importancia del Gini
Emisiones residuos	$CO2eRESID_t = 0.58Ypc_t + 0.57Gini_t + 0.02Trend$ $ADF(1) = -3.55 \text{ (p - value 0.001)}$	Importancia del Gini

Escenarios prospectivos contruidos al 2030 y al 2050

- Escenario I: Escenario inercial (Business As Usual –BAU-) que representa una extrapolación de las tendencias históricas.
- Escenario II: Escenario de efectos del cambio climático que incluye el impacto del cambio climático en el contexto del escenario inercial.
- Escenario III: Escenario de precio al carbono que incluye un precio del carbono.
- Escenario IV: Escenario de transición climática justa que incluye un precio al carbono y cambio en la distribución del ingreso.
- Escenario V: Escenario de riesgos de transición climática que presenta los esfuerzos de mitigación con base en el modelo IPAT.

Escenario I: Escenario inercial (Business As Usual -BAU-)

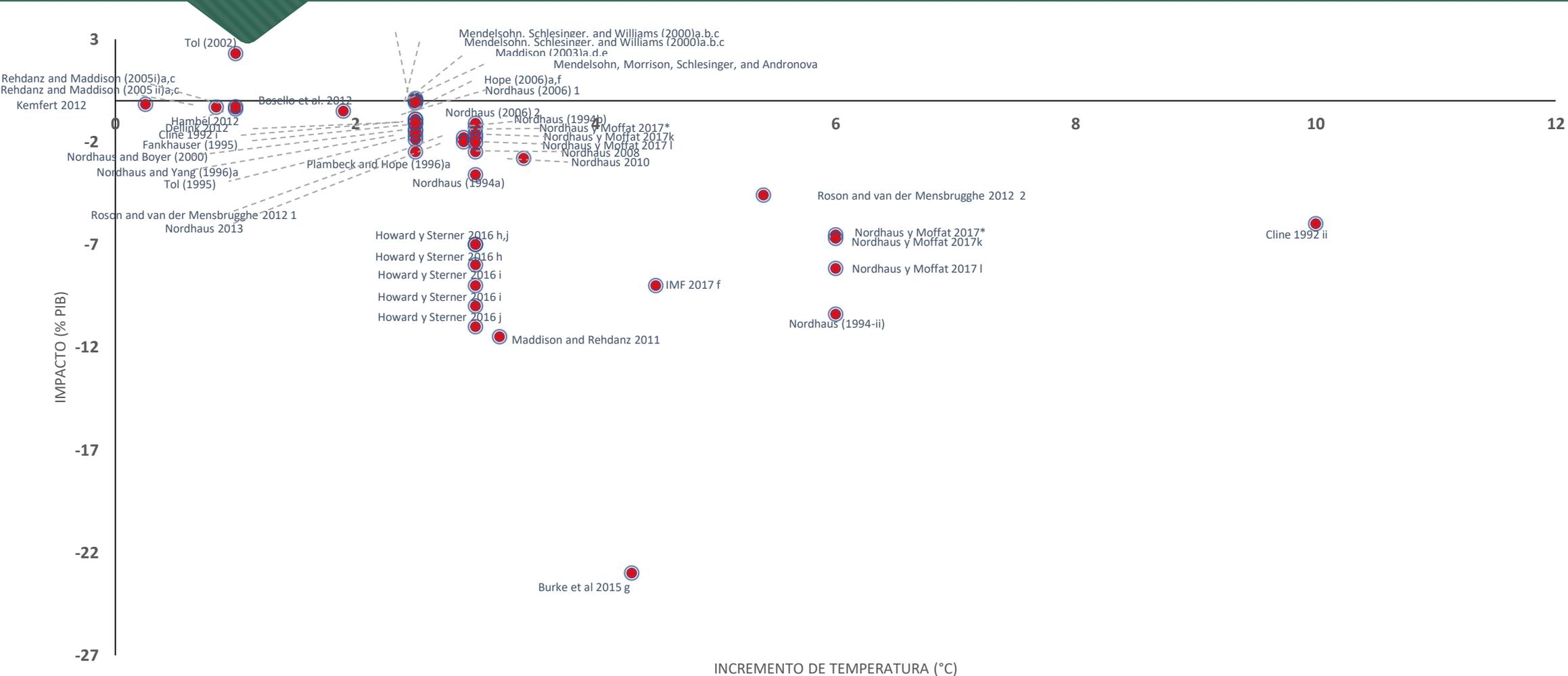
- Tasas de crecimiento promedio anuales históricas del conjunto de las variables.
- No se aplica un precio al carbono.

Variable	Período	
	2022-2025	2026-2030
PIB	2.62	1.67
Consumo privado	2.55	1.63
CO2e	1.16	0.68
CO2 electricidad	2.63	1.09
CO2 transporte	2.03	0.19
Pobreza 1.9 dls	-2.28	-2.85
Pobreza 3.5 dls	-2.28	-2.85
Consumo de gasolina	-1.29	-1.42
GINI	0.463	0.461

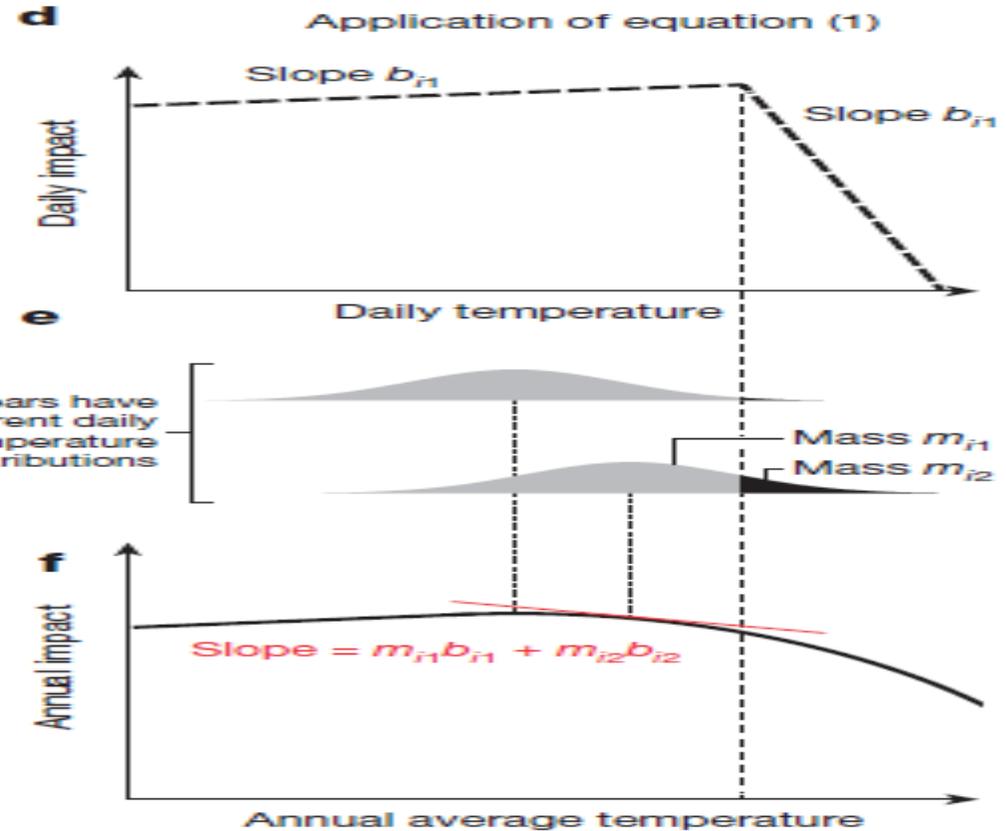
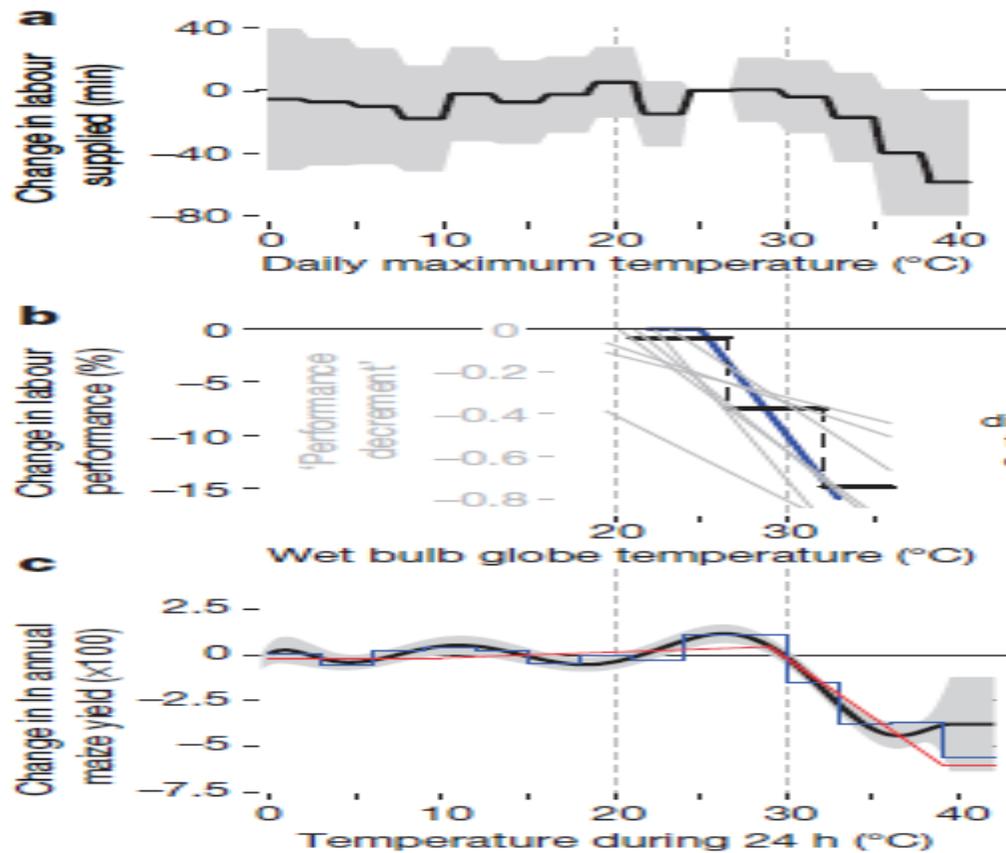
Escenario II: Escenario de efectos del cambio climático

- Escenarios climáticos (Solomon et al. 2007, Dell, et al., 2014, IPCC, 2013):
 - Aumento entre 0.8°C y 1°C durante el siglo pasado
 - Aumento de la temperatura media global entre 1.5°C y 3.1°C con escenarios extremos entre 4°C y 6°C para este siglo.
- Tasas de crecimiento promedio anuales históricas del conjunto de las variables.
- Efectos negativos del cambio climático sobre el nivel del PIB y sobre las tasas de crecimiento promedio anual del PIB.

Efectos de la temperatura en el PIB



Efectos no lineales generalizados



Escenario II: Escenario de efectos del cambio climático

- El escenario de cambio climático considera dos posibles casos extremos de costos económicos al 2030:
 - Efectos del cambio climático en el nivel del PIB **(a)**:
 - Aumento de temperatura de 1°C implica una reducción del 5% del PIB.
 - Efectos en la tasa de crecimiento del PIB **(b)**:
 - Aumento de 1°C implica una reducción de entre 1% y 2% de la tasa de crecimiento promedio anual del PIB.

Variable	BAU		Escenario a		Escenario b	
	Periodo		Periodo		Periodo	
	2022-2025	2025-2030	2022-2025	2025-2030	2022-2025	2025-2030
PIB	2.62	1.67	2.55	1.39	2.59	1.56
Consumo privado	2.55	1.63	2.50	1.34	2.52	1.53
CO2e	1.16	0.68	0.97	0.45	1.06	0.56
CO2 electricidad	2.63	1.09	2.06	0.37	2.34	0.73
CO2 transporte	2.03	0.19	1.39	-0.59	1.71	-0.20
Pobreza 1.9 dls	-2.28	-2.85	-2.02	-2.53	-2.15	-2.69
Pobreza 3.5 dls	-2.28	-2.85	-2.09	-2.61	-2.18	-2.73
Consumo de gasolina	-1.29	-1.42	-1.45	-1.63	-1.36	-1.52
GINI	0.463	0.461	0.463	0.461	0.463	0.461

Escenario III: Escenario de precio al carbono

- Un aumento al precio al carbono que se traslada al aumento del precio de la energía.
- Las simulaciones se basan en los escenarios (NGFS, 2021) y se utiliza un precio al carbono de USD \$100 tCO₂e al 2030.
 - Este precio al carbono se traduce en el aumento de precios de petróleo:
 - Este precio se trasladó al precio de la gasolina ($\Delta 80\%$) y al precio de la electricidad ($\Delta 40\%$).

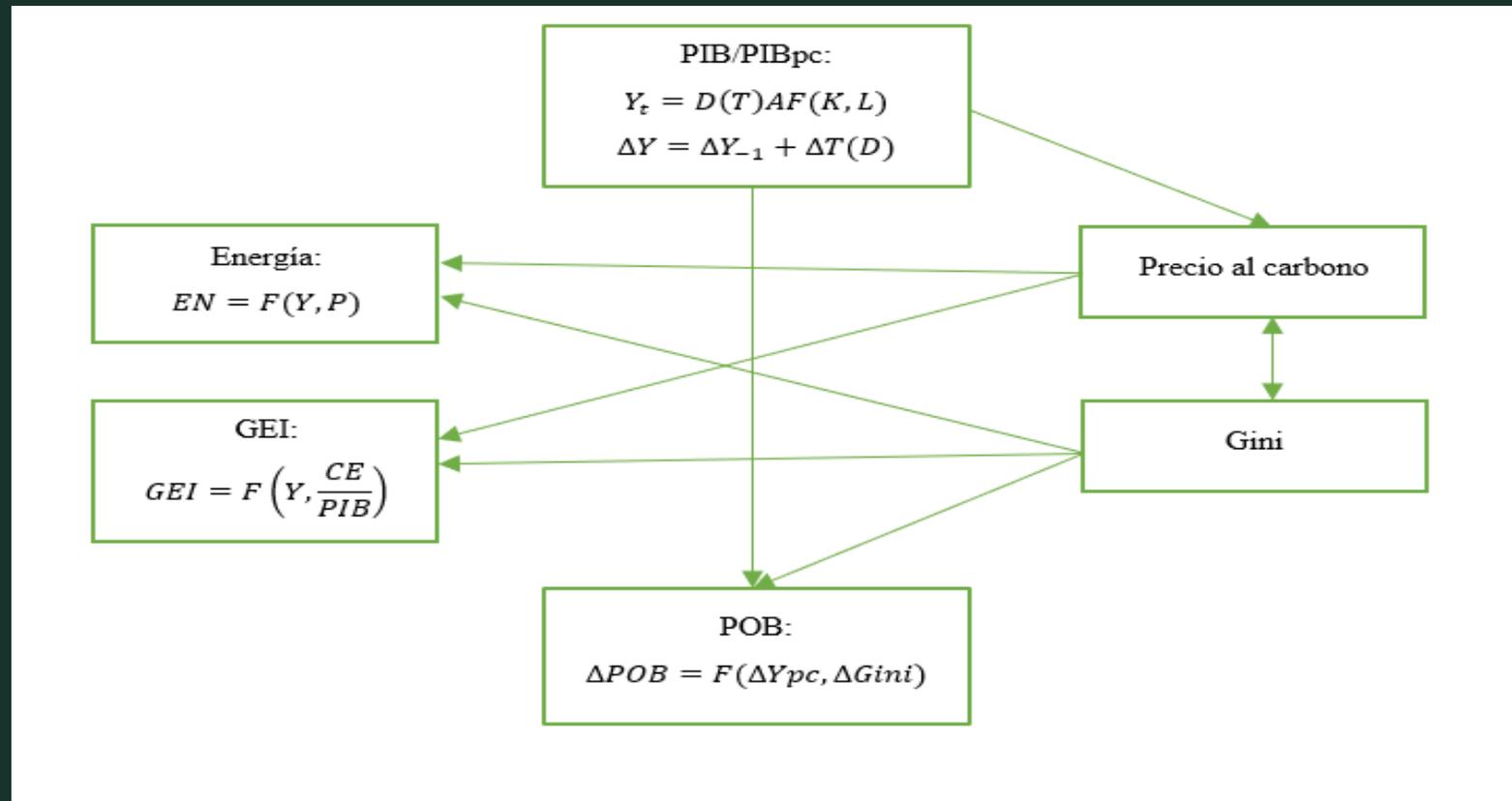
	BAU		Escenario 2	
Variable	Periodo		Periodo	
	2022-2025	2025-2030	2022-2025	2025-2030
PIB	2.62	1.67	2.26	0.20
Consumo privado	2.55	1.63	2.19	0.17
CO ₂ e	1.16	0.68	0.70	0.11
CO ₂ electricidad	2.63	1.09	0.39	-1.71
CO ₂ transporte	2.03	0.19	-0.52	-3.00
Pobreza 1.9 dls	-2.28	-2.85	-0.98	-1.22
Pobreza 3.5 dls	-2.28	-2.85	-1.34	-1.67
Consumo de gasolina	-1.29	-1.42	-2.45	-2.88
GINI	0.463	0.461	0.463	0.461

Escenario IV: Escenario de transición climática con precio al carbono y distribución del ingreso

- Precio al carbono de USD \$100 tCO₂e
- Distribución del ingreso: El coeficiente de Gini pasa de 0.555 de América Latina y el caribe a un coeficiente de Gini de 0.253 de Noruega.

Variable	BAU		Escenario 3	
	Periodo		Periodo	
	2022-2025	2025-2030	2022-2025	2025-2030
PIB	2.62	1.67	2.26	0.20
Consumo privado	2.55	1.63	2.21	0.17
CO ₂ e	1.16	0.68	-8.74	-11.70
CO ₂ electricidad	2.63	1.09	-7.34	-11.38
CO ₂ transporte	2.03	0.19	-0.52	-3.00
Pobreza 1.9 dls	-2.28	-2.85	-17.02	-21.28
Pobreza 3.5 dls	-2.28	-2.85	-12.46	-15.58
Consumo de gasolina	-1.29	-1.42	-2.45	-2.88
GINI	0.463	0.461	0.395	0.261

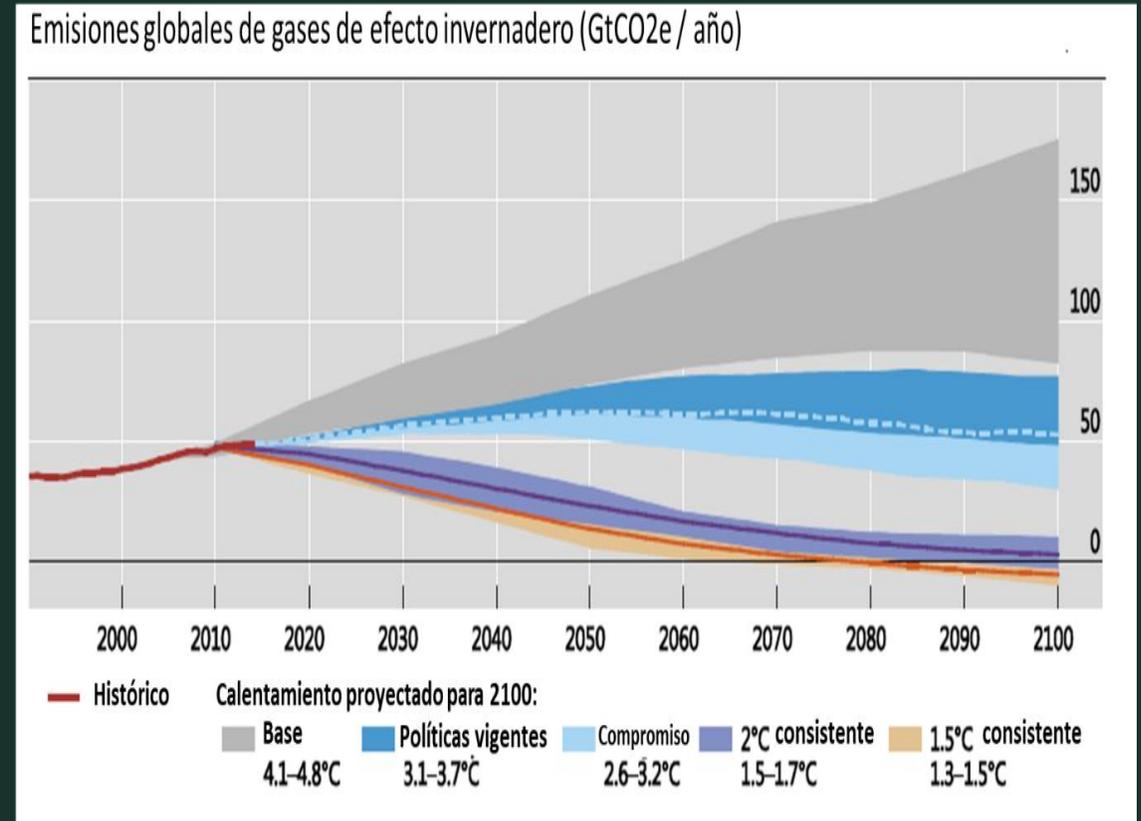
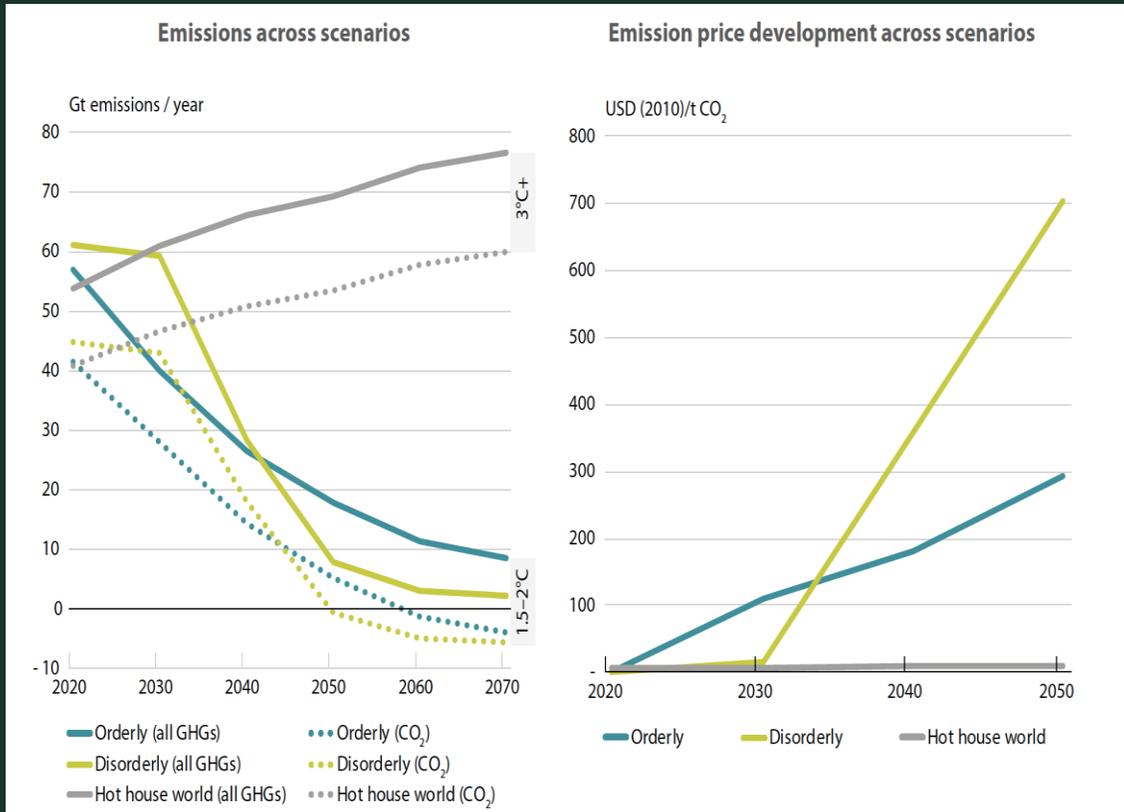
Precio al carbono, distribución del ingreso, consumo de energía y emisiones de gases de efecto invernadero



Escenario V: Escenarios de riesgos de transición climática

- **Escenarios:**
- **Transición ordenada:**
 - Temperatura: 1.5oC – 2oC.
 - Carbono neutral 2050- 2070.
 - Precio al carbono USD \$10 tCO2e anual en 2020.
 - Activos varados.
- **Transición desordenada:**
 - Temperatura: 1.5oC – 2oC.
 - Carbono neutral 2050 (debido a retraso).
 - Precio al carbono USD \$35 tCO2e anual en 2030.
 - Activos varados.
- **Clima caliente (Hot house) (Políticas actuales - BAU):**
 - Temperatura: 3oC (NDC) – 4oC.
 - Sin precio al carbono.

Escenario IV: Escenario de transición climática con precio al carbono y distribución del ingreso



IPAT

1. La identidad del IPAT:

$$(1) \quad \Delta CO_2ee_t = \Delta POB_t + \Delta \left(\frac{PIB_t}{POB_t} \right) + \Delta \left(\frac{CE_t}{PIB_t} \right) + \Delta \left(\frac{CO_t}{CE_t} \right)$$

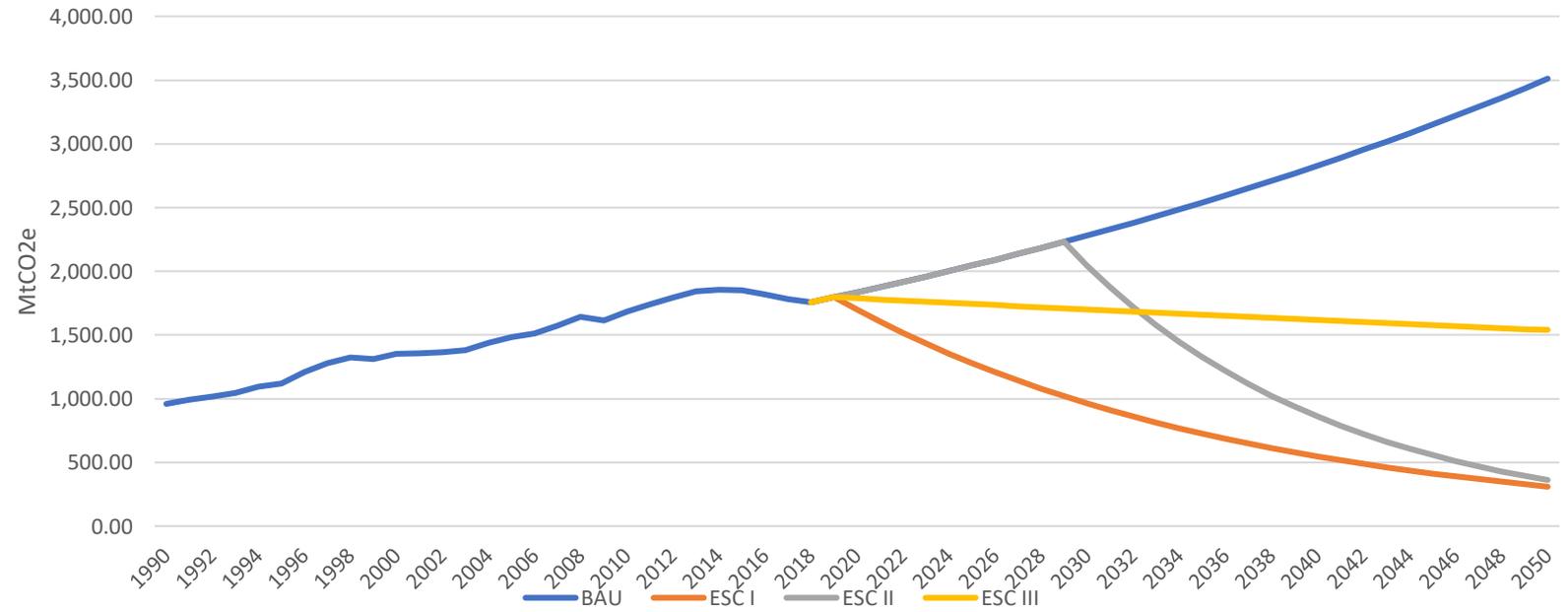
$$(2) \quad \Delta CO_2ee_t = \Delta PIB_t + \Delta \left(\frac{CE_t}{PIB_t} \right) + \Delta \left(\frac{CO_t}{CE_t} \right)$$

Donde CO_2ee_t representa las emisiones de CO_2 equivalentes provenientes del consumo de energía, POB_t es la población, PIB_t es el Producto Interno Bruto y CE es el consumo de Energía. La razón de PIB_t sobre POB_t representa el PIB per cápita. El subíndice t indica al año. Las ecuaciones (1) y (2) tienen también su representación en niveles.

ESCENARIOS IPAT AL

VARIABLE/ES CENARIO	BAU	ESC ORDENA DO	ESC DESORDEN ADO	ESC CRECIMIE NTO
PIB	2.80	2.00	2.00	4.00
CE/PIB	-0.61	-3.50	-5.00	-2.00
CO₂ee/CE	0.01	-4.00	-5.30	-2.50
CO₂ee	2.18	-5.50	-8.30	-0.50

ESCENARIOS AL



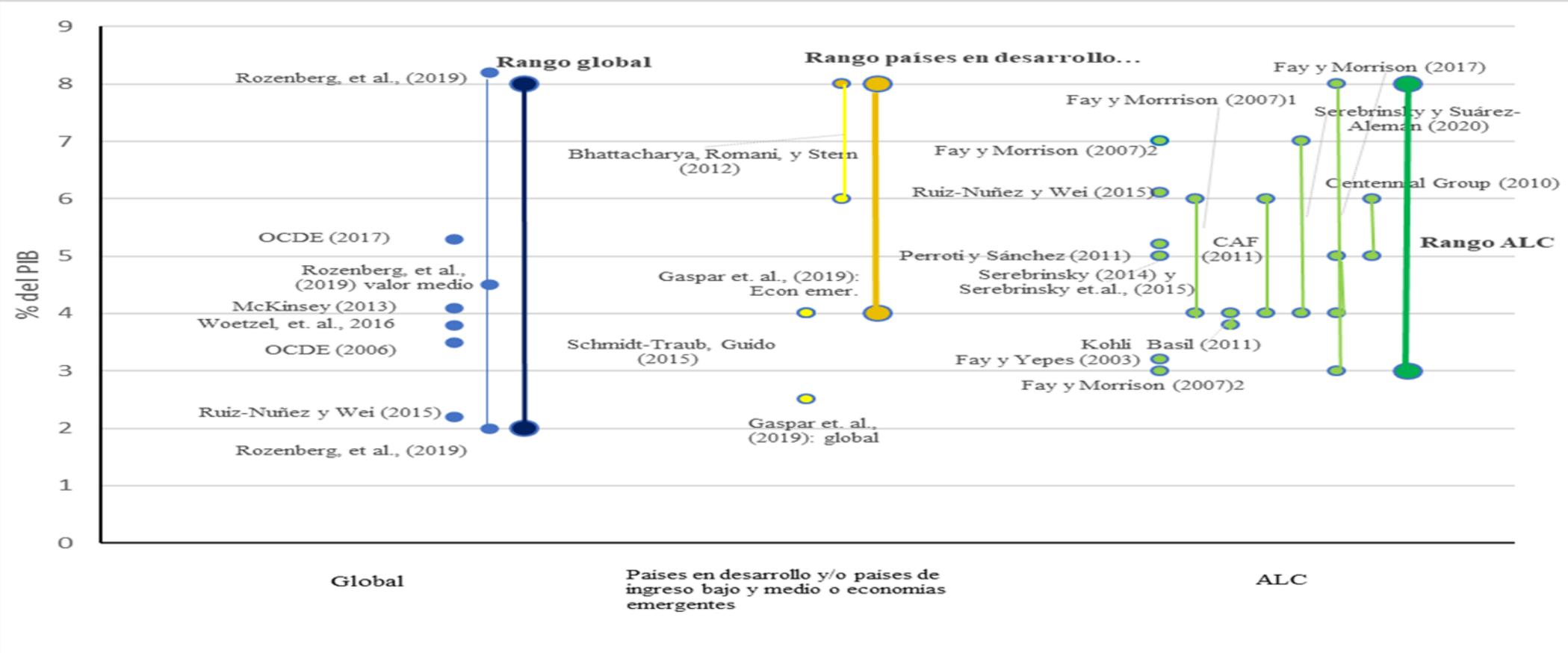
Análisis general de escenarios

- El actual estilo de desarrollo está sujeto a la crítica de la paradoja del desarrollo y, por tanto, no es consistente con una economía carbono neutral ni con un desarrollo sustentable.
- Indispensable instrumentar transformaciones estructurales amplias y urgentes al actual estilo de desarrollo.
- Indispensable construir un amplio y estable consenso económico, social y político favorable a estas transformaciones. Esta coalición para una transición climática justa tiene como su eje una mejora en la distribución del ingreso y REFORMA FISCAL.

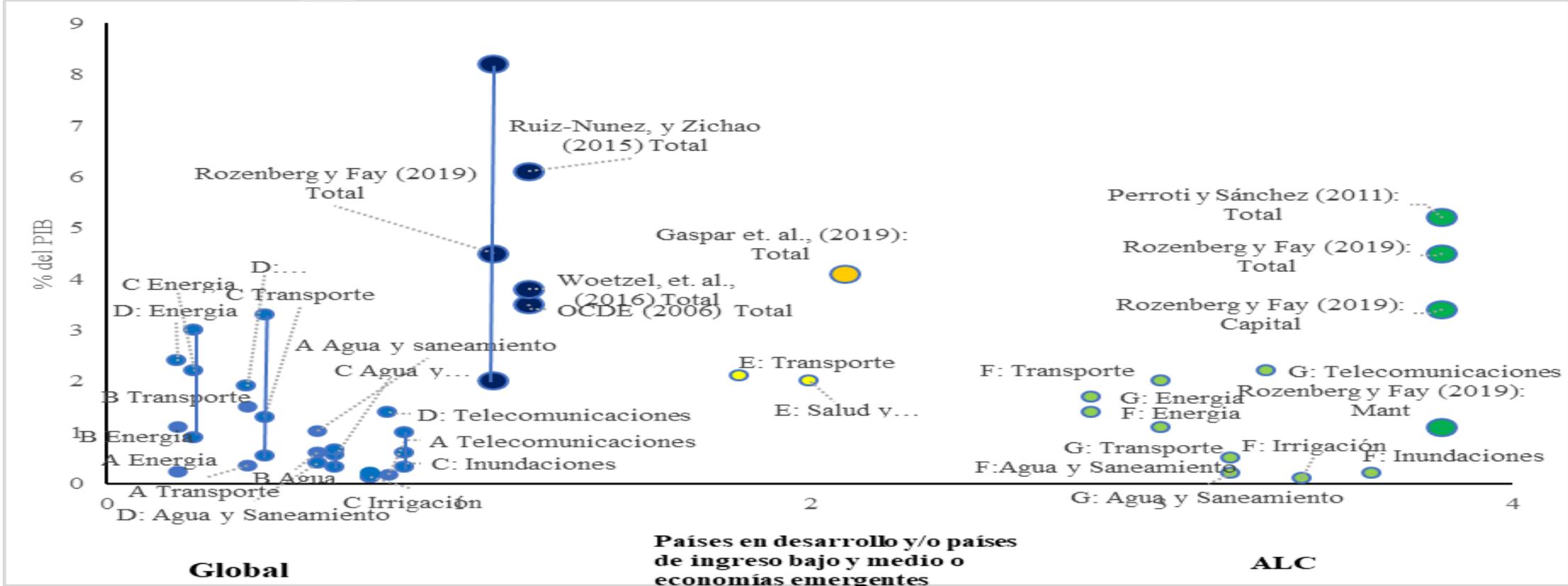
Análisis general de escenarios

- Estas transformaciones estructurales para alcanzar un desarrollo sostenible deben quedar reflejadas en:
 - Modificaciones en las elasticidades ingreso y precio que condicionan el actual estilo de desarrollo.
 - Desacoplamiento entre la trayectoria del PIB y las emisiones del sector energético a través de aumento significativo de la eficiencia energética y de la des-carbonización de la economía.
 - Una tasa de crecimiento del PIB del 3% - 4% superior al promedio histórico del período 1990-2020.
 - La construcción de una nueva matriz de servicios públicos y privados consistente con un desarrollo sostenible.

Inversión en infraestructura



Inversión en infraestructura



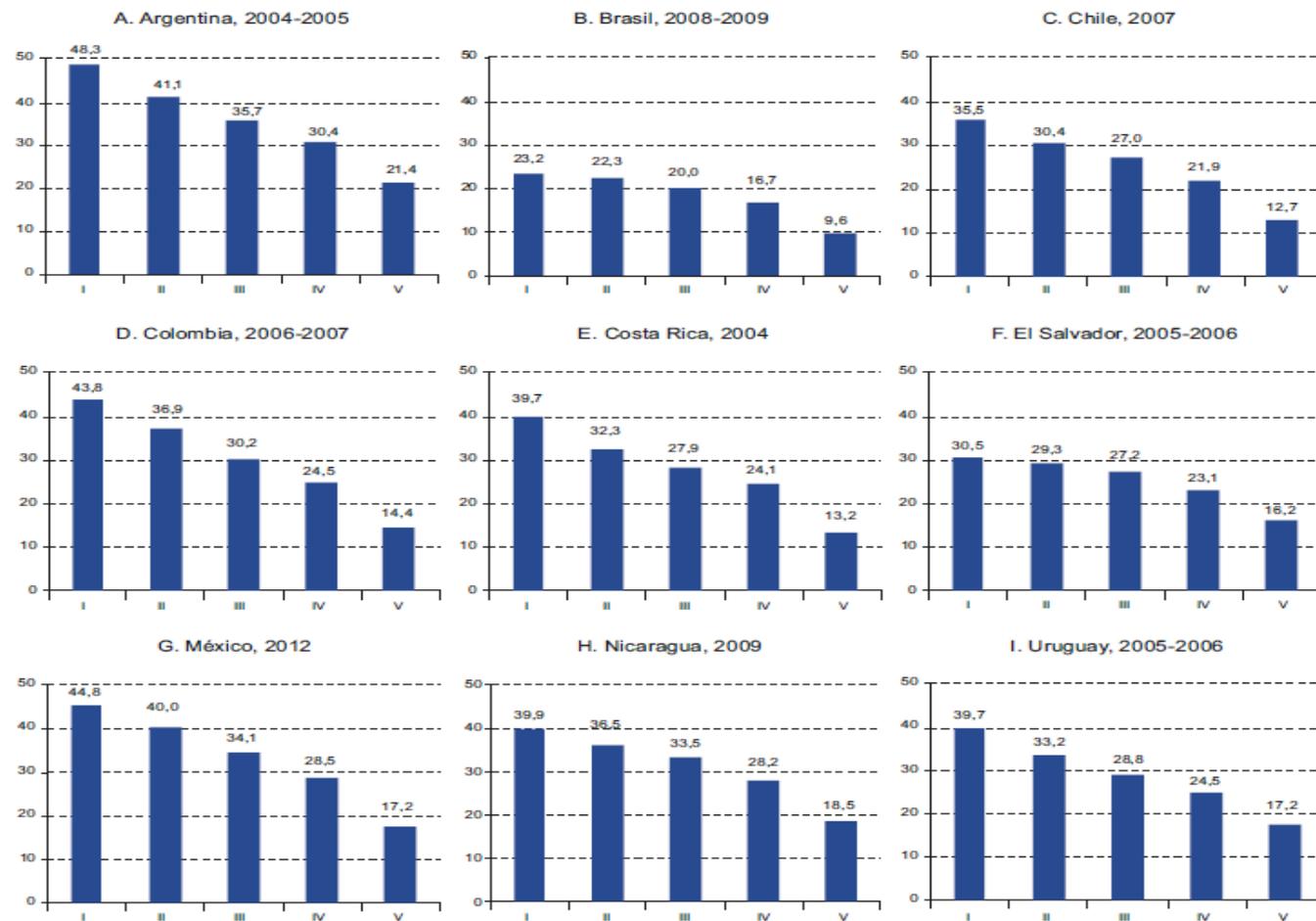
Activos varados en Bolivia (Titelman, et al., 2022)

Periodo	Concepto	Participación %
2000-2004	PIB	4%
2005-2009	PIB	5%
2010-2014	PIB	6.7%
2015-2019	PIB	3.8%
2000-2004	Exportaciones	24.2%
2005-2009	Exportaciones	45.7%
2010-2014	Exportaciones	48.0%
2014-2019	Exportaciones	33.9%
2000-2004	Ingresos fiscales	11.8%
2005-2009	Ingresos fiscales	27.7%
2010-2014	Ingresos fiscales	29.7%
2015-2009	Ingresos fiscales	16.7%

Ley de Engel

América Latina (9 países): proporción del gasto familiar en alimentos y bebidas respecto del gasto total, por quintiles de ingreso

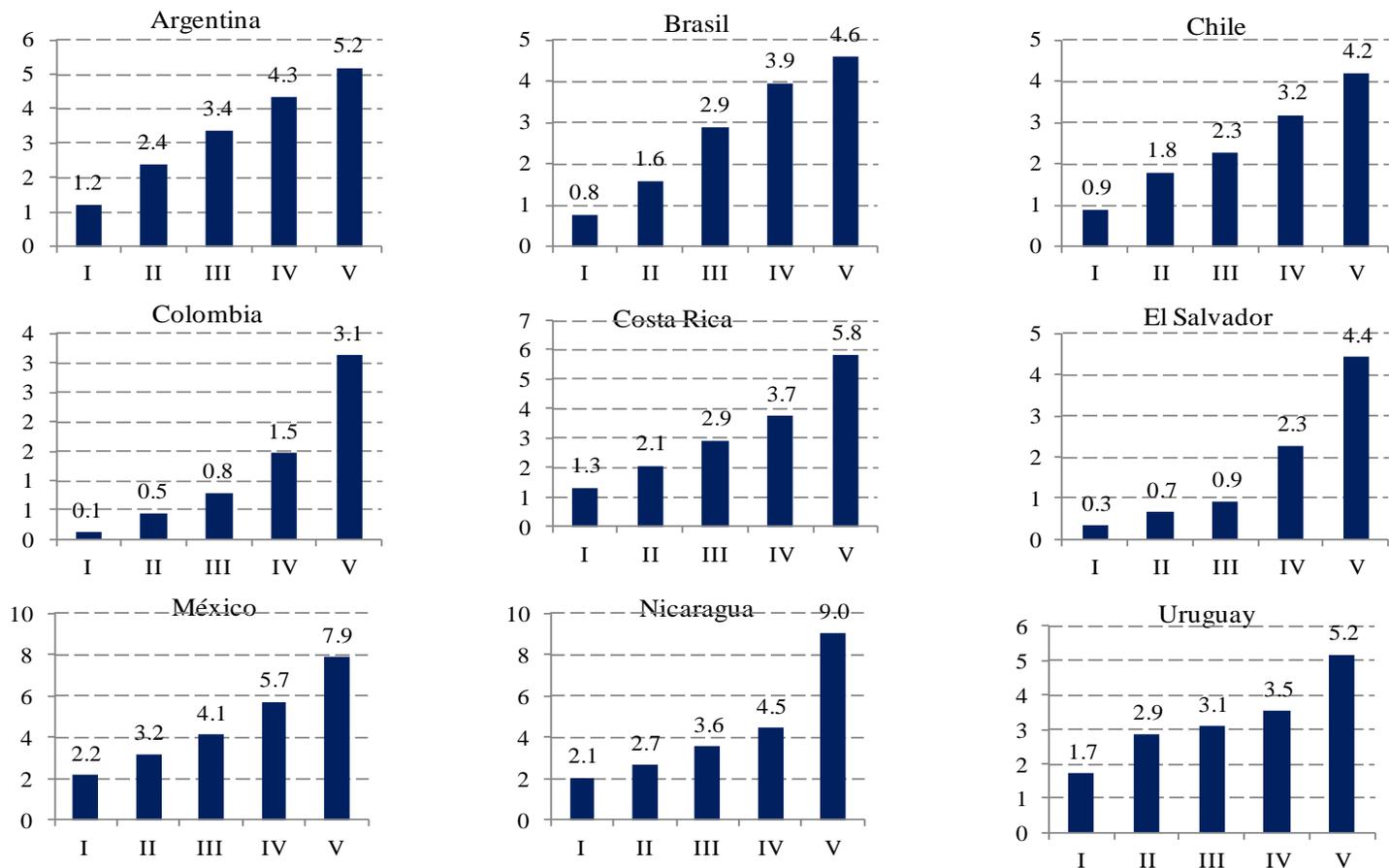
(En porcentajes)



Fuente: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), sobre la base de las encuestas ingreso-gasto de los países seleccionados.

Gasto en combustibles

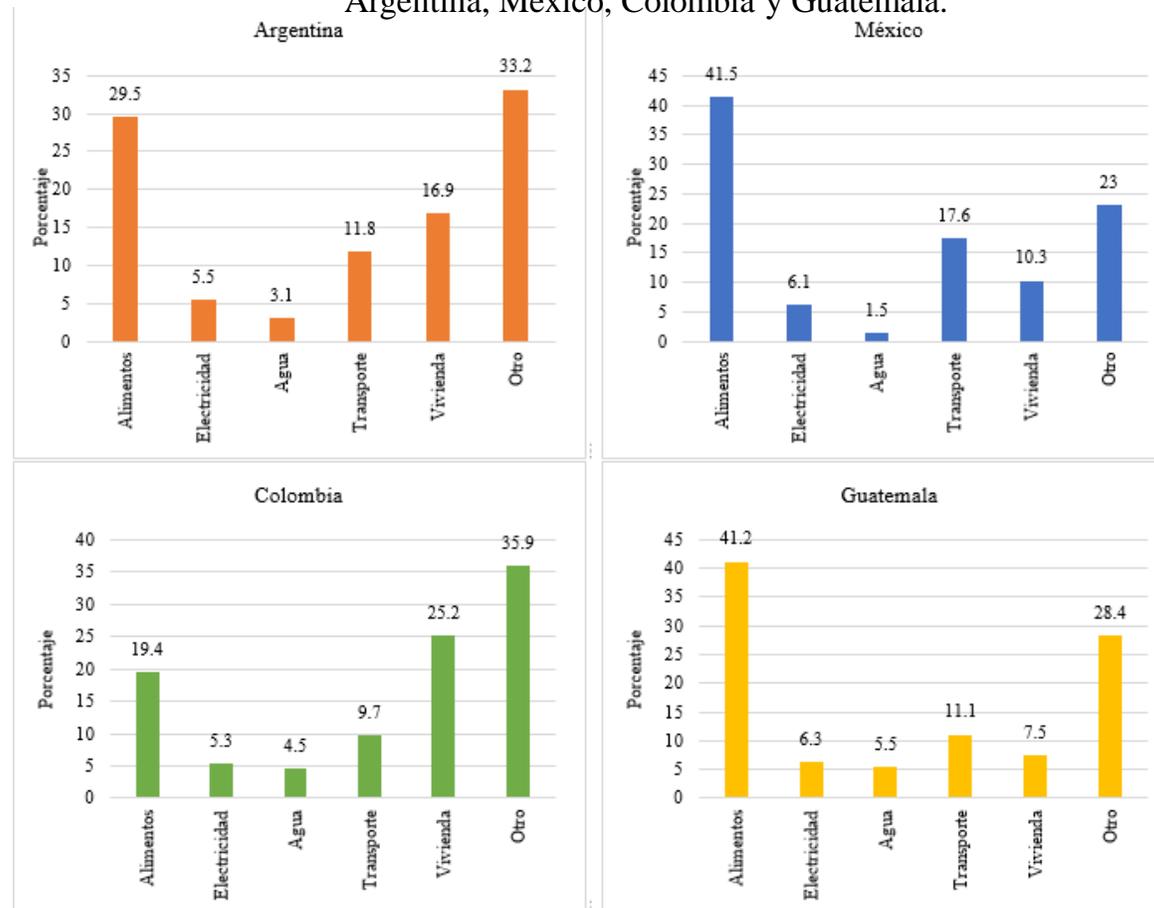
Proporción del gasto familiar en combustibles para transporte (gasolina, diesel y biodiésel) respecto del gasto total de cada quintil, por quintiles de ingreso, (en porcentajes)



Fuente: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), sobre la base de las encuestas ingreso-gasto de los países seleccionados.

Transición justa

Gráfica 4. Gasto promedio por hogar por rubro en porcentajes en países seleccionados en América Latina: Argentina, México, Colombia y Guatemala.



Fuente: **Argentina:** Encuesta Nacional de Gastos de los Hogares (ENGH) 2017 / 2018, **Colombia:** Encuesta nacional de presupuestos de los hogares (ENPH), **México:** Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares (ENIGH) 2018, **Guatemala:** Encuesta Nacional de Condiciones de Vida (ENCOVI) 2014.

Resumen y conclusiones

Modelo econométrico estructural de pequeña escala (Modelo Econométrico Estructural de Emisiones de CO₂e y Cambio Climático (ME3C3).

Trayectoria de crecimiento económico inercial (Business As Usual, BAU) no es consistente con la meta de una **economía carbono neutral** entre 2050-2070 y configura un **dilema de desarrollo**.

Un escenario de crecimiento económico continuo, acompañado de aumentos moderados de precios relativos de la energía producida a partir de combustibles fósiles es **inconsistente** con un proceso de **descarbonización profunda**

Resumen y conclusiones

Una estrategia de mitigación de largo plazo requiere un **impuesto al carbono** para la construcción de una economía carbono neutral. Las bajas **elasticidades precio** de la demanda de energía y de las emisiones de GEI y las altas **elasticidades ingreso** de la demanda de energía y de las emisiones de CO₂e_f.

Un **aumento drástico del precio al carbono** podría afectar el ritmo de crecimiento económico y ocasionaría efectos, potencialmente, regresivos en la distribución del ingreso.

Construcción de una **coalición** a favor de una mejor distribución del ingreso que contemple avances significativos en materia de mitigación de las emisiones de GEI.

Resumen y conclusiones

Transformaciones para transición climática incluye modificaciones a las actuales formas de producción y a las pautas de consumo, involucran, necesariamente, mejoras en materia de eficiencia energética, además de la **electrificación masiva** de las actividades económicas y del transporte

las economías de América Latina y el Caribe son sensibles a diversos **shocks externos**: i) tasa de interés de Estados Unidos; ii) precios del petróleo; iii) el producto global; iv) el cambio climático tiene impactos negativos sobre el nivel de producción y sobre la tasa de crecimiento del PIB.

La curva de Kuznetz no parece sostenerse, al menos en los actuales niveles de ingreso de las emisiones de GEI.

Modelo econométrico estructural de emisiones de CO₂e y cambio climático para América Latina

Dr. Luis Miguel Galindo colaboración de Oscar García Cervantes

Escenario IV: Escenario de transición climática con precio al carbono y distribución del ingreso

Escenario IV: Escenario de transición climática con precio al carbono y distribución del ingreso

Escenario IV: Escenario de transición climática con precio al carbono y distribución del ingreso