



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ECONOMÍA

**“UN ESTUDIO EMPÍRICO DE LOS MECANISMOS
NATURALES Y ANTROPOGÉNICOS
GENERADORES DEL CAMBIO CLIMÁTICO”**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
LICENCIADA EN ECONOMÍA**

PRESENTA:

LAURA VERONICA GONZALEZ RAMIREZ

TUTOR:

DR. ARMANDO SÁNCHEZ VARGAS



MÉXICO D.F.

NOVIEMBRE 2015



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Dedico esta tesis a Mütti,

Te amo

Agradecimientos

“Ama y haz lo que quieras” decía San Agustín, “Haz sólo lo que amas y serás feliz” mencionaba Facundo Cabral. Dios me ha bendecido grandemente al haberme conducido hacia mi vocación en la ciencia económica y permitirme crecer y desarrollarme en lo que amo y me hace feliz.

Sergent decía “El éxito no se logra sólo con cualidades especiales. Es sobre todo un trabajo de constancia, de método y de organización”. Hoy cierro un ciclo de mi vida, una etapa marcada por fuertes altibajos que, sin duda, fueron imprescindibles en mi formación, no sólo como profesionista sino como persona. A pesar del esfuerzo y dedicación brindados para alcanzar el culmen de mi licenciatura, el camino me habría sido pedregoso y nebuloso sin el apoyo, guía, comprensión, cuidado y amor de la persona más importante de mi vida, mi ejemplo en virtud y tenacidad, mi Mamá. A ti Mamá dedico esta tesis, fruto del amor y la pasión que tengo a mi carrera, esta última que continúe sin dar marcha atrás, gracias a tu fe y confianza. Agradezco de igual manera a mis tres grandes amores, mis mejores amigas, mis incondicionales, mis hermanas Liz, Karen y Ana porque siempre han creído en mí y no han cesado en apoyarme en los momentos más difíciles. Quiero agradecer también a la persona que en los últimos cuatro años me ha acompañado fielmente y ha sido en múltiples ocasiones mi inspiración y motor, a ti mi compañero de vida, mi amado Jony, te agradezco profundamente tu paciencia, tu amor, tu respeto y apoyo, te amo infinitamente.

Adicionalmente, extendiendo mi agradecimiento al Instituto Politécnico Nacional, cuna de mi amor al arte. No obstante, agradezco de manera potencial a la Universidad Nacional Autónoma de México, por permitirme ser parte de su prestigiada comunidad universitaria y al mismo tiempo hacer realidad uno de mis mayores sueños; por formarme profesionalmente, por brindarme grandes oportunidades y por abrirme las puertas para lograr más metas.

Un agradecimiento especial y sincero al Dr. Armando Sánchez Vargas, tutor y asesor de mi tesis, quien ha aumentado mi inspiración profesional y quien, al abrirme las puertas de su equipo de investigación, me ha mostrado un panorama más amplio de aplicación de la ciencia económica. Agradezco además, a todos mis compañeros del cubículo quienes han dejado en mí grandes enseñanzas, especialmente a Guillermo por su dedicación.

Doy un sincero agradecimiento a mis sinodales Mtro. José Manuel Estrada, Dr. Miguel Cervantes y Dr. Ernesto Bravo, por sus correcciones, aportaciones y el tiempo dedicado a mi trabajo profesional. Agradezco también a mi primis Ana Liz y al Dr. Nabor por leerme y darme sus opiniones.

También agradezco a todas esas personitas que me acompañaron durante mi estancia en mi carrera profesional y con quienes compartí grandes momentos; gracias por su amistad y tiempo.

Finalmente, expreso mi agradecimiento al proyecto SEDESOL-CONACYT No. 167752 “La medición del impacto y costo-beneficio de las políticas de desarrollo urbano y ordenamiento territorial frente al cambio climático: Un enfoque microeconómico” por el apoyo financiero que me brindó para concluir este trabajo de tesis.

Índice

Introducción	1
1 Capítulo I: Hechos estilizados de las variables que componen el mecanismo transmisión natural y antropogénico al cambio climático	6
1.1 <i>Bloque demográfico</i>	6
1.2 <i>Bloque energético</i>	11
1.3 <i>Bloque agrícola</i>	16
1.4 <i>Bloque Económico</i>	20
1.5 <i>Bloque de los mecanismos antropogénicos</i>	22
1.6 <i>Bloque de los mecanismos naturales</i>	24
1.7 <i>Análisis de la temperatura</i>	25
1.8 <i>Análisis de la tendencia de la temperatura: determinística vs estocástica</i>	27
1.9 <i>Graficas de dispersión</i>	28
2 Capítulo II: Evidencia empírica y bases científicas del cambio climático actual	33
2.1 <i>Modelos IA y Simulación Monte Carlo en el análisis del Cambio climático</i>	33
2.2 <i>Propuesta como alternativa y complemento para la valoración integral</i>	37
2.3 <i>Marco teórico de la transmisión natural y antropogénica al cambio climático</i> ...	37
2.3.1 <i>Esquema de los mecanismos de transmisión que conducen al cambio climático</i>	38
3 Capítulo III: Metodología econométrica	44
3.1 <i>Modelo econométrico</i>	44
3.1.1 <i>Sistema de ecuaciones simultáneas</i>	44
3.1.2 <i>Autorregresivos con rezagos distribuidos (ARDL)</i>	49
3.1.3 <i>Metodología del VAR estructural</i>	50
4 Capítulo IV: Detección, atribución y cuantificación de los mecanismos del cambio climático	54
4.1 <i>Especificación del modelo econométrico de los mecanismos del cambio climático</i> .	54
4.2 <i>Validación y resultados del modelo econométrico socioeconómico climático</i>	58
4.3 <i>Los forzamientos radiativos como causantes directos de las anomalías en la temperatura</i>	63
4.4 <i>Relación entre los forzamientos radiativos y la temperatura</i>	64
4.5 <i>Respuesta de la temperatura a choques en los forzamientos radiativos</i>	65

4.6	<i>Simulación</i>	66
4.7	<i>Proyecciones futuras de la temperatura</i>	67
4.8	<i>Escenarios</i>	70
	Conclusiones y Recomendaciones	73
	Apéndice	77
	Anexo	83
	Fuente de Datos	89
	Bibliografía	91

Introducción

El cambio climático puede generarse como resultado de alteraciones naturales en el forzamiento del sistema ambiental, sea por variaciones de intensidad de la irradiación solar entrante o sea a cambios en las concentraciones de aerosoles producidos por erupciones volcánicas (IPCC, 2001). Sin embargo existe evidencia que en las últimas décadas dicha variabilidad ha sido fuertemente alterada, principalmente por el componente antropogénico.

De acuerdo con el Grupo intergubernamental de expertos sobre cambio climático (IPCC por sus siglas en inglés), el “cambio climático” denota una alteración identificable en el estado del clima (por ejemplo, mediante análisis estadísticos) a raíz de un cambio en el valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, y que persiste durante un período prolongado, generalmente cifrado en decenios o en períodos más largos. Dicho término, indica todo cambio del clima a lo largo del tiempo, tanto si es consecuencia de la variabilidad natural como si resulta de la actividad humana. En contraste, para la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMCC)¹, el término se refiere únicamente a la alteración del clima atribuida directa o indirectamente a la actividad humana, que perturba la composición de la atmósfera mundial y que viene a sumarse a la variabilidad climática natural observada en períodos de tiempo comparables (IPCC, 2007).

Derivado de ambos, el cambio climático es considerado un fenómeno que se manifiesta en un aumento en la temperatura promedio del planeta, directamente vinculada con el incremento en la concentración de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera. De acuerdo al IPCC, la acentuación de la temperatura promedio mundial desde mediados del siglo XX se debe, en su mayoría y muy probablemente, al incremento registrado en las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI), que provienen de actividades humanas.

¹ Esta Convención se aprobó el 9 de mayo de 1992 en Nueva York y fue firmada por más de 150 países y la Comunidad Europea en la Cumbre para la Tierra, celebrada en Río de Janeiro en 1992. Su objetivo último es “lograr la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel que impida interferencias antropógenas peligrosas en el sistema climático”. Establece obligaciones para todas las Partes. En dicha Convención se fijó el objetivo de lograr que las emisiones de gases de efecto invernadero no controlados por el Protocolo de Montreal de 1990 volvieran a los niveles que tenían en 1990 para el año 2000. La Convención entró en vigor en marzo de 1994.

Una parte considerable del aumento mundial de las concentraciones de bióxido de carbono (CO₂) se produce por el uso y la quema de combustibles de origen fósil (petróleo, gas natural y carbón) que también generan, junto a las actividades agrícolas y la deforestación, gases de metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O) (IPCC, 2007). Este aumento de la temperatura tiene consecuencias en la intensidad y frecuencia de los fenómenos del clima en todo el mundo (calentamiento global, sequías, desastres climáticos, entre otros), lo cual implica pérdidas humanas y grandes costos económicos (Vellinga, et al, 2000; Tol, 2001).

Derivado de la preocupación de los efectos del cambio climático, por iniciativa de la Organización Meteorológica Mundial y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) en 1988 se creó IPCC, grupo científico mundial de carácter apolítico que al evaluar las investigaciones científicas relacionadas, publica informes especiales y documentos técnicos que ayudan a resolver las dudas sobre qué se debe hacer con respecto al cambio climático y qué acciones contribuyen a la mitigación de las emisiones de GEI con el fin de reducir sus efectos.

Consecuentemente, los recientes estudios sobre el clima y sus modelos han incorporado conjuntamente factores naturales y antropogénicos que representan el proceso climático de una forma más completa e integral, lo que permite tomar decisiones de política para evitar un futuro climático adverso para la humanidad.

En estos trabajos la población ha cobrado importancia, ya que juega un papel substancial en el estudio de los mecanismos antrópicos de la modificación del clima y su tendencia permite analizar la relación con el medio ambiente y con las emisiones de GEI (PAI, 2011). Autores como O'Neill et al. (2012) sugieren que deben añadirse otras variables demográficas, tales como la vejez y la urbanización. Por su parte, Cohen (2010) y Jiang y Hardee (2011) proponen introducir aspectos socioeconómicos, culturales y tecnológicos; sin embargo por las limitaciones en la disponibilidad de información socioeconómica (Otto, et al. 2015) resulta difícil considerarlas en la modelación empírica. Por lo anterior, a pesar de los esfuerzos por mejorar las investigaciones sobre el deterioro ambiental se ha encontrado que la mayoría de estudios previos cuentan con limitaciones significativas en sus especificaciones, especialmente cuando se trata de introducir

cuestiones sociales, por lo que puede existir una subestimación de las causas y efectos dentro del sistema climático (Jiang y Hardee, 2011).

El interés por parte de los científicos por cubrir esos huecos ha llevado a crear una coordinación integral con otras disciplinas. El resultado de dicha cooperación se refleja en los modelos informático-matemáticos de evaluación integral (IAMs por sus siglas en inglés), mismos que han funcionado como principal herramienta para el análisis del IPCC, del IEA, y otras instituciones relacionadas con el medio ambiente (Schneider y Lane, 2005). Pese a lo anterior, no se ha logrado un completo entendimiento y participación entre las distintas comunidades de estudio y de modelación (Vuuren et al., 2012). Al respecto, el IPCC ha intentado cerrar la brecha al incorporar en sus investigaciones aspectos multidisciplinarios.

Adicionalmente, existen otras restricciones importantes en la estructura de dichos modelos, como el caso de la incertidumbre. Autores como Anderson, et al., (2012), Liddle (2011), Tyagi (2015) entre otros, han abordado este problema mediante técnicas de análisis de sensibilidad. La herramienta más utilizada es la simulación de Monte Carlo, procedimiento estadístico de solución de problemas que con el uso de variables aleatorias permite aproximar la probabilidad de ciertos resultados. Se auxilia de la realización de varias ejecuciones de prueba, llamadas simulaciones o iteraciones (Ibboston, 2005). No obstante dicha técnica también cuenta con deficiencias que vulneran sus resultados.

Procedente de dichas insuficiencias, en el presente trabajo se ofrece un complemento a los modelos de evaluación integral y una alternativa a la simulación de Montecarlo, ambos utilizados por el IPCC para simulación y pronóstico. En el modelo propuesto se analizan los mecanismos del cambio climático provenientes de dos fuentes originarias, la natural y la antropogénica. Esta última es la que mayor atención adquiere debido a la influencia decisiva que tiene en las perturbaciones del sistema climático.

Para representar lo anterior, se formula un esquema climático que considera aspectos como el crecimiento económico y la población. Se estudia un bloque socioeconómico diseñado para analizar la participación de las actividades económicas, asociadas a la producción y uso de combustibles fósiles, en la generación de altos niveles de emisiones de

GEI. Asimismo, se integra un bloque demográfico, donde la variable principal es la población, considerada por el IPCC (IPCC-2003, 2007) y otros autores, como el principal conductor del aumento en las emisiones de GEI debido a su dinámica y composición. Con base en lo anterior, en la presente investigación se asume que el crecimiento de la población demanda mayor cantidad de bienes y servicios, lo cual se traduce en un incremento en la producción y por ende en las emisiones de gases de efecto invernadero, lo que provoca alteraciones en el sistema climático, a través de la temperatura.

Con base en la evidencia científica existente, el presente trabajo explora, a través de un modelo econométrico climático, cómo la población resulta ser la principal responsable del notable incremento de las emisiones de GEI y analiza su vínculo con el cambio en la temperatura, a la cual hereda su tendencia. Igualmente se considera el efecto directo e indirecto de ésta con el sistema climático para la toma de decisiones. El primero a través del funcionamiento biológico y la dinámica propia del ser humano; el segundo por medio del vínculo que tiene con las actividades económicas.

Para constatar lo anterior y cuantificar las respuestas de la temperatura se hace uso de la metodología de sistemas de ecuaciones simultáneo y del VAR estructural. Se prueba la correcta especificación y se analiza a través de simulación y pronóstico. Adicionalmente se evalúan dos escenarios sobre la población, el alto (que considera 2% constante de crecimiento de la población hasta 2100) y el bajo (con tan solo 0.33% de crecimiento constante hasta 2100), los cuales se ponen en contraste con el pronóstico tendencial, que resulta de resolver el sistema de ecuaciones simultáneo.

El documento se divide en 4 capítulos. En el primero se presenta la evidencia efectiva del actual cambio climático experimentado a nivel global, a través del desenvolvimiento histórico de las variables que probablemente representen el mecanismo de transmisión generador del deterioro ambiental. En el segundo, se hace una revisión de trabajos previos que han evaluado los elementos que componen el cambio climático y se realiza una breve discusión de las debilidades y fortalezas de las metodologías utilizadas para su análisis. En el mismo capítulo se presenta el esquema teórico que sustenta al modelo econométrico que se presentará en el capítulo 4. En el tercero, se desarrolla detalladamente la metodología propuesta para la modelación econométrica del sistema climático. En el cuarto, se estima el

modelo que permite la detección, atribución y cuantificación de los mecanismos del cambio climático. En el mismo apartado se simulan y pronostican las variables que lo componen, lo cual facilita la inferencia estadística. Finalmente, se presentan las conclusiones y las propuestas de política para mitigación de emisiones de GEI.

1 Capítulo I: Hechos estilizados de las variables que componen el mecanismo transmisión natural y antropogénico al cambio climático

De acuerdo al IPCC (2001) y a Smith, et al. (2015) el cambio climático mundial puede observarse, entre otras variables, en los cambios en la temperatura media. A continuación se hace una breve descripción de las variables que podrían explicar el cambio en la temperatura. Los datos utilizados son anuales para el periodo de 1890 a 2013. Las gráficas mostradas de la Figura 1 a la 6 describen el comportamiento de todas las variables del modelo. Para simplificar la revisión, se han agrupado los datos en 6 bloques denominados: Bloque demográfico, energético, agrícola, económico, de los mecanismos antropogénicos y de los mecanismos naturales. Al final se hace un análisis de los cambios en la temperatura.

1.1 Bloque demográfico

El análisis del bloque demográfico (Figura 1) como mecanismo del cambio climático es fundamental debido a su relación positiva con las emisiones de GEI. Este se encuentra integrado por la tasa de natalidad, la tasa de mortalidad y la población. En la Figura 1a se presenta la tasa de natalidad, que por definición indica la cantidad de nacidos vivos en el año, por cada 1000 habitantes, estimada a mitad de año (Banco Mundial, 2015). A simple vista, la tasa de natalidad parece tener un cambio en la pendiente a partir de 1950. Dicha variable se vio afectada por un cambio estructural permanente en dicho periodo que desde entonces ha provocado su disminución, es decir que el número de nacimientos cada vez es menor en relación a la población existente.

Adicionalmente la gráfica de la natalidad muestra cambios en la varianza, la mayoría debidos a conflictos bélicos, crisis económicas y/o políticas de fertilidad con efectos temporales. En la gráfica se observa que durante la Primera Guerra Mundial (1914 a 1918) la tasa de natalidad mundial se redujo debido a que las correspondientes tasas de los países como Francia, Alemania, Bélgica, el Reino Unido e Italia se redujeron 50% (Vandenbroucke, 2012). Posteriormente con la gran depresión económica de los años treinta, la natalidad volvió a disminuir; efecto que reincidió pero en menor medida durante la segunda guerra mundial (Hedrich, 1944). Después del segundo gran conflicto bélico mundial se impulsó la natalidad generando el fenómeno conocido como *baby boom*, el cual

es definido como el gran incremento en los nacimientos desde el año 1946 hasta 1964 debido a la disminución de la oferta de trabajo femenino (Radner, 1998; Flaim, 1990).

Ante la preocupación de la posible aplicación de la teoría Malthusiana² de la población en el contexto mundial, surgen en la década de los años setenta las Conferencias de Bucarest (1974), de México (1984) y de El Cairo (1994) (Naciones Unidas, 2001) cuya finalidad era avanzar en la implementación de políticas de fecundidad más globales para el desarrollo sostenible y la lucha contra la pobreza. Se generaron estrategias para mejorar la condición de la mujer, su igualdad y su empoderamiento, como clave de los procesos de desarrollo, plasmada en la asunción de los conceptos de derechos y salud reproductiva. Todo lo anterior justifica el sentido de la tendencia marcadamente negativa.

Al igual que la natalidad, la mortalidad ha sufrido fuertes cambios dentro del periodo de estudio. En la gráfica que le corresponde (1b), se pueden distinguir dos grandes choques que marcan el comportamiento de la serie. Por un lado el correspondiente al saldo de la primera guerra mundial (1914-1919) y a la pandemia de influenza de 1918. Esta última considerada la mayor catástrofe sanitaria del siglo XX, ya que produjo en menos de un año la pérdida de entre 25 y 50 millones de personas (González, 2013).

El segundo cambio abarca un periodo más amplio, de 1933 a 1949. El cual contempla las consecuencias de la crisis financiera de los años treinta y la Segunda Guerra Mundial. La anterior, desde sus inicios, estuvo marcada por un incremento generalizado del número de muertos, y produjo la aparición de epidemias de tifus, disentería, malaria, cólera y otras infecciones parasitarias. Todo esto impulsó que a partir de 1945 y durante la Guerra Fría se registraran mejoras en la tecnología médica y se fomentaran las instituciones sanitarias y centros de salud, lo cual produjo una disminución de la tasa de mortandad (Steck, 2014).

Posteriormente la transferencia de tecnología de los países más desarrollados a los más pobres ha jugado un papel fundamental en la disminución en la tasa de crecimiento de la mortalidad. No obstante, en la década de los años setenta, se desembocó una crisis

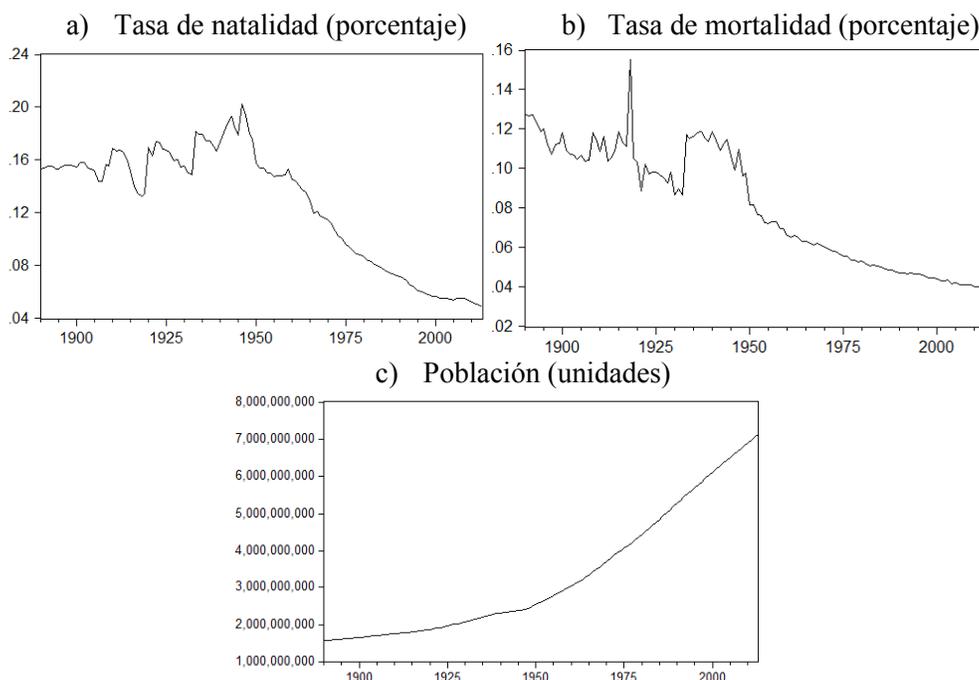
² Malthus propone el principio de que las poblaciones humanas crecen exponencialmente (es decir, se duplican con cada ciclo) mientras que la producción de alimentos crece a una razón aritmética (es decir, mediante la adición repetida de un incremento uniforme en cada intervalo de tiempo uniforme). De este modo, mientras era probable que en una serie de intervalos de veinticinco años la producción de alimentos aumentara en la progresión aritmética 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, etc., la población podía aumentar en la progresión geométrica 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, etc. Este argumento del aumento aritmético de los alimentos con un crecimiento geométrico simultáneo de la población humana predecía un futuro en el que las personas no tendrían recursos para sobrevivir. Para evitar tal catástrofe, Malthus sugirió con ahínco que se implementaran controles en el crecimiento demográfico (AAG, 2015).

alimentaría que provocó un aumento en la tasa de mortalidad a cinco millones de personas (FAO, 2009). A partir de la década de los años setenta ha permanecido una disminución en el número de muertes de la población general.

Dicho progreso se ha manifestado en la mayoría de las regiones con excepciones como Europa del Este y el Caribe. La mortalidad general en Europa oriental aumentó de 901 muertes por cada 100.000 habitantes en 1990 a 1.434 muertes por cada 100.000 habitantes en el año 2010 con un aumento significativo 1990-2000 principalmente en la población los hombres. A pesar de la disminución en el número de muertes en la mayoría de las regiones, la tasa de mortalidad global aumentó en el periodo que va de 1990 a 2010.

En el año 1994 se creó dentro de la ONU la Conferencia Internacional de Población y Desarrollo, cuyo objetivo era disminuir la tasa de mortalidad a través de un plan de acción en defensa de los derechos humanos y mejores condiciones de salud (United Nations, 2014). Dicho plan hasta hoy ha permitido que el número de muertes respecto a la población sea cada vez menor. Este comportamiento justifica la tendencia negativa que registra la variable.

Figura1. Mundial: *Bloque demográfico, 1890-2013*



Fuente: Elaboración propia con datos de The Human Mortality Database, our world in data y Banco Mundial

La población es resultado de la conjugación de las dos variables anteriores (si se resta la tasa bruta de mortalidad a la tasa bruta de natalidad resulta la tasa de incremento natural, que es igual a la tasa de crecimiento de la población (Banco Mundial, 2015), y su análisis es de gran relevancia en el estudio del cambio climático por ser la base de los factores correspondientes al componente antropogénico. Por lo anterior, su tendencia permite revisar el mecanismo completo de la relación existente con las emisiones de GEI y con el cambio climático.

El comportamiento de la población ha variado con el tiempo. Desde la Revolución Industrial hasta finales de la Segunda Guerra Mundial la tasa de crecimiento de la natalidad y la mortalidad eran altas, lo cual explica el lento crecimiento de la población de esa época, no obstante después de la segunda guerra mundial la población tuvo un marcado aumento en su tasa de crecimiento que se tradujo en un cambio de pendiente (Steck, 2014). Lutz y Qiang (2002) afirman que el siglo XX se caracterizó por un gran crecimiento de la población humana sin precedentes, al pasar de 1.6 miles de millones de personas a comienzos del siglo hasta llegar a 6.1 a finales de éste. Dicho comportamiento se puede observar en la gráfica 1c.

La transición del crecimiento de la población es la siguiente: De acuerdo con Cook (1962) en la época de la revolución agrícola (hace 8000 años aproximadamente) la población total mundial era cercana a 250 000 habitantes. Permaneció en ese nivel hasta 1800 cuando la población alcanzó a ser de mil millones. Para 1930 ya éramos dos mil millones. En 1960 éramos cerca de tres mil millones de habitantes en el planeta. Los cuatro miles de millones se lograron entre 1961 y 1975, los cinco miles de millones en el año 1987 y los seis a finales de los años noventa. Las tasas de crecimiento indican que el periodo donde se registró las mayor tasa de crecimiento (de 2.1% por año) es la década de los años sesenta, pero ésta ha ido disminuyendo hasta registrarse en el año 2000 una tasa de 1.35% (Lutz y Qiang, 2002).

Con base a Steck (2014) lo sucedido se debe a lo siguiente: los avances institucionales y técnicos, así como el surgimiento de la higiene y la medicina moderna de finales de la segunda guerra mundial llevaron a tasas de mortalidad más bajas en todo el mundo. Pero debido a que las tasas de natalidad se mantuvieron altas por el famoso

fenómeno baby boom, las tasas de crecimiento de la población se dispararon, una consecuencia no deseada de la mitigación de la penuria humana en la era moderna.

Después de un periodo de disminución de tasas de mortalidad, y a través de políticas de fomento a la salud reproductiva y planeación familiar, las familias de las naciones desarrolladas se inclinaron a limitar drásticamente la procreación. Como resultado, las tasas de fertilidad, lo que provocó un crecimiento demográfico más lento (Steck, 2014).

Lo anterior describe a grandes rasgos la llamada transición demográfica, la cual establece que en la transformación de una sociedad hacia la modernidad implica un cambio en su demografía: de caracterizarse por tener tasas altas de natalidad y mortalidad en la época pre moderna, en su periodo postmoderno experimenta tasas más bajas (Kirk, 1996).

La teoría convencional predice que, como los niveles de vida suben y las condiciones de salud mejoran, las tasas de mortalidad disminuyen primero y luego, más tarde, bajan las tasas de fertilidad. La teoría de la transición demográfica se ha desarrollado como una generalización de la secuencia típica de eventos en los países más desarrollados, donde las tasas de mortalidad disminuyeron comparativamente comenzando gradualmente a finales de 1700 y luego más rápidamente a finales de 1800; después de un retraso de 75 a 100 años, las tasas de fecundidad se redujo también.

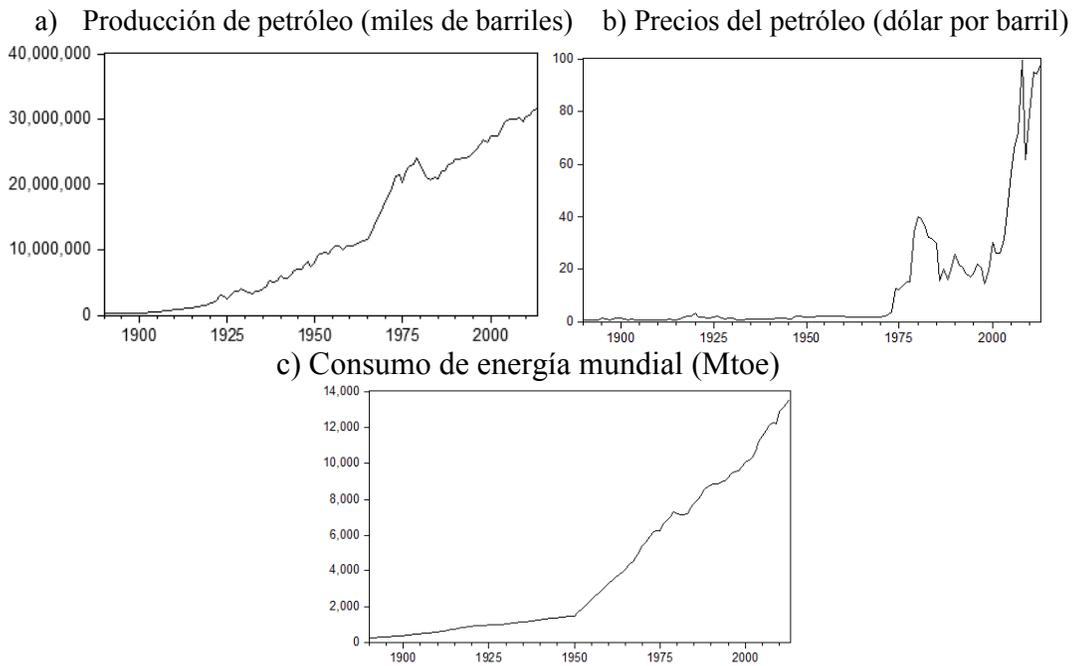
Como se mencionó con anterioridad, la tasa de crecimiento de la población ha disminuido gradualmente en los últimos años. Las razones de menores tasas de fecundidad son variadas, pero la mayoría son en relación con los países en desarrollo, el crecimiento económico y el desarrollo humano. Actualmente las parejas han optado por tener familias más pequeñas. El desarrollo humano incentiva a elevar el nivel de estudios de los hijos, cuestión importante porque aumenta su nivel de conocimientos e incentiva a reducir el tamaño de las futuras familias. También al generar capital humano más mujeres acceden a oportunidades de trabajar fuera del hogar, por lo que deciden disminuir el número de hijos. El crecimiento demográfico es aún más lento en los países desarrollados (World Bank, 2004).

La sección económica comprende 3 bloques: el energético, el agrícola y el económico. Se ha hecho esta distribución para esquematizar la información.

1.2 Bloque energético

Para empezar, en el bloque energético se describe el comportamiento de las variables de producción y precios del petróleo, y del consumo de energía mundial. Las tres se pueden observar en la Figura 2.

Figura 2. Mundial: *Bloque energético 1890-2013*



Fuente: Elaboración propia con datos de BP, census, unctad, Petrobras

El petróleo fue tomando relevancia en los procesos de producción a partir que la revolución industrial fue madurando. Su destacado papel en la economía mundial no fue inmediato, sino paulatino acompañado del desarrollo en ciencia y tecnología que incrementó su uso y permitió la exploración y explotación de los yacimientos petroleros, para poder ser transformados.

El periodo que abarca la última década del siglo XIX estuvo caracterizado por la evolución de la industria. En este siglo el valor del petróleo se debía principalmente a su utilidad para la fabricación de alumbrado (Hamilton, 2011). En 1890 la producción de petróleo de Pennsylvania y Nueva York era 5 veces más de lo que había sido en 1870. La producción en otros estados había crecido hasta representar el 38% del total de Estados Unidos; Rusia produjo casi tanto petróleo como los Estados Unidos. Estos factores y la

recesión de 1890-1891 habían traído de vuelta el precio del crudo a 56 ¢ / barril para 1892. No obstante, la producción anual de Pennsylvania se redujo en 14 millones de barriles entre 1891 y 1894, incluso con las técnicas de recuperación secundaria jamás regresó a los niveles observados en 1891 (Hamilton, 2011). De acuerdo con Williamson y Daum (1959), en 1895 se registró un aumento importante en los precios del petróleo debido a la disminución de la producción en Pennsylvania y a la pérdida de acceso a la producción rusa por la epidemia de cólera en Bakú.

Hacia comienzos del siglo XX y en lo consiguiente se incrementaron los usos del petróleo en los sectores comercial, industrial y energético. Se desarrolló el ferrocarril y posteriormente los autos de motor los cuales demandaban mayores cantidades de combustibles derivados del petróleo. En 1920 se vivió la primera crisis del petróleo con la hambruna de gasolina de la costa del Golfo que coincidió con la contracción económica que EEUU había experimentado en dicha época. La producción de Texas, Oklahoma y California pronto cubren la escasez y lleva a la caída de los precios en 40% entre 1920 y 1926 (Hamilton, 2011).

La disminución de la demanda asociada con advenimiento de la Gran Depresión en 1929 magnificó el impacto del precio de los nuevos descubrimientos como el campo de Texas que comenzó su producción en 1930. En 1931, el precio del petróleo había caído un adicional de 66% de su valor en 1926.

De acuerdo con Hamilton (2011) el final de la Segunda Guerra Mundial marcó una aguda aceleración en la transición a la era de la automoción. La demanda estadounidense de productos derivados del petróleo aumentó 12% entre 1945 y 1947. El precio del crudo se incrementó 80% en estos dos años, pero no fue suficiente para evitar la escasez. Por lo anterior, Standard Oil de Indiana y Phillips Petroleum Company anunciaron planes en junio de 1947 a racionar las asignaciones de gasolina a los distribuidores, y en el otoño hubo informes de escasez en Michigan, Ohio, Nueva Jersey, y Alabama (Hamilton, 2011).

En 1950 se desencadenó la guerra de Corea que provocó el congelamiento de los precios. Para estabilizarlos se nacionalizó la industria petrolera Iraní en 1951. Pero los que estaban en la oposición boicotearon la producción reduciéndola. Lo anterior sumado a la

huelga de EEUU que llevó al paro de las refinerías desembocó en una recesión y mayor escasez. Posteriormente y con la fundación de la Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP), la producción de petróleo y por lo tanto los precios sufrieron grandes cambios que se consideran estructurales (Hamilton, 2011).

Los precios del petróleo varían en respuesta a cambios en la demanda y en la oferta tanto de los países miembros como los no miembros de la OPEP. En la gráfica 2e se observa su comportamiento dentro del periodo de estudio. En 1973 se aprecia un aumento de los precios debido a la Guerra Árabe Israelí. Conforme al Departamento de Estado de EUA (Burr, 2013) durante la guerra los miembros árabes de la OPEP impusieron un embargo contra los Estados Unidos en represalia por la decisión de éste para reabastecer el ejército israelí y ganar influencia en la paz de las negociaciones de posguerra (Yorba, 2013).

La OPEP también extendió el embargo a otros países que apoyaron a Israel incluyendo los Países Bajos, Portugal y Sudáfrica. El embargo prohibió las exportaciones de petróleo a las naciones específicas e introdujo los recortes en la producción de petróleo causando conmoción económica internacional. De 1974 a 1978 el precio mundial del crudo se mantuvo estable dentro de un rango de 12 a 15 dólares por barril. Sin embargo en 1979 y 1980 los acontecimientos en Irán e Irak llevaron a otra ronda de aumentos en el precio del petróleo. Como consecuencia de la revolución iraní (1979) se registró una pérdida por día de la producción de petróleo de 2.0 hasta 2.5 millones de barriles entre noviembre de 1978 y junio de 1979, hasta casi parar la producción.

La revolución iraní fue la causa inmediata del precio más alto en la historia posterior a la Segunda Guerra Mundial. El impacto de la revolución sobre los precios habría sido limitado y de duración relativamente corta si no hubiera sido por los acontecimientos posteriores. En septiembre de 1980, Irán ya debilitado por la revolución fue invadido por Irak. En noviembre, la producción combinada de ambos países fue de sólo un millón de barriles por día. Como consecuencia, la producción de crudo a nivel mundial fue 10 por ciento menor que en 1979 (WTRG Economics, 2015). El periodo de 1981 a 1986 es conocido como el colapso de los precios.

Todo lo anterior llevó a un aumento de la producción de los países no miembros de la OPEP de hasta 6 millones de barriles por día. Según la EIA (2005), entre 1975 y 1985 los países externos a la OPEP aumentaron su participación en la producción de petróleo mundial total del 48% al 71%, con la mayor parte del incremento proveniente de México, el Mar del Norte y la Unión Soviética. El aumento de la oferta fuera de la OPEP tuvo dos efectos principales. El primero es que los países fuera de la OPEP estaban estableciendo sus propios precios que eran más sensibles a las condiciones del mercado y, por tanto, más competitivos. En segundo lugar, el número de productores de petróleo crudo aumentó dramáticamente (Fattouh, 2007).

De 1982 a 1985, la OPEP intentó establecer cuotas de producción lo suficientemente bajas como para estabilizar los precios. No obstante, dichos intentos no fueron exitosos ya que varios miembros de la OPEP producían más allá de sus cuotas. Arabia Saudita voluntariamente cerró 3/4 de su producción entre 1981 y 1985, pero no fue suficiente para evitar una disminución del 25% en el precio nominal del petróleo y un mayor descenso en el precio real (Hamilton, 2011). De acuerdo con Fattouh (2007), el resultado de estas presiones hacia la OPEP se vio en su propia cuota de mercado de producción mundial de petróleo la cual pasó del 52% en 1973 a menos de 30% en 1985 siendo Arabia Saudita el más afectado.

En una tentativa de restaurar la cuota de mercado del país, Arabia Saudita adoptó el sistema de precios netback en 1986 (Mabro, 1986). Los saudíes volvieron a su nivel de producción al hacer que el precio del petróleo se derrumbara de 27 dólares / barril en 1985 a 12 dólares / barril en el punto más bajo en el año 1986. A pesar de una evolución favorable desde la perspectiva de los consumidores de petróleo, esto representó una "crisis del petróleo" para los productores (Hamilton, 2011). A partir de la crisis de 1986 nace el régimen de precios del petróleo relacionado con el mercado³. La adopción de dicho sistema de precios relacionados con el mercado rompió con sistema de precios del petróleo

³ Dicho régimen se basa en la fijación de precios de fórmula, en la que el precio de una cierta variedad de petróleo crudo se establece como un diferencial a un determinado marcador o precio de referencia. El surgimiento y la expansión del mercado de petróleo crudo permitieron el desarrollo de los precios al contado de los marcadores de crudo, como West Texas Intermediate (WTI) spot (inicialmente Alaska North Slope), Brent y Dubai. La liquidez decreciente de los crudos de referencia, sin embargo, ha planteado dudas sobre su capacidad de generar un precio marcador que refleje con exactitud el precio marginal del barril de petróleo.

administrado por la OPEP que había dominado el mercado del petróleo de la década de 1950 hasta mediados de la década de 1980 (Fattouh, 2010).

De 1990 a 1991 estalló la Primera Guerra del Golfo Pérsico. Para 1990, la producción iraquí había vuelto a sus niveles de finales de 1970, pero volvió a caer cuando decidió invadir Kuwait en agosto de ese mismo año. Ambos países representaron casi el 9% de la producción mundial, y comenzó la preocupación de que el conflicto se extendiera a Arabia Saudita. Aunque no había un exceso de demanda de gasolina en Estados Unidos, el precio del crudo se duplicó en el lapso de unos pocos meses. El aumento de precios resultó ser de corta duración (Hamilton, 2011).

Posteriormente para liberar a Kuwait, los precios del crudo entraron en un período de declive constante. De 1990 a 1997, el consumo mundial de petróleo aumentó 6,2 millones de barriles por día. En 1998, el consumo de petróleo de Asia Pacífico se redujo por primera vez desde 1982. La combinación de un menor consumo y una mayor producción de la OPEP hicieron que los precios cayeran en una espiral descendente. En respuesta, la OPEP redujo las cuotas de 1.25 millones de barriles por día en abril y 1.33 millones en julio. El precio continuó a lo largo de diciembre de 1998.

Los precios comenzaron a recuperarse a principios de 1999. En abril, la OPEP redujo la producción por otros 1.72 millones de barriles. Entre principios de 1998 y mediados de 1999 la producción de la OPEP se redujo en cerca de tres millones de barriles por día. Los cortes fueron suficientes para mover los precios por encima de \$25 por barril (WTRG Economics, 2015). Continuó el crecimiento de los precios hasta noviembre de 2000 después de otro aumento de la cuota de 500 000.

El crecimiento económico mundial en 2004 y 2005 fue impresionante. El FMI estima que el PIB mundial creció a una tasa promedio anual de 4.7% (Hamilton, 2011). Estas fuertes presiones de la demanda fueron la razón para el aumento constante del precio del petróleo durante este período. Sin embargo, la producción no creció después de 2005. A diferencia de muchas otras crisis petroleras, no había ningún evento geopolítico asociado con éste. La inestabilidad permanente en lugares como Irak y Nigeria así como que los campos de petróleo que habían ayudado a sostener anteriores ganancias de producción

alcanzaron la madurez con tasas de declive relativamente rápidos, fueron factores contribuyentes (Hamilton, 2011).

En noviembre de 2006 y en febrero de 2007 la OPEP recortó la producción por el creciente nivel de inventarios de los países miembros de la OCDE. En 2008, después del comienzo de la recesión en Estados Unidos, el precio del petróleo siguió aumentando. La capacidad de reserva descendió por debajo de un millón de barriles por día y la especulación en el mercado de futuros del petróleo crudo fue excepcionalmente fuerte. Por lo anterior y adicionado a la caída de la demanda de petróleo el precio cayó a lo largo del resto del año al menos de 40 dólares en diciembre.

Dicha situación continuó en 2009 y 2010 hasta aumentar los precios en 2011 como consecuencia de la pérdida de las exportaciones libias por la guerra civil libia. Se mantuvieron en su nivel hasta que a finales del 2014 los precios del crudo tuvieron una fuerte caída debido a un incremento en la producción mundial. Después de alcanzar picos mensuales de 112 dólares/barril (bbl) y \$ 105 / bbl en junio, el crudo Brent y puntos de referencia West Texas Intermediate (WTI) cayeron a \$ 62 / bbl y \$ 59 / bbl en diciembre, respectivamente. La producción estimada creció un 1,8 millones de bbl / d para totalizar 92,0 millones de bbl / d en el 2014, concentrada principalmente en EEUU (EIA, 2015).

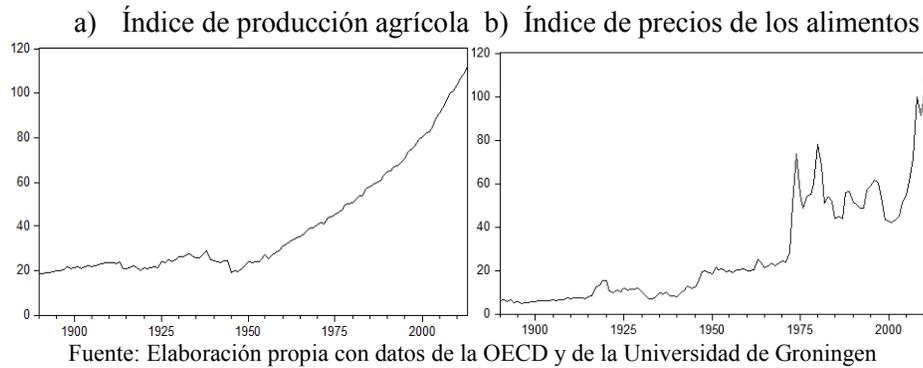
1.3 Bloque agrícola

Análogo a la producción y precios del petróleo, los referentes a los alimentos también han experimentado procesos que han marcado su desenvolvimiento. Sobre estos últimos, Bakhat y Würzburg (2013) mencionan que muchos de los movimientos registrados en esta variable se deben al mecanismo de transmisión existente con los precios del petróleo aunado a los movimientos del mercado derivados de la producción (Ver Figura 3).

El primer evento importante registrado en el comportamiento regular de los precios se debe a la Primera Guerra Mundial (1914-1919) que al igual que con los precios del petróleo los referentes a los alimentos aumentaron, resultado del mecanismo de transmisión de los primeros sobre los segundos y por la paralización de la producción de éstos en gran parte de Europa y Asia. Inmediatamente después, en 1916 se registró mal tiempo meteorológico para las cosechas (huracanes, tormentas tropicales y tormentas extra tropicales) lo que

incrementó la escasez de alimentos dando como resultado un nuevo incremento en el nivel de precios.

Figura 3. Mundial: *Bloque agrícola, 1890-2013 (porcentaje)*



La Segunda Guerra Mundial también tuvo efectos negativos en la agricultura. De acuerdo con los registros de la FAO en “El Estado de la Agricultura y la Alimentación”, la producción agrícola mundial al final de la guerra fue 5 por ciento (15 por ciento en términos per cápita) menor de los niveles anteriores a la guerra. La agricultura sufrió una devastación masiva por la guerra en toda Europa, en la URSS, en grandes zonas de Asia y el Pacífico y en África del Norte. Las caídas en la producción agrícola de esas regiones aunadas a la incapacidad generalizada para financiar las importaciones de alimentos dieron lugar a su gran escasez, incluso cuando cesaron las hostilidades. Lo anterior se agravó en 1946 y 1947 cuando intensas sequías invadieron a la Unión Soviética, África del Norte y grandes zonas del Lejano Oriente. La escasez también era aguda en el sector piscícola, que se vio afectado por la pérdida y confiscación de las embarcaciones de pesca y equipos. Esto elevó el nivel de precios de los bienes alimentarios (FAO, 2000).

En contraste, los suministros de alimentos eran abundantes en varios países productores que no estuvieron directamente involucrados en el conflicto bélico, tales como Canadá, Estados Unidos, Australia y Argentina. Al igual que en la Primera Guerra Mundial, éstos asumieron el papel de proveedores de alimentos para sus aliados e hicieron un esfuerzo especial para estimular la producción. De hecho, sobre todo para América del Norte, los años de la guerra fueron un período de expansión y prosperidad (FAO, 2000).

La producción agrícola en esta región aumentó en un tercio en comparación con los niveles anteriores a la guerra, y las exportaciones netas de cereales aumentaron cerca de 5 millones de toneladas en 1938 a un promedio anual de 17,5 millones de toneladas en 1946-1948. Las importaciones de cereales anuales netas de Europa subieron de 9,5 millones a 14 millones de toneladas durante el mismo período (FAO 1960, 2000).

En 1948 la FAO preocupada por el desencadenamiento de una crisis económica mundial por problemas regionales estructurales, advirtió la existencia paradójica de un exceso de oferta en algunas partes del mundo y fuerte escasez en otros lugares. El crecimiento impulsado por la industria se convirtió en el paradigma de desarrollo ortodoxo durante la década de 1950. Dicha contradicción hizo que los precios se mantuvieran constantes.

La autosuficiencia alimentaria se convirtió en una característica estándar de la mayoría de los planes nacionales de desarrollo. A partir de la finalización de la guerra hasta 1970 los precios de los alimentos permanecieron relativamente constantes gracias a políticas de pobreza y nutrición, acuerdos comerciales, y a avances tecnológicos en el campo agrícola para hacer frente a problemas de hambre, pobreza y desarrollo (FAO, 2000).

En 1972, el mal tiempo golpeó cultivos en todo el mundo y la producción mundial de alimentos se redujo por primera vez en 20 años, hasta 33 millones de toneladas en un momento en que el mundo necesitaba un monto extra de 24 millones de toneladas para satisfacer las necesidades de una población en rápido crecimiento.

Al año siguiente, un nuevo choque de oferta llevó a un incremento exorbitante de los precios agrícolas, los precios del petróleo se cuadruplicaron por la Guerra Árabe-Israelí. Lo anterior representó una fuerte amenaza para la revolución verde. En 1974, la situación no mejoró porque el mal tiempo afectó las nuevas cosechas. Al final de ese año, las reservas mundiales de cereales habían alcanzado un mínimo de 22 años, igual a un suministro suficiente para unos 26 días, en comparación con 95 días en 1961. Tras alcanzar un máximo en 1974, los precios de la mayoría de los alimentos se mantuvieron altos hasta la década de 1980 (FAO, 2009).

La segunda crisis del petróleo de 1979, a diferencia de la de cinco años antes, llevó a muchos países desarrollados a reforzar su política económica, lo que provocó una grave desaceleración de su actividad productiva. Esta desaceleración causó una reducción en la demanda de importaciones de esos países, que coincidió con una fuerte caída de los precios internacionales de los productos básicos.

El periodo de 1980 estuvo dominado en gran parte por la prolongada recesión económica que afectó a muchos países, desarrollados y en desarrollo con efectos negativos en su desenvolvimiento general y agrícola. La crisis surgió tras un cambio repentino e inesperado en el entorno económico internacional, anteriormente caracterizado por la abundante liquidez en los mercados financieros y las políticas fiscales y monetarias expansivas en muchos países en desarrollo.

La década de 1990 mostró un patrón irregular de la actividad económica entre los principales países industrializados. Para muchos países en desarrollo la década de 1990 fue un período de recuperación. Su crecimiento global del PIB promedió más de 5 por ciento durante el período 1991-1999 y superó 6 por ciento durante cinco años consecutivos (1992-1996) a pesar de las condiciones de recesión mundial que prevalecen durante la primera parte de la década y oscilaciones pronunciadas en las tasas de crecimiento. Estos fueron causados por conflictos, desastres climáticos inusualmente severos (como el conocido fenómeno de El Niño⁴, entre otras) y una serie de shocks financieros.

El entorno general para el crecimiento y la seguridad alimentaria fue mejorado por un movimiento hacia regímenes democráticos, en particular en África, y la consolidación de las reformas económicas que comenzaron a dar resultados esperados. A principios de 2000 los precios de los alimentos registraron un mínimo histórico. Sin embargo fueron aumentando lentamente de 2003-2006. Las razones del dicho comportamiento se atribuye a choques climáticos registrados en Australia; a políticas promotoras de uso de biocombustibles que aumentaron la demanda de aceites de maíz y otros vegetales; la depreciación del dólar americano; crecimiento económico de los países desarrollados que

⁴ El fenómeno del Niño ó la Oscilación del Sur (ENOS), como es conocida, es un patrón oceánico-atmosférico de variabilidad natural. Este fenómeno se presenta a lo largo del Pacífico Ecuatorial y se caracteriza, principalmente, por la variabilidad de la temperatura superficial del océano, la circulación de los vientos alisios y la profundidad de la termoclina o capa de mezcla (Sheinbaum, 2003). El fenómeno no se presenta de manera periódica, sino que lo hace de manera irregular, con ciclos que se presentan cada 2 a 7 años. El fenómeno se puede presentar en tres fases muy distintas entre sí: Neutral, fría o "La Niña", y cálida o "El Niño" (CONAGUA, 2015).

incrementaron la demanda de productos básicos; presión en los precios de los productos básicos por el aumento de los precios del petróleo; una lenta producción de cereales; y especulación en los precios de los commodities en los mercados financieros (FAO, 2011, World Bank, 2014).

En el año 2006, los precios internacionales de los productos básicos agrícolas se comenzaron a elevar a niveles no experimentados en casi tres décadas. Los precios del maíz fueron los más afectados aumentando en 70% en tan solo unos meses. Los precios del trigo y de la soja también subieron a niveles récord durante este tiempo. Para 2008 los precios del arroz se habían más que duplicado (Bradsher, 2008). El índice de precios de cereales alcanzó un pico de 2,8 veces mayor que en 2000; en julio de 2010, se mantuvo 1,9 veces mayor que en 2000 (FAO, 2010).

Los aumentos repentinos tomaron a muchos por sorpresa, y condujeron a un aumento en la preocupación sobre la seguridad alimentaria actual y futura. Cuando los precios disminuyeron en el segundo semestre de 2008, no había alguna esperanza de que los precios se estabilizaran. En 2011 los precios mundiales de los alimentos alcanzaron un nuevo récord histórico, según revela la última edición del Índice de la FAO para los precios de los alimentos. El Índice tuvo un promedio de 231 puntos en enero. Se trata del nivel más alto (tanto a nivel real como nominal) desde que la FAO comenzó la medición de los precios alimentarios en 1990. Los precios de todos los grupos de productos básicos controlados registraron fuertes subidas en enero, excepto para la carne, que permanecieron invariables (FAO, 2011).

1.4 Bloque Económico

De la mano a los bloques previos, se encuentra el bloque industrial que se puede observar en la Figura 4. El siglo XIX estuvo marcado por el incremento en el desarrollo tecnológico iniciado en el siglo XVIII con la primera revolución industrial. No obstante la industria tomó revuelo en los países más desarrollados hasta la segunda revolución cuyos resultados se plasmaron en los métodos de producción en masa característicos del siglo XX, intensivos en el uso de combustibles fósiles. En 1890, Estados Unidos tenía, por mucho, la economía más productiva del mundo.

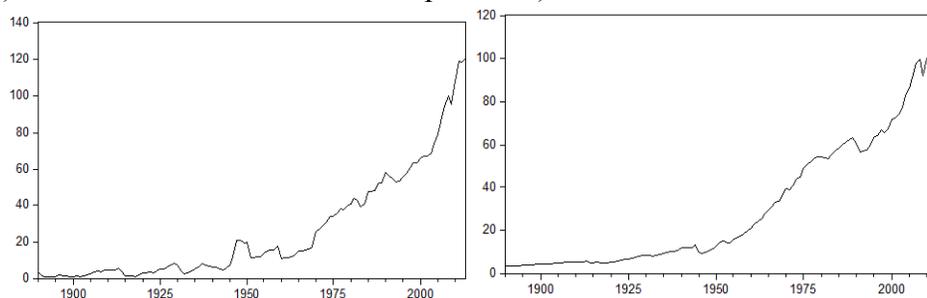
La industria norteamericana produjo dos veces más que su competidor más cercano - Gran Bretaña. En 1913 Henry Ford introdujo la línea de montaje en la fabricación de su modelo T de Ford. La línea de montaje aumentó en gran medida la velocidad de fabricación y pronto fue utilizado en muchas industrias (Hacket, 1992).

Por otra parte desde mediados de 1890 se había creado un sentimiento ambicioso entre los países de Europa debido a la lucha por el imperio (Digital history, 2012). Lo anterior incentivó la producción de armas para la defensa territorial la cual se intensificó con la primera guerra mundial. En 1914, sólo un pequeño número de industrias en las naciones más desarrolladas del mundo había adoptado métodos de producción y organización avanzados.

Sin embargo en gran parte del mundo aún no se había iniciado una primera revolución industrial. Rusia, Canadá, Italia y Japón estaban empezando a industrializarse. Sólo Gran Bretaña, Estados Unidos, Alemania, Francia, y algunas partes de los países escandinavos se había completado con éxito una revolución industrial. La mayor parte de la población mundial todavía trabajaba en las economías agrícolas primitivas. China, India y España no comenzaron a industrializar hasta bien entrado el siglo XX.

Figura 4. Mundial: *Bloque económico, 1890-2013 (porcentaje)*

a) Índice de formación bruta de capital b) Índice de Producción Industrial



Fuente: Elaboración propia con datos de la Banco Mundial y de la Universidad de Groningen

En 1929 surgió en EEUU la gran recesión que continuó hasta principios de 1933. La producción real y los precios cayeron precipitadamente. Entre el pico y el punto más bajo de la recesión, la producción industrial en Estados Unidos se redujo 47 por ciento y el PIB real cayó un 30 por ciento. Aunque existe cierto debate acerca de la fiabilidad de las estadísticas, es ampliamente aceptado que la tasa de desempleo superó el 20 por ciento en su punto más alto (Romer, 2013). Después de la crisis financiera de los años treinta, un

gran interés por parte de los economistas ingleses y estadounidenses llevaron a diseñar diferentes teorías de desarrollo. Durante ésta época se observa estabilidad y crecimiento general de la producción industrial.

Durante la crisis de los años ochenta se redujo el nivel de producción industrial. El PIB real se redujo a sólo 2 por ciento y la tasa de desempleo alcanzó su punto máximo en menos de 10 por ciento. En la década siguiente la producción recuperó sus niveles en los países en vías de desarrollo mientras que sin lugar a duda la revolución industrial representó un hito en la historia de la humanidad, en el desarrollo económico y en los cambios experimentados en el medio ambiente.

1.5 Bloque de los mecanismos antropogénicos

Las actividades humanas en general generan grandes cantidades de emisiones de gases de efecto invernadero. Las influencias antropogénicas en el calentamiento y enfriamiento del clima se conocen mejor desde el Tercer Informe de Evaluación del IPCC (TIE). Esto provoca una muy alta confianza en que el efecto de las actividades humanas a partir de 1750 haya tenido un forzamiento positivo neto de $+1,6$ [$+0,6$ a $+2,4$] Wm^{-2} (IPCC, 2013).⁵ Desde el comienzo de la era industrial, las actividades humanas han modificado la naturaleza de la biosfera, sobre todo mediante cambios en el uso de las tierras agrícolas, los pastizales y los bosques (IPCC, 2013), por el uso desmedido de combustibles fósiles, y por el acrecentamiento de la población en general, que demanda mayor producción para cubrir sus necesidades.

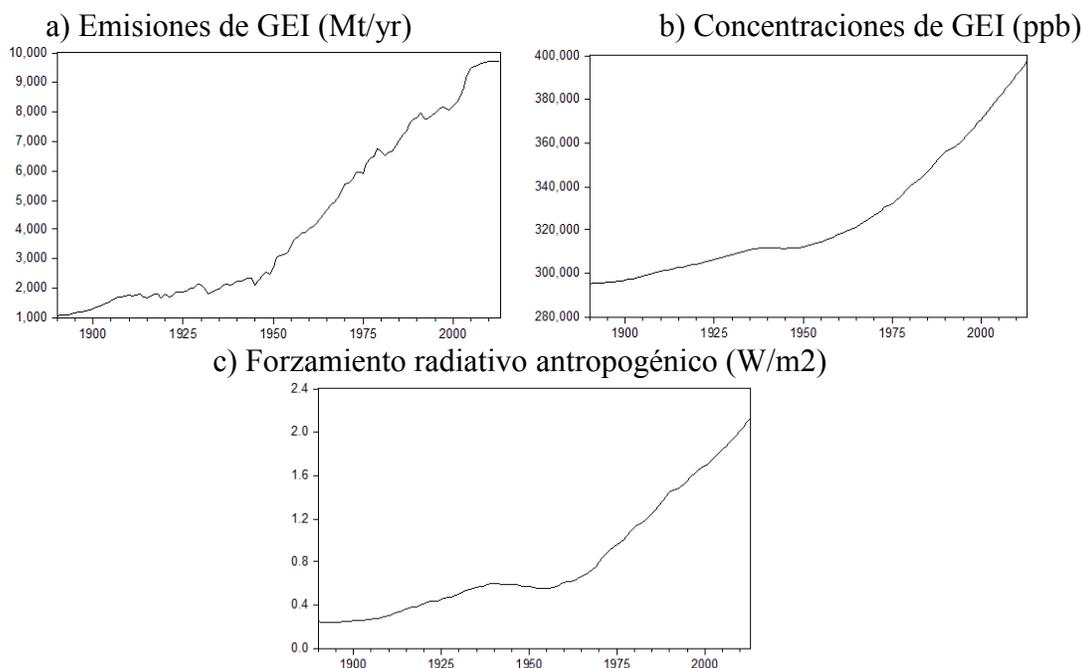
Como el margen del cálculo es de $+0,6$ a $+2,4$ W m^{-2} , existe una muy alta probabilidad en que el forzamiento radiativo positivo neto del sistema climático se deba a la actividad humana. Las actividades antrópicas traen como consecuencia la emisión de tres principales gases de efecto invernadero: dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O) (EPA, 2015). Estos gases se acumulan en la atmósfera, provocando un incremento de sus concentraciones con el paso del tiempo (Ver Figura 5). En la era industrial se han producido incrementos significativos de todos estos gases. Todos estos incrementos se atribuyen a las actividades humanas. Los GEI en conjunto contribuyen en

⁵ Wm^{-2} significa Watts por metro cuadrado

un $+2,63 \pm 0,26 \text{ W m}^{-2}$, que es el periodo dominante de forzamiento radiativo y tiene el nivel más alto de conocimiento científico (IPCC, 2013).

- El dióxido de carbono ha aumentado debido al uso de combustibles en el transporte, los sistemas de calefacción y aire acondicionado de edificaciones, la producción de cemento y otros bienes. Con la deforestación se libera CO₂ y se reduce la absorción de CO₂ de las plantas. El dióxido de carbono se libera también en procesos naturales como la descomposición de la materia vegetal. Sus emisiones anuales aumentaron en torno a un 80% entre 1970 y 2004. De acuerdo al IPCC (2001) la concentración atmosférica de este gas ha aumentado en un 31% desde 1750. El ritmo actual de crecimiento no tiene precedentes, al menos en los últimos 20,000 años.

Figura 5. Mundial: *Mecanismos antropogénicos, 1890-2013*



Fuente: Elaboración propia con datos de RCP database

- El metano ha aumentado como resultado de las actividades humanas relacionadas con la agricultura, la distribución del gas natural y los vertederos. También hay procesos naturales en los que se libera metano, como por ejemplo, en los humedales. Las concentraciones de metano no están aumentando actualmente en la atmósfera porque su tasa de crecimiento disminuyó en los dos últimos decenios. La concentración de metano en la atmósfera ha

aumentado en 1.060 ppm (151%) desde 1750 y sigue aumentando aunque a una tasa más lenta⁶. (IPCC, 2007, 2013).

- Como resultado de las actividades humanas se emite también el óxido nitroso con el uso de fertilizantes y la quema de combustibles fósiles. Los procesos naturales de los suelos y los océanos también liberan N₂O.⁷ La concentración de este gas en la atmósfera ha aumentado en 46ppmm (17%) desde 1750 y sigue aumentando. La concentración actual no se ha superado en al menos durante los últimos mil años (IPCC, 2001).

La Fuerza radiactiva que proviene de actividades antropogénicas tiene gran influencia en el comportamiento de la temperatura, mantiene una correlación de 93% con ésta, lo cual la define como una de las variables más importantes en el análisis del cambio climático. En la Figura 5 se muestran las emisiones, concentraciones y de GEI contribuciones a los forzamientos radiativos hechas por algunos de los factores influidos por actividades humanas. Los forzamientos para todos los incrementos de los gases de efecto invernadero son positivos porque cada gas absorbe la radiación infrarroja ascendente en la atmósfera. De los gases de efecto invernadero, el aumento de CO₂ ha sido el que ha causado un mayor forzamiento en este período.

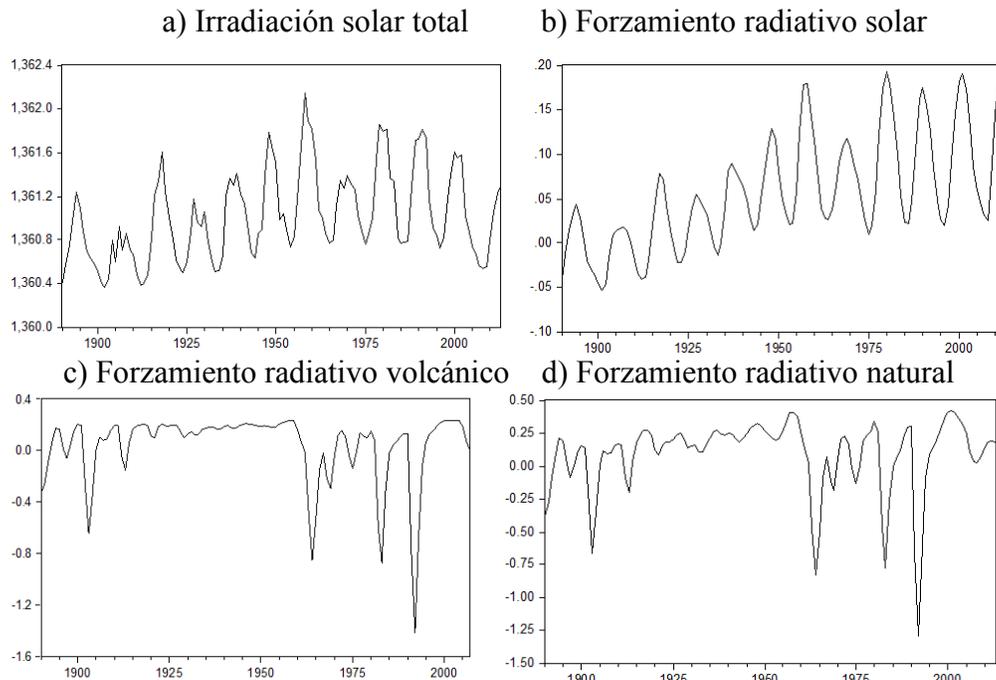
1.6 Bloque de los mecanismos naturales

Los forzamientos naturales surgen debido a los cambios solares y las explosiones de las erupciones volcánicas. La radiación solar total se ha incrementado gradualmente en la era industrial causando un pequeño forzamiento radiativo (véase Figura 6). Ello se añade a los cambios cíclicos en la radiación solar que tienen un ciclo de 11 años. La energía solar calienta directamente al sistema climático y puede afectar también la abundancia en la atmósfera de algunos gases de efecto invernadero, como el ozono estratosférico. Las explosiones de las erupciones volcánicas pueden crear un forzamiento negativo de duración breve (de 2 a 3 años) mediante el incremento temporal que ocurre en el sulfato en aerosol de la estratosfera. En la actualidad, la estratosfera se encuentra libre de aerosoles volcánicos pues la última erupción grande fue en 1991 (Pinatubo).

⁶ El crecimiento anual de la concentración de metano fue más lento y se hizo más variable en la década de los noventa.

⁷ Et al

Figura 6. Mundial: *Mecanismos naturales, 1890-2013 (W/m²)*



Fuente: Elaboración propia con datos de RCP database

Las diferencias en las estimaciones de los forzamientos radiativos entre los valores actuales y los del comienzo de la era industrial para los cambios en la irradiancia solar y los volcanes son muy pequeñas en comparación con las diferencias en los forzamientos radiativos provenientes de la actividad humana. Como consecuencia de ello, en la atmósfera actual, los forzamientos radiativos ocasionados por la actividad humana son mucho más importantes para explicar el cambio climático actual y futuro que los forzamientos radiativos calculados a partir de los cambios en los procesos naturales.

1.7 *Análisis de la temperatura*

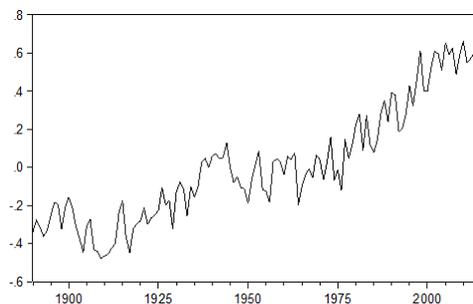
La última variable en el de análisis del cambio climático es la temperatura, la cual recibe la influencia directa o indirecta de todas las anteriores. En la Figura 7 se muestra el crecimiento de la temperatura global mundial. En ésta se puede observar cambios en la media y una variabilidad considerable. De acuerdo al IPCC en el AR 2013 a partir de la era industrial se han observado grandes cambios en la tendencia de la temperatura global, caracterizados por una tasa creciente de calentamiento, lo cual desemboca variaciones en el sistema climático, es por ello, que se ha considerado a la actividad humana como intensificadora del desequilibrio.

Como consecuencia de la falta de información referente a la época pre-industrial y a la incertidumbre en la medición de las observaciones del siglo XIX, el presente trabajo analiza principalmente el siglo XX. A pesar de esto, los datos disponibles revelan que la temperatura media global ha aumentado $0.6 \pm 0.2^\circ\text{C}$ desde fines del siglo XIX. Asimismo, las observaciones instrumentales de los últimos 150 años muestran que las temperaturas de la superficie se han elevado en todo el orbe, con importantes variaciones regionales (IPCC, AR 2013).

En la figura 7 se aprecia que durante el tiempo en observación la temperatura registró 2 periodos de grandes aumentos, llamados fases de calentamiento: el primero abarcó de 1910 a 1945 (0.35°C) y el segundo, de 1976 a 2000 con mayor intensidad (55°C), fácilmente percibidos por los cambios en la tendencia. El SIE⁸ establece que el ritmo de aumento de la temperatura para ambos periodos es de aproximadamente 0.15°C por decenio. El calentamiento del primer periodo estuvo concentrado inicialmente en el Atlántico Norte; mientras que el del segundo periodo abarcó primeramente las altas y medias latitudes del hemisferio norte.

Figura 7. Mundial: *Variación de la temperatura media total, 1890-2013 (grados centígrados)*

a) Tasa de crecimiento de la temperatura media global total



Fuente: Elaboración propia con datos de la NASA

Por ésta razón, el IPCC afirma que de los últimos 12 años (1995 a 2006) 11 de ellos, exceptuando 1996, se clasifican entre los 12 años más cálidos registrados desde 1850. Se considera altamente probable que los años noventa haya sido la década más cálida. Dentro de dichos periodos, puntualmente los expertos han declarado a los años 1998 y 2005 como los más cálidos en el registro de temperatura del aire superficial mundial desde 1850. Las

⁸ SIE se refiere al Segundo Informe de Evaluación del IPCC (1995) utilizado para informar ante la CMCC

temperaturas superficiales en 1998 se intensificaron por el fenómeno El Niño de 1997–1998, en contraste con el año de 2005.

Históricamente se ha evaluado que la temperatura superficial media mundial aumentó, sobre todo, a partir de 1950 aproximadamente. El IPCC anuncia que la tendencia actualizada de los últimos 100 años (1906–2005) aumentó en unos $0.74^{\circ}\text{C} \pm 0,18^{\circ}\text{C}$ lo que es mayor que la tendencia de calentamiento de 100 años en la época del TIE (1901–2000), de $0.6^{\circ}\text{C} \pm 0,2^{\circ}\text{C}$, debido a los años cálidos adicionales. El aumento de temperatura total del periodo de 1850-1899 a 2001-2005 es de $0.76^{\circ}\text{C} \pm 0.19^{\circ}\text{C}$. La tasa de calentamiento promediada durante los últimos 50 años ($0.13^{\circ}\text{C} \pm 0.03^{\circ}\text{C}$ por decenio) es casi el doble de la tasa de los últimos 100 años (IPCC. 2007).

La confirmación del calentamiento de la atmósfera según el IPCC proviene del calentamiento de los océanos, los incrementos del nivel del mar, el derretimiento de los glaciares, el desplazamiento del hielo marino en el Ártico y la disminución de capa de nieve en el hemisferio norte. Algunas zonas se han enfriado desde 1901, mayormente en la parte septentrional del Atlántico Norte, cerca de la parte sur de Groenlandia. Durante este tiempo, el calentamiento ha sido mayor en las zonas interiores de Asia y la parte septentrional de América del Norte. Sin embargo, como son zonas con variabilidad anual, la señal más evidente del calentamiento ha ocurrido en partes de las latitudes medias y bajas, sobre todo en los océanos tropicales.

Por su parte, desde 1950, la troposfera se ha calentado a un ritmo ligeramente superior que la superficie, mientras que la estratosfera se ha enfriado marcadamente desde 1979 (IPCC, 2007). De esta manera, se demuestra la función de los crecientes gases de efecto invernadero en el desequilibrio del sistema climático y por lo tanto en el aumento de los forzamientos radiativos que provocan el calentamiento de la troposfera y el enfriamiento de la estratosfera. El agotamiento del ozono contribuye también al enfriamiento de esta última.

1.8 Análisis de la tendencia de la temperatura: determinística vs estocástica

Al observar la gráfica de las variaciones de la temperatura media global (figura 7) resulta evidente la presencia de una tendencia. La forma de ésta es discutida por autores como

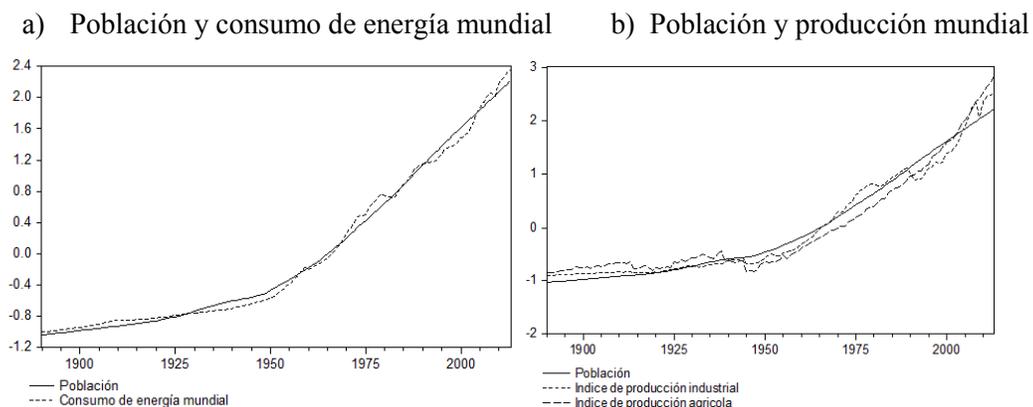
Galbraith y Green (1992), Gay, Estrada y Sánchez (2009) y Kaufmann, Kauppi, Mann y Stock (2013). A través del análisis del proceso generador de los datos de la temperatura, los primeros y segundos asumen que existe tendencia estacionaria con cambio estructural. Sus resultados muestran una fuerte evidencia en contra de una tendencia estocástica en la temperatura global cuyo enfoque sostienen Kaufmann y colegas.

Esto implica la imposibilidad de describir los mecanismos físicos que generan la serie de tiempo para la temperatura, siguiendo una tendencia determinística. Esta discusión será importante para la modelación de la presente investigación. Con base al marco teórico descrito anteriormente y a la evidencia histórica del comportamiento de los datos, a continuación se realiza un análisis gráfico enfocado a la relación de la población con el cambio climático como el principal generador del desequilibrio ambiental.

1.9 Gráficas de dispersión

Como se mencionó previamente, se ha encontrado evidencia de la fuerte correlación entre las acciones humanas y las alteraciones en el sistema climático. Aunque hay diversas actividades en las cuales interviene el hombre, la población en sí misma, es la principal precursora de dichos cambios. La figura 8 muestra como las variables de consumo de energía mundial así como las de producción tienen una tendencia similar a la de la población, lo cual sugiere que ambas variables dependen de esta última.

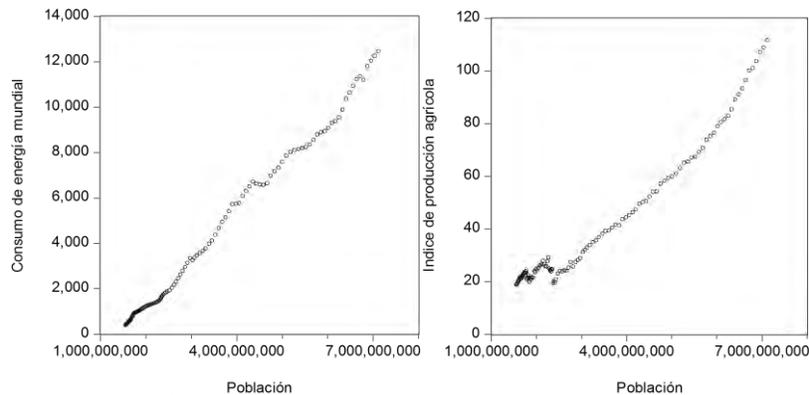
Figura 8. Mundial: *Consumo de energía mundial, producción y Población (1890-2013)*



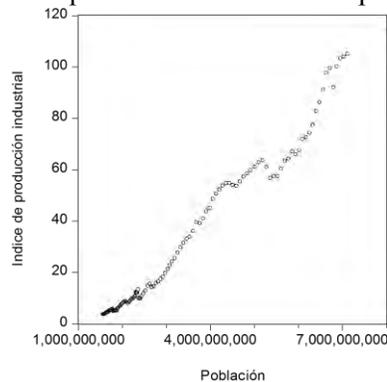
Fuente: Elaboración propia

Figura 9. Correlación entre consumo de energía mundial, producción y población

a) Consumo de energía mundial vs población b) Índice de producción agrícola vs población



c) Índice de producción industrial vs población



Fuente: Elaboración propia

La figura 9 presenta los gráficos de dispersión correspondientes a cada una de estas variables relacionadas con la población. En el panel 8a se encuentra el consumo de energía mundial respecto a la población. Su grado de correlación es de 99% positivo, lo que significa que a mayor población hay mayor consumo. El mismo comportamiento lo encontramos entre la producción industrial y agrícola con la población con una correlación de 0.988 y 0.977 ⁹respectivamente.

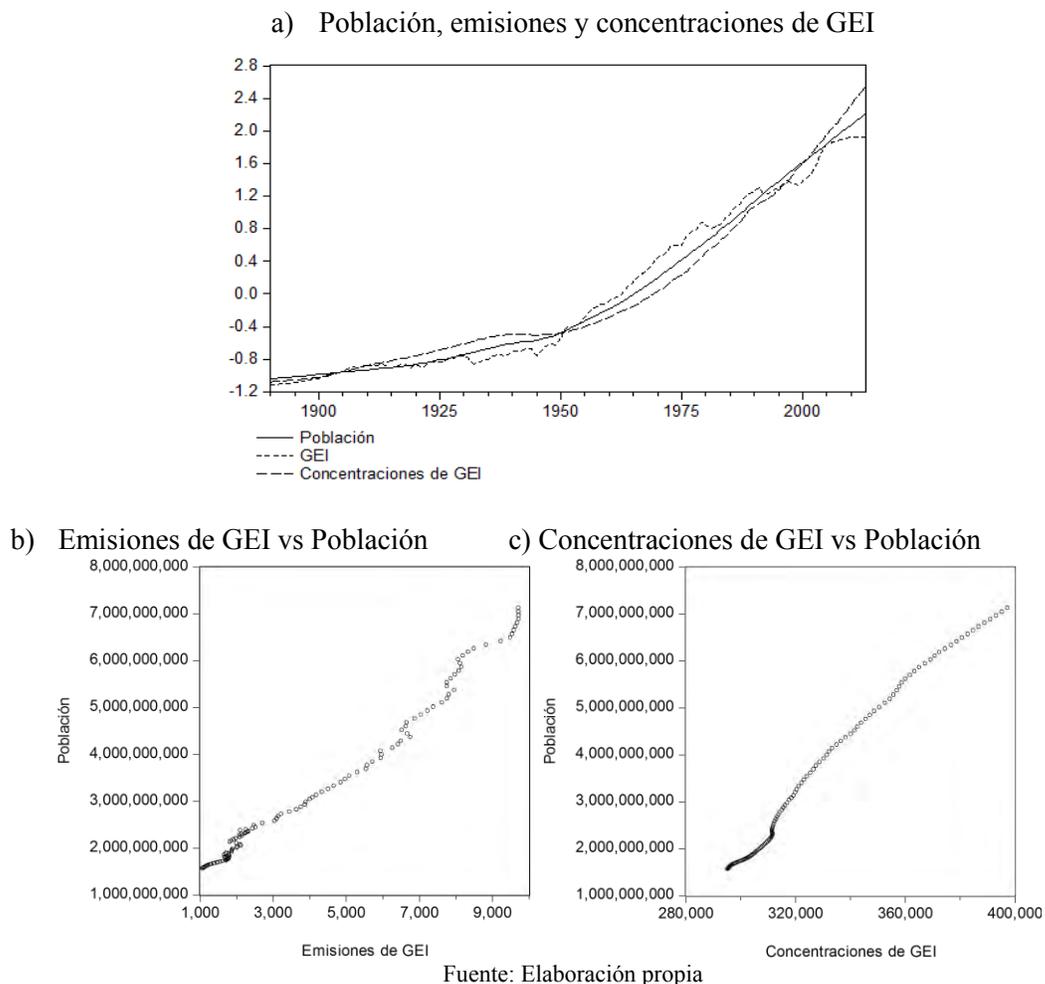
Al tener la correlación positiva con los factores generadores de emisiones de GEI, se esperaría que la relación de la población con éstas últimas, ya sea de forma directa o por factores indirectos se mantenga. Lo anterior se debe a que por una parte al incrementarse la población consecuentemente hay un acrecentamiento en la demanda de bienes y servicios

⁹ Las correlaciones se presentan en el anexo estadístico.

básicos para la vida. Este aumento implica mayor producción y por ende mayor demanda de trabajo.

Se consume más energía tanto por parte del sector industrial para poder llevar a cabo sus actividades como por otra del sector comercial a través del consumo privado, por las remuneraciones percibidas. Así crece el número de emisiones y concentraciones de GEI antropogénicos. La figura 10 muestra estas tendencias y sus correspondientes correlaciones de 0.992 y 0,993.

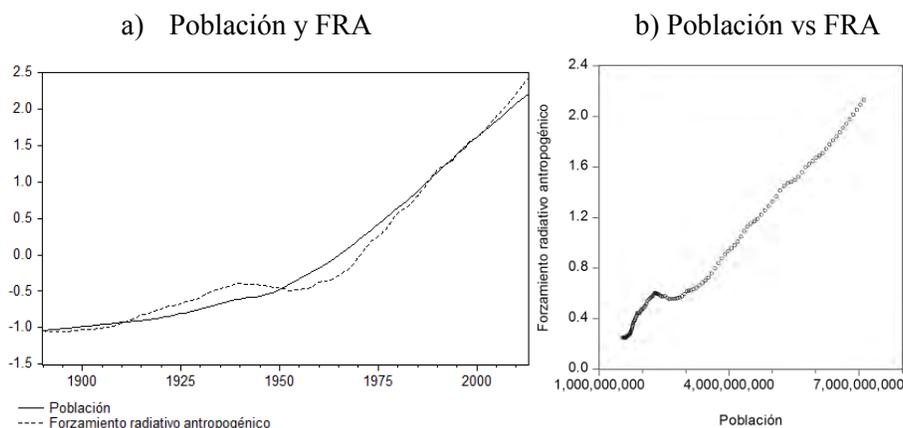
Figura 10. Mundial: *Población, emisiones y concentraciones de GEI, 1890 a 2013*



Como se mencionó previamente, el resultado de una alteración externa al sistema climático se le conoce como forzamiento radiativo. En el caso de la imagen a) de la figura 11 se puede apreciar que el comportamiento de la población mantiene la tendencia ascendente, inclusive con el forzamiento radiativo antropogénico. Su grado de correlación

es de 0.990 lo cual significa que el mecanismo antrópico, como precursor de la perturbación del sistema climático, es evidente; y por otra parte que es posible que la tendencia que aparece en la temperatura se deba al crecimiento de la población.

Figura 11. Mundial: *Población y forzamiento radiativo antropogénico, 1890 a 2005*

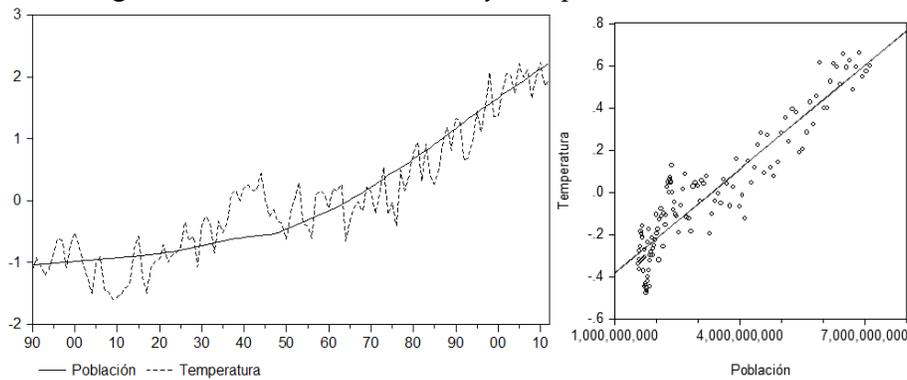


Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con las pruebas de raíces unitarias aplicadas a las variables y al resultado de estacionariedad correspondiente a la temperatura, lo dicho anteriormente significa que ésta sigue una tendencia estacionaria (gráfica 13), lo que implica que el calentamiento reciente puede ser interpretado como una tendencia de largo plazo (Gay, et al, 2009) y que la temperatura puede ser modelada como un proceso estacionario alrededor de una tendencia determinística que se atribuye al crecimiento de la población y sus sucesivos incrementos en la producción y consumo.

En la figura 12 se presenta la relación entre la población y los cambios en la temperatura. Se puede fácilmente apreciar que la temperatura sigue la tendencia marcada por el crecimiento de la población. El diagrama de dispersión muestra una relación positiva y el coeficiente de correlación resultante es de 92.7%.

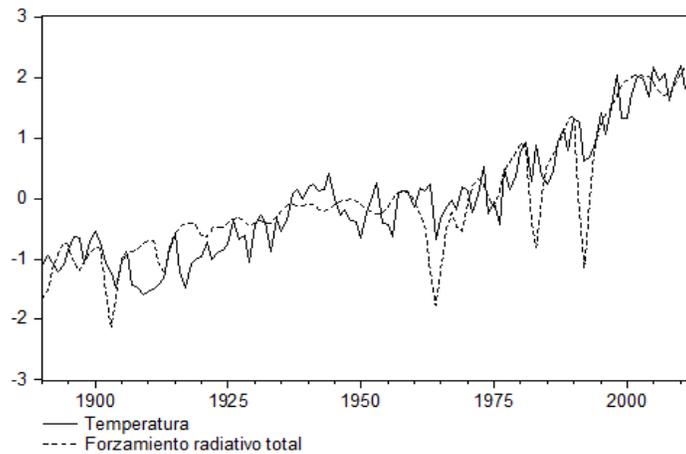
Figura 12. Mundial: *Población y Temperatura, 1890-2013*



Fuente: Elaboración propia

Aunque el componente antropogénico es un mecanismo decididamente influyente en el comportamiento de la temperatura, el mecanismo natural también tiene su importancia. Al graficar las variaciones de la temperatura media global con el forzamiento total (gráfica 13) es evidente que en realidad siguen una tendencia común. El coeficiente de correlación entre las variables (0.87) es relativamente alto.

Gráfica 13. Mundial: *Temperatura de la superficie global y forzamiento radiativo total, 1890-2013*



Fuente: Elaboración propia

De ambos forzamientos, el antropogénico se correlaciona en 0.90 con respecto a la temperatura, mientras que el natural es de 0.14, lo cual indica que su nivel de explicación de los cambios en la temperatura son mínimos en comparación con el antropogénico. Con el análisis gráfico realizado, se tiene noción más detallada de las relaciones entre las variables.

2 Capítulo II: Evidencia empírica y bases científicas del cambio climático actual

El análisis gráfico e histórico realizado en la sección anterior ha demostrado que existe una posibilidad muy alta de la existencia de cambio climático. Esto ha alarmado a muchos científicos relacionados con el tema y los ha guiado a abordarlo enfáticamente a partir del diseño de modelos. Estos últimos se construyen de manera que permitan evaluar los mecanismos que generan el deterioro ambiental. Todo esto con el fin de tomar medidas que eviten un futuro desastroso para la naturaleza y la vida humana.

2.1 Modelos IA y Simulación Monte Carlo en el análisis del Cambio climático

El cambio climático ocurre como consecuencia de la variabilidad interna del sistema ambiental y de otros factores externos, ya sean naturales o que resulten de actividades humanas. Las emisiones de GEI y de aerosoles causadas por el hombre cambian la composición de la atmósfera (IPCC, 2001). Se ha detectado en todo el sistema la evidencia de que las emisiones antropogénicas han aumentado desde la era preindustrial impulsadas en gran medida por el crecimiento económico y demográfico. A partir de esto, se han observado altos niveles de concentraciones de dióxido de carbono, metano y óxido nitroso sin precedentes, en la atmósfera, en por lo menos los últimos 800.000 años; lo que probablemente ha contribuido al reciente calentamiento global (IPCC, 2014).

Como consecuencia, numerosos estudios sobre el clima han intentado añadir en sus modelos algunos componentes antropogénicos, tales como la dinámica de la demografía y el crecimiento económico para comprender de manera más amplia el deterioro ambiental que resulta en cambio climático. Brian O'Neill al profundizar en el análisis del cambio climático encontró que el factor demográfico, especialmente la población, ha sido subestimado en muchos estudios por lo que decidió incorporarlo en sus modelos climatológicos en donde resultó significativo (PAI, 2011). En concordancia, otros autores sugieren que no basta con tomar en cuenta las emisiones de GEI per cápita, sino que es necesario incorporar aspectos como población, envejecimiento, urbanización, crecimiento económico, tecnología y cultura (Smith, 2008; Jiang y Hardee, 2011; Cohen, 2010; Smith, et al., 2010).

A pesar de estas últimas consideraciones y siguiendo la línea de investigación de O'Neill, "Population Action International"¹⁰ insiste que el crecimiento de la población es uno de los principales mecanismos del incremento de los GEI que contribuyen al cambio climático. De esta manera, la población resulta ser un elemento imprescindible y quizás el más representativo del bloque demográfico (PAI, 2011). Certidumbre de esto se encuentra en O'Neill et al. (2010) donde al hacer uso del modelo "Population-Environment-Technology"¹¹ (PET, por sus siglas en inglés) concluyen que un bajo crecimiento de la población genera una tasa menor de emisiones derivadas de combustibles fósiles. Para sustentar esto muestran dos tipos de evidencia, por un lado en el análisis empírico de las tendencias y por el otro a través de los resultados de los escenarios de interés (O'Neill, 2012).

De forma similar, Jiang y Hardee (2011) mediante un modelo STIRPAT¹² investigan cómo la dinámica de la población afecta tanto a las emisiones de carbón como al sistema ambiental y reiteran la importancia de las recientes tendencias demográficas para el diseño de políticas de adaptación al cambio climático. A pesar de estas demostraciones, aún hay fuertes brechas entre las perspectivas de los científicos sociales y naturales acerca de la complejidad del sistema social y su relación con el medio ambiente, lo que dificulta su correspondiente participación. Al respecto el IPCC poco a poco ha agregado en sus estudios aspectos como el crecimiento poblacional, la dinámica económica, el cambio tecnológico y patrones de uso de suelo y energía lo cual incentiva a complejizar las investigaciones (Kelly y Kolstad, 1998).

El desafío de representar de mejor manera el sistema climático ha llevado al acoplamiento de diferentes áreas del conocimiento que, unidas de manera integral, permitan generar modelos más completos y evaluaciones más profundas. Con base en lo antepuesto, surge en este campo la evaluación integral que es un enfoque unificador de información

¹⁰ PAI es una organización internacional no gubernamental que enfoca sus investigaciones a la promoción del acceso global a la planificación familiar y la salud reproductiva. Su misión es garantizar el derecho al acceso a la salud sexual y reproductiva a toda persona, para lograr un equilibrio entre la humanidad y el medio ambiente natural. La sede de PAI se encuentra en Washington, DC (<http://pai.org/what-we-do/>)

¹¹ El modelo PET es un modelo de escala global, multiregional y se basa en la metodología de equilibrio general computable. Está diseñado para analizar las relaciones económicas asociadas a la producción y uso de combustibles fósiles con las emisiones de CO₂ (O'Neill, et al., 2010).

¹² El modelo STIRPAT pertenece a la gama de modelos IAMs. Es una extensión de la identidad IPAT y contiene una parte estocástica. El STIRPAT ha sido utilizado para analizar los efectos de las fuerzas causantes en una variedad de impactos ambientales (York, et al., 2003).

para progresar en el entendimiento de un problema en particular (Risbey, et al.,1996). La agencia de protección al medio ambiente de Estados Unidos (EPA) la define como un enfoque basado en el análisis de sistemas para la evaluación ambiental. Esto incluye un conjunto de componentes (modelos, datos y métodos de evaluación) de ciencias interdependientes que juntas forman la base para construir un sistema de modelación apropiado.

Para Schneider y Lane (2005) es un proceso interdisciplinario de combinación, interpretación y comunicación de conocimientos de distintas disciplinas para evaluar las interacciones de causa y efecto del problema en cuestión. Dicha metodología considera factores económicos y sociales generadores de emisiones de gases de efecto invernadero y sirve como plataforma de los IAMs. Éstos últimos tienen como objetivo integrar la información a través de la vinculación de representaciones matemáticas de los diferentes elementos del sistema, tanto natural como social, por medio de un modelo computarizado (Risbey, et al., 1996; SEDAC, 2015; Schneider y Lane, 2005).

Los modelos de evaluación integral reúnen, resumen y proveen información multidisciplinaria útil para la generación de políticas. Dado que están compuestos de distintos submodelos diseñados con propósitos específicos proveen un marco adecuado para combinar dichos conocimientos con mayor flexibilidad y transparencia. Son frecuentemente utilizados como herramientas para entender los problemas más complejos del medio ambiente. Los IAMs se componen de un conjunto más amplio de áreas, métodos y estilos de estudio comparados con otros modelos diseñados para el mismo problema.

Estos modelos consideran aspectos tanto físicos como sociales, con variables de política, demográficas y económicas; que afectan los escenarios de emisiones de GEI y al sistema físico del clima. La metodología de evaluación integral está basada en un gran conjunto de supuestos acerca de la atmósfera, los océanos, de la superficie de la tierra y el uso de la misma, del crecimiento económico, emisiones de combustible fósil, dinámica de la población, cambio tecnológico, entre otros (SEDAC, 2015; Matsuoka, et al. 2001).

A pesar de sus ambiciosas pretensiones y por su rigurosa complejidad, dichos modelos cuentan con importantes restricciones en su estructura, que los ponen en tela de

juicio para ser referendo confiable en la toma de decisiones. Entre sus principales debilidades se encuentra que:

- Los sistemas modelados son grandes, complejos y, por consiguiente caóticos. Es necesario un equilibrio entre la especialización (profundidad de la cobertura) y la integración (amplitud de la cobertura).
- No son modelos predictivos ni prescriptivos, lo cual les impide pronosticar impactos y, por lo tanto, los limita para dar recomendaciones. De esta manera, no es posible conocer las consecuencias de la implementación de políticas.
- La complejidad del sistema natural y social no puede ser capturada por éstos modelos a consecuencia de que los valores de la vida humana y de la naturaleza, son difíciles de cuantificar.
- El análisis de incertidumbre es muy dificultoso, lo que puede causar poca credibilidad en los usuarios finales. (SEDAC, 2015; Lotze-Campen, 2015).

En este contexto, resulta indispensable abordar las fallas y buscar alternativas que las reduzcan lo máximo posible.

Para el caso de la incertidumbre, se ha optado por el uso del análisis de sensibilidad mediante la técnica de simulación de Monte Carlo, la cual permite conocer la distribución de la muestra al generarla ella misma a través de procesos reiterativos (IEHIAS, 2015). La aplicación de este método, en cierta medida, ha logrado obtener conocimientos sólidos de la dirección del cambio, de la estructura del modelo y de los posibles mecanismos de incertidumbre (Anderson, et al. 2012). Aunque representa un gran avance en la investigación del cambio climático, este método también posee algunas debilidades que deben considerarse para evitar llegar a falsos resultados. Entre éstas se encuentran las siguientes: el tiempo de cálculo que requieren, el riguroso cuidado en su diseño, la exigua distinción entre incertidumbre y variabilidad, la poca importancia que brinda a las correlaciones de las variables que lo integran, así como la inexactitud de las soluciones y la dependencia del número de iteraciones para producir las estimaciones. (Denning, et al., 2012 y Smith, 1994). Todo esto incentiva a hacer un análisis más general en modelos más simples (Shwanitz, 2013; SEDAC, 2015).

2.2 Propuesta como alternativa y complemento para la valoración integral

Como se revisó anteriormente, la metodología de los IAMs y la técnica de simulación de Monte Carlo poseen debilidades que les dificulta capturar la incertidumbre y en consecuencia podría obstaculizar el pronóstico. En concordancia con Shwanitz en la eficiencia de modelos más sencillos y generales para la valoración del cambio climático, el presente trabajo se auxilia de una metodología que busca ser una alternativa y complemento a los métodos antes mencionados. Se trata de simulación y pronóstico de series de tiempo mediante la metodología econométrica y probabilística de sistemas de ecuaciones simultáneas, con modelos autorregresivos de rezagos distribuidos ARDL basados en el enfoque de reducción probabilística.

La metodología propuesta permite hacer un análisis integral de los mecanismos generadores del cambio climático a través de la resolución de varios bloques simultáneamente. Además, proporciona información descriptiva y probabilística proveniente de la aplicación de las pruebas de correcta especificación de la forma reducida del sistema en estudio y facilita el análisis estructural, al considerar la teoría en la especificación de los modelos y al evaluar las causalidades entre las variables. Con lo anterior, se puede hacer inferencia estadística de las estimaciones obtenidas y realizar pronósticos con mayor precisión al disminuir la incertidumbre gracias a la posibilidad de hacer escenarios con 95% de confianza.

Por otra parte la metodología de SVAR permite identificar el efecto de los principales mecanismos del deterioro ambiental y por ende examinar la respuesta de la temperatura ante choques en los forzamientos radiativos a través de análisis de impulsos respuesta y descomposición de la varianza (lo anterior se ahondará en el Capítulo III).

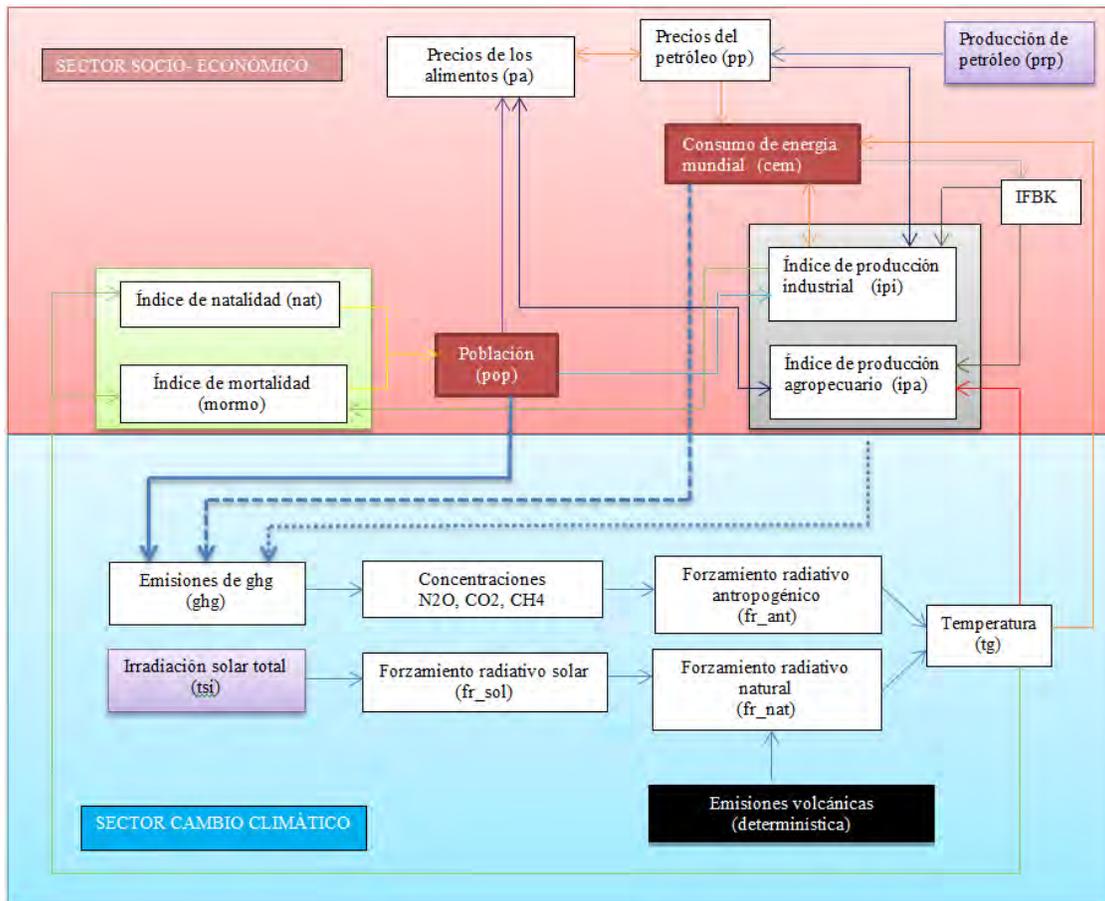
2.3 Marco teórico de la transmisión natural y antropogénica al cambio climático

Con base a la discusión precedente y a los hallazgos obtenidos por el análisis histórico de las variables que podrían explicar el cambio climático, se presenta el esquema teórico que será modelado, con la metodología propuesta, para conocer las interacciones entre las variables que componen el sistema climático y evaluar su relación con la temperatura; para posteriormente hacer simulación, pronóstico y escenarios del posible comportamiento futuro de la población.

2.3.1 Esquema de los mecanismos de transmisión que conducen al cambio climático

Para tener una perspectiva completa del proceso generador del cambio climático, en la presente investigación se plantea el Esquema 1 “Marco integral de los mecanismos de transmisión que conducen al cambio climático” que intenta ser lo más completo posible considerando la restricción de disponibilidad de información socio-económica para el periodo de estudio (Otto, 2015). Este esquema fue inspirado por el marco de causas y efectos del reporte de bases científicas del IPCC (2007) y considera el mapa de mecanismos propuesto en el reporte de evaluación número cinco del mismo organismo (Reporte de evaluación no. 5 (AR5), IPCC 2013).

Esquema 1. Marco integral de los mecanismos de transmisión que conducen al cambio climático



Fuente: Elaboración propia con información del IPCC

En dicho esquema se presentan los factores antropogénicos tales como la población, la producción y el consumo; y sus respectivos impactos en el cambio climático, que es

representado por las anomalías en la temperatura media global. Con tales relaciones y a partir de la información socioeconómica y de las emisiones de GEI disponible, es posible inferir los mecanismos y las respuestas de la temperatura. El esquema, también contempla el proceso natural de irradiación solar y emisiones volcánicas, los cuales juegan un papel importante en la determinación de los cambios en la temperatura, y que en conjunto con las actividades humanas pueden ofrecer un panorama integral sobre los factores responsables de la intensificación del actual deterioro ambiental que conlleva al cambio climático.

Las variables consideradas en el esquema permiten determinar, a grandes rasgos, qué decisiones de desarrollo son compatibles con la disminución y mitigación de las emisiones mundiales que permitirían reducir en un futuro el riesgo de impactos indeseables para la sociedad tales como la escasez alimentaria; problemas en la calidad del agua y menor disponibilidad de ésta; mayor riesgo de defunciones, epidemias y desnutrición; pérdidas económicas y de infraestructura; entre otras (IPCC, 2007). El esquema planteado se divide en dos secciones: la primera corresponde al bloque socioeconómico y se encuentra en la parte superior del esquema; la segunda contempla los procesos atmosféricos y aparece en la parte inferior. A continuación se explica cada sección.

2.3.1.1 Sección socioeconómica

De acuerdo con diversos estudios enfocados a evaluar las causas del cambio climático, las actividades humanas en general son la mayor fuente de alteración de la atmósfera terrestre en cuanto a las cantidades de gases de efecto invernadero, aerosoles (partículas pequeñas) y nubosidad (Stone, et al., 2009; Kauffman y Stern, 1997; IPCC, 2001, IPCC, 2007, IPCC, 2013, United States Environmental Protect Agency (EPA, 2015). La mayor contribución conocida proviene de la combustión de combustibles fósiles que libera el gas de dióxido de carbono a la atmósfera, seguida del cambio del uso del suelo que implica la deforestación y las actividades agrícolas (IPCC,2007; Tol, 2013).

De esta manera, la sección socioeconómica del esquema presenta dos principales bloques, el demográfico y el económico. El demográfico contiene la población y las tasa de natalidad y mortalidad. Se establece dicho bloque porque el factor demográfico es el origen de las actividades humanas y el motor de todo el proceso productivo al establecer las pautas de producción y consumo (Lutz, 2009; Tyagi, 2015). La población tiene una relación

directa y otra indirecta con las emisiones de gases de efecto invernadero. Directa a través de la naturaleza del ciclo del carbono. De forma indirecta, por medio de las actividades económicas que garantizan su supervivencia y bienestar, con las cuales mantiene una relación positiva. Esta última relación asocia al bloque demográfico con el económico.

El bloque económico comienza con la producción de petróleo, la cual aparece como una de las variables más exógenas del esquema, debido a que representa la cantidad disponible de este energético para su uso como fuente principal de energía mundial. Se considera variable proxy de los yacimientos probados, ya que no se cuenta con registros mundiales históricos de éstos. Esta variable se conecta directamente con los precios del petróleo que influyen en las decisiones de producción y consumo. Dichos precios se relacionan con los precios de los alimentos, con el consumo de energía mundial y con la inversión. Los primeros reciben la influencia de los precios del petróleo a través de la reducción de los costos de producción por un precio más bajo de los insumos provenientes del petróleo o de industrias que dependen de algún derivado de éste (Bakhat y Würzburg; 2013; Husain, et al, 2015); dependen de la producción agropecuaria y de la demanda de alimentos.

El consumo mundial de energía aparece en función de los precios de los energéticos, del nivel de ingresos (Stern, et al, 2014) y de la temperatura. Esta última relación se fundamenta en la demanda de electrodomésticos y otros, que permiten la adaptación a climas extremos en ciertas regiones, así como para cubrir la demanda de comodidad por parte de los países más desarrollados (O'Neill, et al., 2012).

La producción económica se divide en dos, la correspondiente a la industria que incluye a la minería; y la agrícola. La primera está determinada a través de su función de producción cuyos componentes son la población como variable proxy del empleo, el índice de formación bruta de capital como inversión, el consumo de energía mundial y los precios de los alimentos y del petróleo. Lo anterior se determinó con base a Stern (2010), Banaeian, et al. (2011), y Bruns (2012) y a la función de producción clásica.¹³ La producción agropecuaria, por otra parte está determinada por la temperatura y los precios de los alimentos. La primera le afecta de manera negativa, es decir un incremento en la

¹³ La función de producción clásica se explica más detalladamente en el Apéndice A.

variabilidad del clima exacerba riesgos de producción como consecuencia de los climas extremos y los cambios en el ciclo productivo (Rosenzweig, et al, 1994, Lipper, 2014). Los precios mantienen una relación positiva por tratarse del bien producido.

Consecuentemente, se puede determinar que el crecimiento económico, los cambios tecnológicos y el crecimiento poblacional tienen la mayor influencia antrópica¹⁴ en las emisiones (Jiang y Hardee, 2011). De esta manera queda establecido el mecanismo socioeconómico en el cual el crecimiento de la población influye totalmente en el crecimiento económico, en el consumo de energía y en las emisiones de GEI.

Existe un mecanismo de impactos de regreso que afecta a dicho bloque con resultados negativos para la sociedad. La variable conductora es la temperatura y perturba por una parte los índices de natalidad y mortalidad disminuyendo la primera y aumentando la segunda; y por otro lado a la economía, a la cual afecta ambiguamente por la aparición de eventos extremos. Aumenta el consumo de energía mundial, disminuye la producción agrícola pero aumenta la industrial y el consumo para cubrir los desastres naturales (IPCC, 2007).

2.3.1.2 Sección de los efectos atmosféricos

Las emisiones de gases de efecto invernadero generadas por las actividades humanas son la liga de la sección socioeconómica con la de procesos atmosféricos. Representan la principal fuente determinante de las concentraciones.

Los gases de efecto invernadero afectan al clima al alterar el balance energético de la tierra reduciendo la eficiencia con la cual la superficie irradia energía al espacio. La atmosfera absorbe más radiación terrestre que se desprende de la superficie y vuelve a emitirla en altitudes superiores y temperaturas más bajas produciendo un forzamiento radiativo positivo¹⁵. La variación de la abundancia de estos gases y partículas en la

¹⁴ De acuerdo a la Real Academia Española, el término antrópico proviene del gr. ἀνθρωπικός anthrōpikós 'humano', der. de ἄνθρωπος ánthrōpos 'hombre, ser humano'. Y se define como adj. Producido o modificado por la actividad humana. La erosión antrópica del terreno.

¹⁵ Un forzamiento radiativo se cuantifica por lo general como la 'tasa de cambio de energía por área de unidad del planeta medida en la parte superior de la atmósfera' y se expresa en 'Vatios por metro cuadrado'. Cuando el forzamiento radiativo de un factor o grupo de factores se evalúa como positivo, la energía del sistema atmósfera –Tierra se incrementará posteriormente, conduciendo al calentamiento del sistema. Por el contrario, un forzamiento radiativo negativo hará que la energía disminuya ulteriormente, conduciendo a un enfriamiento del sistema. Los climatólogos enfrentan el desafío de identificar todos los factores que afectan el clima y los mecanismos mediante los cuales se ejerce un forzamiento, a fin de poder cuantificar el forzamiento radiativo de cada factor y evaluar el forzamiento

atmósfera, puede conducir a un calentamiento o enfriamiento del sistema climático (IPCC, 2007). Como se desprende menos calor hacia el espacio, se refuerza el efecto invernadero¹⁶. La cantidad de forzamiento radiativo depende de la magnitud del aumento en la concentración de cada GEI, de las propiedades radiativas de los gases en cuestión y de las concentraciones de otros GEI ya presentes en la atmósfera. El forzamiento radiativo derivado se conoce como de origen antropogénico y es uno de los principales causantes de las alteraciones climáticas.

En esta sección se cuenta con dos variables consideradas totalmente exógenas: la irradiación solar total (tsi) y las emisiones volcánicas (emvol). Ambas pertenecen al mecanismo natural que determina las variaciones en el clima (IPCC, 2001). Como se puede observar en el esquema, la irradiación solar total es la única determinante del forzamiento radiativo solar, por lo que cualquier alteración que tenga la irradiación entrante será observada en el forzamiento correspondiente. El sol tiene períodos de gran actividad, que se observan en el número de manchas solares, así como en la emisión de energía radiativa, la actividad magnética y la emisión de partículas de alta energía. Estas variaciones ocurren en muy diversas escalas temporales, desde millones de años hasta algunos minutos (IPCC, 2013).

Por naturaleza la tierra absorbe la irradiación del sol principalmente en la superficie. A través de procesos y circulaciones atmosféricas y oceánicas la irradiación se dispersa y distribuye en todo el planeta regresando al espacio en forma de ondas infrarrojas.

radiativo total de los grupos de factores. Como se sabe, el equilibrio radiativo controla la temperatura de la superficie de la tierra, cuando se habla de un forzamiento radiativo, indica que el equilibrio radiativo de la tierra está siendo alterado. La influencia de un factor que puede causar un cambio climático, como por ejemplo, el gas de efecto invernadero, se evalúa a menudo en términos de su forzamiento radiativo, que constituye una medida de cómo el equilibrio del sistema atmosférico de la Tierra se comporta cuando se alteran los factores que afectan el clima. La palabra radiativo proviene del hecho de que estos factores cambian el equilibrio entre la radiación solar entrante y la radiación infrarroja saliente dentro de la atmósfera terrestre. El equilibrio radiativo controla la temperatura de la superficie terrestre. El término forzamiento se utiliza para indicar que el equilibrio radiativo de la Tierra está siendo separado de su estado normal. (PF 2.1, Recuadro 1: ¿Qué es el forzamiento radiativo?, http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/es/faq-2-1.html).

¹⁶ El Sol activa el clima de la Tierra, irradiando energía en longitud de ondas cortas predominantemente en la parte visible o casi visible (por ejemplo ultravioleta) del espectro. Aproximadamente una tercera parte de la energía solar que alcanza la zona superior de la atmósfera terrestre se refleja directamente de nuevo al espacio. Las dos restantes terceras partes son absorbidas por la superficie y, en menor magnitud, por la atmósfera. Para equilibrar la energía entrante absorbida, la Tierra debe, como promedio, irradiar la misma cantidad de energía al espacio. Como la Tierra es mucho más fría que el sol, ésta irradia en longitudes de onda mucho más largas, sobre todo en la parte infrarroja del espectro. La atmósfera, con la participación de las nubes, absorbe gran parte de esta radiación térmica emitida por los suelos y el océano y la vuelve a irradiar a la Tierra. Esto es lo que se denomina efecto invernadero. Las paredes de vidrio de los invernaderos reducen el flujo del aire e incrementan la temperatura del aire dentro. De forma análoga, pero mediante un proceso físico diferente, el efecto invernadero de la Tierra calienta la superficie del planeta. Sin el efecto invernadero natural, la temperatura promedio de la superficie terrestre estaría por debajo del punto de congelamiento del agua. Por tanto, el efecto invernadero natural hace posible la vida tal como la conocemos. Sin embargo, las actividades humanas, básicamente la quema de combustibles fósiles y la eliminación de bosques, han intensificado grandemente el efecto invernadero natural, dando lugar al calentamiento mundial (IPCC, AR4).

Normalmente la energía de la radiación solar que ingresa es aproximadamente igual a la cantidad de radiación terrestre saliente (IPCC, 2001). Como se ha mencionado anteriormente, cualquier factor que altere la radiación recibida del sol o la pérdida en el espacio, o aquello que afecte la redistribución de la energía dentro de la atmósfera y entre la atmósfera, tierra y océano, puede afectar el clima.

Por otra parte, la actividad volcánica introduce en la estratosfera grandes cantidades de gases azufrosos (sobre todo, anhídrido sulfuroso), que se transforman en aerosoles de sulfatos. Las erupciones individuales pueden producir un gran forzamiento radiativo negativo, aunque transitorio, que tiende a enfriar la superficie de la Tierra y la atmósfera inferior por períodos de unos pocos años (IPCC, 2001). Debido a que la variable de emisiones volcánicas no es controlable y no posee un patrón particular, es considerada en la presente investigación como variable determinística¹⁷, lo cual permite hacer escenarios considerando algún posible suceso. Dicha variable se relaciona directamente con el forzamiento natural, el cual contiene también los efectos de las variaciones del forzamiento solar, y finalmente representa un determinante de las anomalías en la temperatura.

Con base al Tercer Informe de Evaluación (TIE) del IPCC (2001), cuando cambian los forzamientos radiativos, el sistema climático responde en diversas escalas temporales. Las más prolongadas se deben a la gran capacidad de almacenamiento de calor de las profundidades de los océanos y al ajuste dinámico de los mantos de hielo. Esto significa que la respuesta transitoria a un cambio (positivo o negativo) puede durar miles de años. Todo cambio en el equilibrio radiativo de la Tierra, incluso los debidos a un incremento en los GEI o en los aerosoles, alterará el ciclo hidrológico mundial y la circulación atmosférica y oceánica, afectando por lo tanto las pautas meteorológicas y las temperaturas y precipitaciones regionales.

Con la información que antecede queda definido el marco teórico que sustenta la presente investigación. A continuación se presenta la metodología econométrica que se propone para el análisis del cambio climático.

¹⁷ Una variable se considera determinística cuando sus valores posibles son predecibles, después de haber estudiado usualmente en un corto plazo y frecuentemente a tan sólo una pequeña cantidad de ellos, o más bien, se ha podido descubrir las relaciones entre sus valores y algunos otros valores mediante las cuales es posible predecir sus valores posibles y el error asociado a la predicción es despreciable o tolerable para el logro de la mayoría de los propósitos prácticos asociados (Rosen, 2011).

3 Capítulo III: Metodología econométrica

En éste continuación se explica el enfoque econométrico de reducción probabilística, el cual se utiliza para construir el sistema de ecuaciones simultáneo del esquema 1. Dicho enfoque hace hincapié en el uso de modelos estadísticamente adecuados que permitan hacer inferencias confiables (Spanos, 1986, 1999, 2006a, 2006b). Se basa en la noción de un modelo estadístico como un conjunto de supuestos probabilísticos internamente consistentes, cuyo objetivo es capturar la información estadística contenida en los datos observados (Spanos, 1999; Andreou, Pittis y Spanos, 2001).

Con dicha perspectiva se establece un modelo estructural basado en el marco teórico, el cual establece las relaciones y mecanismos entre las variables y un modelo probabilístico, que debe reflejar la información estadística sistemática contenida en los datos particulares. La única forma en que los dos modelos pueden interactuar entre sí es a través de la adecuación estadística del modelo.

La importancia de que un modelo sea estadísticamente correcto, es la obtención de la información adecuada del proceso generador de los datos, la cual es confiable para hacer inferencia estadística y sirve como herramienta para la toma de decisiones. Cuando el modelo estimado está mal especificado, los resultados y la inferencia son poco fiables (Spanos, 2005a, 2005b). Por lo tanto, en este enfoque, las pruebas de correcta especificación juegan un papel fundamental, para asegurar la adecuación estadística del modelo y la fiabilidad de las inferencias basadas en un modelo de este tipo. A continuación se presenta la metodología alternativa a los IAM's que se denomina sistema de ecuaciones simultáneo.

3.1 Modelo econométrico

3.1.1 Sistema de ecuaciones simultáneas

De acuerdo con Spanos (1990) el concepto de simultaneidad fue propuesto por Haavelmo en un artículo para Harvard en el año 1941. En él pretendía introducir la parte econométrica, la teoría de probabilidad moderna y la inferencia estadística. Dicho concepto, surgió y se reconoció como una idea revolucionaria dentro del campo de la econometría, y fue tomada por el “*Cowles commission group*” en un esfuerzo asociado a

mejorar la modelación empírica que Tinberger (1939) había desarrollado. Como consecuencia, los temas de inferencia estadística con simultaneidad se incrementaron. No obstante, a pesar de la amplia aceptación de dicho concepto, su implementación empírica, bajo el enfoque de ecuaciones simultaneas resultó decepcionante (Epstein, 1987).

Lo anterior ocasionó que en la década de los años cuarenta los principales protagonistas de la comisión de Cowles cambiaran sus intereses hacia otros campos. Solo Klein continuó un modelo macroeconómico empírico basado en el enfoque de Haavelmo (Klein, 1947, 1950) enfrentando numerosas críticas y resistiendo los decepcionantes resultados de predicción de sus primeros modelos. Fue hasta 1955 cuando en colaboración de Golderberg (1955) obtuvo las primeras señales alentadoras de su sistema, el cual parecía hacer un mejor pronóstico del PIB. Esto generó un considerable optimismo sobre el potencial del modelado empírico bajo el contexto de ecuaciones simultáneas, el cual fue descendiendo hasta culminar en los años setenta.

Las razones por las cuales se volvió a dudar de los modelos simultáneos fueron su poca capacidad predictiva respecto a los modelos ARIMA, basados en la metodología de Box-Jenkins (Naylor et al. 1972, Nelson, 1972); y el manejo deficiente de los datos de series de tiempo en modelos econométricos (Granger, 1969) y, Granger y Newbold, 1974). Estas críticas, junto con el desarrollo de algunas de las principales relaciones económicas empíricas, como la curva de Philips y la demanda de dinero, llevaron a una reevaluación del enfoque de ecuaciones simultáneas que finalizó con la crítica de Sims (1980).

En dicha crítica, Sims(1980) describió como inverosímiles las restricciones de identificación utilizadas para estimar los modelos estructurales. Ofreció como alternativa ignorar la estructura teórica y confiar totalmente en la forma sistemática de las series de tiempo de interés, para fines de predicción y de política. A pesar de lo anterior, permaneció la incertidumbre en cuanto a cómo introducir la estructura dinámica sin ser explicada por un marco teórico (Spanos 1990).

De acuerdo con Dixon la modelación se familiariza con el modelo de regresión lineal en el que una variable “y” es dependiente y donde “x1, x2,...,etc” son variables independientes. Los modelos de ecuaciones simultáneas son fundamentalmente diferentes a

un modelo de regresión lineal simple debido al número de variables endógenas que lo componen. Las variables que se consideran dependientes, son afectadas por otras y se les conoce como endógena. Éstas son las que explica el modelo.

Algunas variables endógenas afectan a las dependientes conjuntamente mediante un desfase, a éstas se les llama rezagadas. Las variables que entran en el sistema y afectan a las endógenas, pero no necesitan ser explicadas, se les denomina exógenas. Un sistema de ecuaciones simultáneas es aquél en el que las variables que aparecen de lado izquierdo también aparecen de lado derecho¹⁸.

De acuerdo con Loria et al. (2000) en los modelos de ecuaciones simultáneas se utilizan tres tipos de relaciones o ecuaciones:

- a) Ecuaciones de comportamiento: son las que establecen causalidades de variables exógenas y endógenas rezagadas o predeterminadas sobre las endógenas.
- b) Identidades contables: son las relaciones que se cumplen por definición para las unidades económicas (empresas, países, etc) dentro de un sistema de contabilidad. Por ejemplo: Activos = pasivos + capital
- c) Condiciones de equilibrio: son las expresiones que permiten balancear las cuentas de variables agregadas y cerrar bloques de ecuaciones, regularmente emplean un componente para igualarlas.

Con base en Spanos (1990) la forma estructural del sistema de ecuaciones simultáneas es:

$$\Gamma y_t + \Delta' x_t = \varepsilon_t \quad [\varepsilon_t | x_t] \sim IIN(0, \Sigma_t) \quad t \in T \quad (1)$$

dónde y_t es una matriz de variables endógenas y x_t una matriz de variables exógenas; y $\Gamma(g \times g)$ y $\Delta'(g \times k)$ están sujetas a restricciones teóricas a priori. De la forma estructural se puede obtener la forma reducida, la ecuación (15) muestra esta transformación:

$$\square \quad \bar{\Gamma} y_t = \Pi' x_t + u_t \quad [u_t | x_t] \sim NI(0, \Omega) \quad t \in T \quad (2)$$

¹⁸ En un sistema verdaderamente simultáneo todas las variables de lado izquierdo se determinan conjuntamente.

dónde $\Pi' = \Delta\Gamma^{-1}$ y $u_t = (\Gamma^{-1})\varepsilon_t$

Para Spanos (1990) ninguna de las dos formas se especifican al tomar en cuenta los datos, así como tampoco su estructura probabilística. Es decir no van acorde al enfoque econométrico de reducción probabilística. Spanos en concordancia con la tradición Bayesiana, sugiere que la forma reducida es adecuada para el análisis probabilístico (Zellner, 1971). Es decir, las propiedades estadísticas atribuidas a los estimadores estructurales y el resultado de las pruebas son, en general, inválidas a menos que la estructura probabilística, impuesta en los datos, sea válida en la forma reducida.

Spanos (1990) menciona que los métodos de estimación más populares para los parámetros estructurales son los de variables instrumentales, tal como mínimos cuadrados en dos etapas; pese a lo anterior, este tipo de método no especifica la forma reducida implícita. Esta práctica no sólo es cuestionable por razones de correcta especificación estadística, sino también puede conducir a problemas de identificación.

Con base en el enfoque de reducción probabilística, la forma reducida se especifica de la siguiente manera:

$$y_t = \Pi'x_t + u \quad t \in T \quad (3)$$

Para Spanos (1990) los principales supuestos estadísticos son:

- a) $D(y_t|x_t; \theta)$ una distribución normal.
- b) $E(y_t|X_t = x_t) = B'x_t$ es lineal en x .
- c) $Cov(y_t|X_t = x_t) = E(u_t u_t'|X_t = x_t) = \Omega$ homoscedasticidad en los parámetros.
- d) $\theta = (B, \Omega)$ donde $B = \Sigma_{22}^{-1}\Sigma_{21}$ y $\Omega = \Sigma_{11} - \Sigma_{12}\Sigma_{22}^{-1}\Sigma_{21}$, los parámetros estadísticos de interés, son invariantes en el tiempo.
- e) (y_1, y_2, \dots, y_t) es una muestra independiente, secuencialmente extraída de $D(y_t|x_t; \theta)$, $t=1, 2, \dots, T$.

En Spanos (1990), la visión de la forma reducida tiene muchas ventajas, entre ellas la dotación e interpretación estadística a los parámetros de la ecuación (3) en términos de los parámetros primarios de los procesos estocásticos observables $\{Z_t \equiv (y_t, X'_t)'\}$, $t \in T$, ya

que se prueba una relación directa entre los datos $D(z_1, z_2, \dots, z_T; \varphi)$ y la forma estructural de la ecuación 1. Además permite abordar la fase de re-especificación sin cambiar previamente la forma estructural. Es conveniente, en este sentido, que se consideren cuestiones teóricas de interés para una correcta especificación, pero no se debe dejar de lado la adecuación estadística. Cuando se habla de re-especificación, se dice que empieza una nueva búsqueda por un resumen adecuado de la información de la muestra.

Por otra parte se debe considerar el problema de identificación del sistema, lo cual puede resolverse a través de dos supuestos cruciales:

- i) Los estimadores en Π están identificados con respecto a los datos, y
- ii) El modelo estadístico representado por la forma reducida está bien definido.

Según Spanos (1990), esto es central, ya que si no se cumplen los supuestos, las estimaciones son inválidas. Asimismo, se argumenta que en cada caso los modelos estructurales deben ser re-especificados para reflejar los procesos de ajuste dinámico y no la condición de equilibrio estático usual.

Existen dos tipos de problemas en la identificación, la estadística y la estructural. La primera se refiere a la elección de un modelo estadístico bien definido entre los que se consideran aceptables, lo cual constituye una parte integral de la identificación estadística. Por su parte, la identificación estructural se refiere a la unicidad de los parámetros estructurales del modelo estadístico bien definido. Como consecuencia, se debe hacer una reparametrización estadística a una teoría, mediante la imposición de restricciones (Spanos, 1990). Esto asegura que la predicción y las simulaciones de políticas se basen en modelos que estén estadísticamente bien definidos¹⁹ y con significado teórico.

Como se puede observar, Spanos (1990), desarrolla y propone una alternativa, en referencia a los pioneros de la metodología (Klein et al) de cómo llevar a cabo la estimación de los sistemas de ecuaciones simultáneos. Específicamente, pone énfasis en la correcta especificación, y lo cual se cumple cuando se validan los supuestos probabilísticos.

¹⁹ El modelo estadístico bien especificado en la estimación estructural es hecha indirectamente mediante pruebas de restricciones de sobre-identificación y directamente mediante el análisis de los principales supuestos.

3.1.2 Autorregresivos con rezagos distribuidos (ARDL)

La metodología para estimar la forma reducida del sistema de ecuaciones simultáneo es la de autorregresivos con rezagos distribuidos. De acuerdo a Jennings y Gardiner (1999) se puede representar de la siguiente manera:

$$y_t = \alpha_0 + \beta_0 x_t + \alpha_1 y_{t-1} + \beta_1 x_{t-1} + u_t \quad (4)$$

Donde y_t es la variable endógena, y x_t es la variable exógena. Nótese en el modelo, que las variables tanto endógenas como exógenas, comparten el mismo número de rezagos. Cabe mencionar que este modelo considera los valores contemporáneos y los rezagos de las variables explicativas. u_t representa el componente estocástico que se comporta $iid \sim N(0, \sigma^2)$.

Cuando las series son de orden de integración I(1), se puede transformar el modelo anterior a su forma modelo corrector de errores (ECM), es decir un modelo estacionario. A continuación, se muestra dicha transformación. Se suma tanto $(y_{t-1} - y_{t-1})$ cómo $\beta_0(x_{t-1} - x_{t-1})$ a la ecuación 4:

$$y_t + (y_{t-1} - y_{t-1}) = \alpha_0 + \beta_0 x_t + \alpha_1 y_{t-1} + \beta_1 x_{t-1} + \beta_0 (x_{t-1} - x_{t-1}) + u_t \quad (5)$$

Si la ecuación (5) se reordena, se obtiene 6:

$$y_t - y_{t-1} = \alpha_0 - y_{t-1} + \alpha_1 y_{t-1} + \beta_0 x_t - \beta_0 x_{t-1} + \beta_1 x_{t-1} + \beta_0 x_{t-1} + u_t \quad (6)$$

Si se asume que $\Delta y_t = y_t - y_{t-1}$ y $\Delta x_t = x_t - x_{t-1}$ y se sustituye en 6:

$$\Delta y_t = \alpha_0 - y_{t-1} + \alpha_1 y_{t-1} + \beta_0 \Delta x_t + \beta_1 x_{t-1} + \beta_0 x_{t-1} + u_t \quad (7)$$

En 7, se reúnen las variables en niveles y al aplicar ciertas agrupaciones se obtiene:

$$\Delta y_t = \alpha_0 - ((1 - \alpha_1)y_{t-1} - (\beta_1 + \beta_0)x_{t-1}) + \beta_0 \Delta x_t + u_t \quad (8)$$

En la ecuación 8 se representa el modelo corrector de errores, el cual está conformado por dos partes. El largo plazo, o mejor conocido como el vector de cointegración

$((1-\alpha_1)y_{t-1} - (\beta_1 + \beta_0)x_{t-1})$ y el corto plazo que se muestra a través de las diferencias de las variables.

3.1.3 Metodología del VAR estructural

Para dar robustez a las estimaciones derivadas de los sistemas de ecuaciones simultáneos, se utiliza la metodología SVAR (Sims, 1986; Amisano y Giannini, 1997) que ofrece evidencia econométrica confiable sobre la relación entre los causantes del cambio en la temperatura y ésta.

El principal objetivo del SVAR, en el presente trabajo, es determinar las respuestas dinámicas de la temperatura ante innovaciones (choques independientes) en las variables que la afectan directamente, tanto de origen antropogénico, cómo de origen natural. En este método se combina el análisis de series de tiempo con la teoría económica y la teoría atmosférica. El SVAR es una buena alternativa y complemento para el enfoque tradicional VAR a-teórico (Sims, 1980), porque la teoría es considerada fundamental en el proceso de modelación (identificación).

Para iniciar se debe considerar un sistema VAR en su forma primitiva o estructural²⁰:

$$y_t = b_{10} - b_{12}z_t + \gamma_{11}y_{t-1} + \gamma_{12}z_{t-1} + \varepsilon_{y_t} \quad (9)$$

$$z_t = b_{20} - b_{21}y_t + \gamma_{21}y_{t-1} + \gamma_{22}z_{t-1} + \varepsilon_{z_t} \quad (10)$$

dónde y_t es afectada por los valores actuales y pasados de la secuencia de z_t y viceversa. Se asume que y_t y z_t son estacionarias, es decir, ε_{y_t} y ε_{z_t} son ruido blanco, independientes e idénticamente distribuidos, no correlacionados entre sí y, con desviaciones estándar constantes σ_y y σ_z .

La visualización del sistema en su forma estructural permite comprender mejor la metodología del SVAR. Al despejar $-b_{12}z_t$ y $-b_{21}y_t$ de (9) y (10) y expresarlo matricialmente, se obtiene:

$$\begin{bmatrix} 1 & b_{12} \\ b_{21} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_t \\ z_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{10} \\ b_{20} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_{t-1} \\ z_{t-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_{y_t} \\ \varepsilon_{z_t} \end{bmatrix}$$

Lo que podemos reescribir como:

²⁰La forma primitiva o estructural del VAR es aquella que contiene los elementos contemporáneos de cada serie que compone al sistema. (Enders,2003)

$$Bx_t = \Gamma_0 + \Gamma_1 x_{t-1} + \varepsilon_t \quad (11)$$

dónde

$$B = \begin{bmatrix} 1 & b_{12} \\ b_{21} & 1 \end{bmatrix}, x_t = \begin{bmatrix} y_t \\ z_t \end{bmatrix}, \Gamma_0 = \begin{bmatrix} b_{10} \\ b_{20} \end{bmatrix}, \Gamma_1 = \begin{bmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} \end{bmatrix}, x_{t-1} = \begin{bmatrix} y_{t-1} \\ z_{t-1} \end{bmatrix}, \varepsilon_t = \begin{bmatrix} \varepsilon_{y_t} \\ \varepsilon_{z_t} \end{bmatrix}$$

En (11) los errores en ε_t no se correlacionan, dado que la matriz B contiene las interacciones contemporáneas entre las variables. La matriz Γ_1 contiene todas las interacciones con desfase entre las mismas variables.

Pre-multiplicando toda la expresión (11) por B^{-1} (inversa de la matriz B) se obtiene el VAR en su forma reducida:

$$x_t = A_0 + A_1 x_{t-1} + e_t \quad (12)$$

dónde

$$A_0 = B^{-1}\Gamma_0, A_1 = B^{-1}\Gamma_1, \text{ y } e_t = B^{-1}\varepsilon_t$$

Nótese que el modelo VAR reducido (12) es una reparameterización de la especificación más general dada por el modelo VAR primitivo (11).

Para propósitos de notación, se puede definir a_{i0} como elemento i del vector A_0 , a_{ij} como el elemento en la fila i y columna j de la matriz A_1 , y e_{it} como el elemento i del vector e_t . Con ésta notación se puede reescribir (11) en su forma equivalente:

$$y_t = a_{10} + a_{11}y_{t-1} + a_{12}z_{t-1} + e_{1t} \quad (13)$$

$$z_t = a_{20} + a_{21}y_{t-1} + a_{22}z_{t-1} + e_{2t} \quad (14)$$

Al tener ambas formas del VAR, se puede notar que los términos de error de (13) y (14) (es decir, los residuales e_{1t} y e_{2t} de la forma reducida del VAR) contienen las innovaciones ε_{y_t} y ε_{z_t} de la forma estructural, es decir, son combinaciones lineales de los choques no correlacionados de ε_t . De esta manera $e_t = B^{-1}\varepsilon_t$, en donde se han recuperado las innovaciones del VAR primitivo.

Para poder identificar el modelo estructural en el VAR es necesario imponer $(n^2 - n)/2$ restricciones según la descomposición de Choleski, la cual requiere que todos los elementos por encima de la diagonal principal sean igual a cero (Enders,2003), es decir:

$$b_{12} = b_{13} = b_{14} = \dots = b_{1n} = 0$$

$$b_{23} = b_{24} = \dots = b_{2n} = 0$$

$$b_{34} = \dots = b_{3n} = 0$$

.

.

.

$$b_{n-1n} = 0$$

Así el sistema está justamente identificado²¹.

Por otra parte, Amisano y Giannini (1997) sugieren un marco de trabajo SVAR más general, que puede admitir una representación VAR con series no estacionarias como punto de partida para la especificación de un modelo SVAR. En presencia de cointegración, la estructuralización del modelo se realiza en dos etapas distintas: la primera es la identificación de las relaciones de equilibrio a largo plazo, la segunda es la identificación de las interacciones a corto plazo.

La estructura final de las ecuaciones instantáneas se logra mediante dos matrices (A y B):

$$AA(L)y_t = A\mu + A\varepsilon_t \tag{15}$$

$$A\varepsilon_t = Bu_t \tag{16}$$

Donde ε_t es un vector que incluye las innovaciones del VAR reducido y u_t es un vector que incluye las innovaciones del VAR primitivo (estructural). Adicionalmente, sabemos que $E(u_t) = 0$ y $E(u_t u_t') = I_t$. La identificación de las relaciones contemporáneas entre variables en la ecuación (15) requiere un conjunto de restricciones basadas en suposiciones teóricas. La matriz B es una matriz diagonal que normaliza las varianzas de las innovaciones estructurales e_t y la matriz A contiene las relaciones contemporáneas de interés. La estructura final se obtiene a partir de un modelo

²¹ El sistema no debe estar subidentificado.

correctamente identificado (una matriz A recientemente identificada). La validez de las restricciones impuestas se confirma mediante pruebas de identificación²².

A este tipo de modelo se le conoce como SVAR tipo AB y, según Amisano y Giannini (1997) es el más general. Sin embargo existen otros dos tipos que permiten estructurar al VAR, el modelo K, que es el modelo principal (KEY model) o inicial, y el modelo C (ver Apéndice A). El uso de la metodología SVAR se puede realizar en tres pasos. Primero, se calcula el modelo VAR reducido y se estima una matriz de innovaciones. En segundo lugar, se usan esas innovaciones para calcular las matrices A y B mediante la metodología de FIML (máxima verosimilitud de información completa). Finalmente, se grafican los impulsos-respuesta y se analizan los resultados (Arenas, 2013).

La revisión de los hechos estilizados de las variables del modelo permite concluir que, al tratarse de series de tiempo, las metodologías, antes descritas, son adecuadas para describir los mecanismos generadores del cambio climático. Además, la metodología de sistemas de ecuaciones simultáneas permite la simulación y pronóstico de las variables endógenas, que son aquellas que van a ser explicadas. Su estructura se determina bajo un marco teórico previamente establecido. Por otra parte y para brindar mayor robustez en la modelación, se presenta un modelo SVAR, que recupera el efecto contemporáneo de las variables utilizadas; lo cual permite comprobar las relaciones teóricas entre ellas. Para ello, se auxilia de los impulsos-respuesta que se obtienen de las innovaciones del modelo. Es indispensable que se verifique la significancia de las restricciones. En nuestro caso la hipótesis que se quiere demostrar es que tanto los forzamientos antropogénico y natural causan la temperatura. La anterior metodología nos da la herramienta probabilística y econométrica, que vincula la parte teórica, necesaria para sustentar la hipótesis y que justifica el esquema del modelo teórico.

²² Esta prueba de identificación sigue una distribución ji cuadrada.

4 Capítulo IV: Detección, atribución y cuantificación de los mecanismos del cambio climático

Con base a los capítulos anteriores, en este apartado se presentan los resultados del sistema de ecuaciones simultáneas y del SVAR que reflejan el esquema de los mecanismos que causan las alteraciones en la temperatura como variable próxi del cambio climático.

A razón de las pruebas de correcta especificación, se concluyó que los modelos son consistentes al estimar ecuación por ecuación a través del método de autorregresivos con rezagos distribuidos²³. La especificación de las ecuaciones se realizó tomando en cuenta las consideraciones teóricas básicas sobre la importancia potencial de las principales variables del esquema de mecanismos del cambio climático discutidas en los primeros dos capítulos. No obstante, la forma final se obtiene a través de pruebas de correcta especificación.

En este tipo de modelos los datos no refieren ninguna intención teórica, sino busca representar el sistema con un nivel altamente agregado (Spanos y Papadopoulou, 2013). El modelo econométrico consta de 19 ecuaciones de comportamiento; de las cuales 9 pertenecen al bloque socioeconómico, 8 al atmosférico y 2 variables exógenas que se obtienen mediante un proceso AR. El número de rezagos para cada modelo se eligió de acuerdo a la correcta especificación del modelo y bajo el criterio de rezagos óptimos. A continuación se presentan las ecuaciones finales.

4.1 Especificación del modelo econométrico de los mecanismos del cambio climático

- a) $\log(prp_t) = \alpha_0 + \alpha_1 \log(prp_{t-1}) + \beta_1 D + e_t$
- b) $\log(pp_t) = \alpha_0 + \alpha_1 \log(pp_{t-1}) + \alpha_2 \log(prp_t) + \alpha_3 \log(prp_{t-1}) + \alpha_4 \log(pa_t) + \beta_1 D + e_t$
- c) $\log(pa_t) = \alpha_0 + \alpha_1 \log(pa_{t-1}) + \alpha_2 \log(pp_t) + \alpha_3 \log(pp_{t-1}) + \alpha_4 \log(pob_t) + \alpha_5 \log(ipa_t) + \beta_1 D + e_t$
- d) $\log(ipa_t) = \alpha_0 + \alpha_1 \log(ipa_{t-1}) + \alpha_2 \log(ipa_{t-2}) + \alpha_3 \log(ipa_{t-3}) + \alpha_4 \log(pa_{t-1}) + \alpha_5 \log(tg_t) + \beta_1 D + e_t$
- e) $\log(ipi_t) = \alpha_0 + \alpha_1 \log(ipi_{t-1}) + \alpha_2 \log(cem_t) + \alpha_3 \log(cem_{t-1}) + \alpha_4 \log(pob_{t-1}) + \alpha_5 \log(pob_{t-2}) + \alpha_6 \log(pob_{t-3}) + \alpha_7 \log(ifbk_t) + \alpha_8 \log(ifbk_{t-1}) + \alpha_9 \log(pp_t) + \alpha_{10} \log(pp_{t-1}) + \beta_1 D + e_t$
- f) $\log(cem) = \alpha_0 + \alpha_1 \log(cem_{t-1}) + \alpha_2 \log(cem_{t-2}) + \alpha_3 \log(pp_{t-1}) + \alpha_4 \log(pp_{t-2}) + \alpha_5 \log(tg_{t-3}) + \alpha_6 \log(ipi_t) + \beta_1 D + \gamma_1 t + e_t$

²³ Las variables al ser estacionarias permiten el uso de dicha metodología (ver raíces unitarias es el anexo).

- g) $\log(fbkt_t) = \alpha_0 + \alpha_1 \log(fbkt_{t-1}) + \alpha_2 \log(fbkt_{t-2}) + \alpha_3 \log(pp_t) + \alpha_4 \log(cem_t) + \beta_1 D + \gamma_1 t + e_t$
- h) $\log(tn_t) = \alpha_0 + \alpha_1 \log(tn_{t-1}) + \alpha_2 \log(ipi_t) + \alpha_3 \log(ipi_{t-1}) + \alpha_4 \log(tg_t) + \beta_1 D + e_t$
- i) $\log(tm_t) = \alpha_0 + \alpha_1 \log(tm_{t-1}) + \alpha_2 \log(tm_{t-2}) + \alpha_3 \log(ipi_{t-1}) + \alpha_4 \log(tg_{t-1}) + \beta_1 D + e_t$
- j) $\log(pob_t) = \alpha_0 + \alpha_1 \log(pob_{t-1}) + \alpha_2 \log(pob_{t-2}) + \alpha_3 \log(pob_{t-3}) + \alpha_4 \log(pob_{t-4}) + \alpha_5 \log(pob_{t-5}) + \alpha_6 \log(nat_{t-1}) + \alpha_7 \log(mor_{t-1}) + \beta_1 D + \gamma_1 t + e_t$
- k) $\log(ist_t) = \alpha_0 + \alpha_1 \log(ist_{t-1}) + \beta_1 D + \delta_1 S + e_t$
- l) $egei_t = \alpha_0 + \alpha_1 (egei_{t-1}) + \alpha_2 (ipi_t) + \alpha_3 (ipi_{t-1}) + \alpha_4 (ipa_t) + \alpha_5 (ipa_{t-1}) + \alpha_6 \log(pop_t) + \alpha_7 \log(cem_t) + \alpha_8 \log(cem_{t-1}) + \beta_1 D + \gamma_1 t + e_t$
- m) $cco_{2t} = \alpha_0 + \alpha_1 (cco_{2t-1}) + \alpha_2 (cco_{2t-2}) + \alpha_3 (cco_{2t-3}) + \alpha_4 (cco_{2t-4}) + \alpha_5 (cco_{2t-5}) + \alpha_6 \log(cco_{2t-6}) + \alpha_7 \log(cco_{2t-7}) + \alpha_8 (egei_{t-4}) + \alpha_9 (egei_{t-5}) + \beta_1 D + \gamma_1 t + e_t$
- n) $cn_2o_t = \alpha_0 + \alpha_1 (cn_2o_{t-1}) + \alpha_2 (cn_2o_{t-2}) + \alpha_3 (cn_2o_{t-3}) + \alpha_4 (cn_2o_{t-4}) + \alpha_5 (cn_2o_{t-5}) + \alpha_6 \log(cn_2o_{t-6}) + \alpha_7 \log(egei_{t-5}) + \beta_1 D + \gamma_1 t + e_t$
- o) $cch_{4t} = \alpha_0 + \alpha_1 (cch_{4t-1}) + \alpha_2 (cch_{4t-2}) + \alpha_3 (cch_{4t-3}) + \alpha_4 (cch_{4t-4}) + \alpha_5 (cch_{4t-5}) + \alpha_6 \log(egei_t) + \beta_1 D + \gamma_1 t + e_t$
- p) $frs_t = \alpha_0 + \alpha_1 (frs_{t-1}) + \alpha_2 (frs_{t-2}) + \alpha_3 (frs_{t-3}) + \alpha_4 (frs_{t-4}) + \alpha_5 \log(ist_t) + \alpha_6 \log(ist_{t-1}) + \alpha_7 \log(ist_{t-2}) + \beta_1 D + \delta_1 S + e_t$
- q) $fra_t = \alpha_0 + \alpha_1 (fra_{t-1}) + \alpha_2 (fra_{t-2}) + \alpha_3 (fra_{t-3}) + \alpha_4 (fra_{t-4}) + \alpha_5 \log(cn_t) + \alpha_6 \log(cn_{t-1}) + \alpha_7 \log(cn_{t-2}) + \beta_1 D + e_t$
- r) $frn_t = \alpha_0 + \alpha_1 (frn_{t-1}) + \alpha_2 (frn_{t-2}) + \alpha_3 (frn_{t-3}) + \alpha_4 (frs_t) + \alpha_5 (frs_{t-1}) + \alpha_6 (emvol_t) + \alpha_7 (emvol_{t-1}) + \beta_1 D + e_t$
- s) $tg_t = \alpha_0 + \alpha_1 (tg_{t-1}) + \alpha_2 (tg_{t-2}) + \alpha_3 (fra_t) + \alpha_4 (fra_{t-1}) + \alpha_5 (fra_{t-2}) + \alpha_6 (fra_{t-3}) + \alpha_7 (frn_t) + \beta_1 D + \delta_1 S + e_t$

Relaciones entre las variables

$$pp = f(prp, pa) ; f_{prp, pa} > 0 \quad (17)$$

$$pa = f(pp, ipa, pop) ; f_{pp, pop} > 0, f_{ipa} < 0 \quad (18)$$

$$ipa = f(pa, tg, ifbk) ; f_{ifbk} > 0, f_{pa, tg} < 0 \quad (19)$$

$$ipi = f(pp, ifbk, cem, pop) ; f_{ifbk, cem, pop} > 0, f_{pp} < 0 \quad (20)$$

$$cem = f(pp, ipi, tg) ; f_{tg, ipi} > 0, f_{pp} < 0 \quad (21)$$

$$ifbk = f(cem, pp) ; f_{cem, pp} > 0 \quad (22)$$

$$pob = f(nat, mor) ; f_{nat} > 0, f_{mor} < 0 \quad (23)$$

$$tn = f(ipi, tg) ; f_{ipi, tg} < 0 \quad (24)$$

$$tm = f(tg, ipi); f_{tg,ipi} < 0 \quad (25)$$

$$ghg = f(pop, cem, ipi, ipa); f_{pop,cem,ipi,ipa} > 0 \quad (26)$$

$$cn = f(ghg); f_{ghg} > 0 \quad (27)$$

$$fra = f(cn); f_{cn} > 0 \quad (28)$$

$$frs = f(tsi); f_{tsi} > 0 \quad (29)$$

$$frn = f(frs, ev); f_{frs} > 0, f_{ev} < 0 \quad (30)$$

$$tg = f(fra, frn); f_{tnfra,frn} > 0 \quad (31)$$

Como se comentó en el marco teórico, la variable más exógena del bloque socioeconómico es la producción de petróleo, la cual se encuentra determinada por sí misma en el tiempo (ver a). La ecuación (b) describe los precios del petróleo, los cuales quedaron en función de la producción de este bien y de los precios de los alimentos. Simultáneamente, las variables que explican a estos últimos (ecuación c) son los precios del petróleo, la producción agrícola, y la población como variable proxy de la demanda de bienes primarios. Las ecuaciones (d) y (e) presentan las funciones de producción agrícola e industrial. La primera depende de los precios de los alimentos, de la temperatura y de la inversión. La segunda está en función de los precios del petróleo, del consumo de energía, de la población y de la formación bruta de capital.

El consumo de energía aparece en la ecuación (f) y es determinado por los precios de los energéticos, por la producción industrial y por la temperatura. Esta última tiene relevancia por dos razones; ayuda a cerrar el ciclo de los mecanismos del cambio climático y representa la necesidad de adaptación a climas extremos. La formación bruta de capital se encuentra en la ecuación (g) y está en función del consumo de energía y los precios del petróleo.

Por otro lado, se presenta en la ecuación (j) la población, la cual depende de la natalidad y la mortalidad, ya que éstas definen su ritmo de crecimiento con base en la teoría de la transición demográfica discutida en los hechos estilizados. Las tasas de natalidad y mortalidad, que se encuentran en las ecuaciones (h) e (i), están en función de la producción y la temperatura. Por una parte, la producción representa el nivel de ingresos y el grado de

desarrollo social, lo cual implica mayor educación y avance en técnicas médicas, para el control de la natalidad y la disminución de los fallecimientos. Mientras que la temperatura influye de forma positiva a la tasa de mortalidad a través de mayor recurrencia de eventos extremos causantes de muertes, principalmente en las regiones menos desarrolladas; el efecto en la natalidad es negativo, al causar efectos negativos en la fecundación.

En la ecuación (l) se presentan los causantes finales de las emisiones de gases de efecto invernadero como la población, el consumo de energía mundial y la producción. Dicha especificación es muy utilizada por algunos estudiosos de la materia (Jiang y Hardee,2011; O'Neill,2013). Como se comentó en los trabajos previos, la población es importante como determinante antropogénico porque su dinámica mantiene un efecto directo en la producción y en el consumo de bienes y servicios. Esto genera mayores emisiones debido a que los procesos productivos en el sistema económico actual son altamente contaminantes a causa de la quema de combustibles fósiles. Las emisiones determinan las concentraciones de GEI (ecuaciones m, n y o) de forma positiva y se encuentran en función del potencial de calentamiento de cada uno de los GEI. El aumento en las concentraciones provoca un forzamiento radiativo positivo, es decir un calentamiento. Esta relación se puede ver en la ecuación (q).

En contraste con los determinantes de origen antropogénico, en la ecuación (k) aparece el autorregresivo de la irradiación solar que, de acuerdo al esquema 1, es la variable más exógena del mecanismo natural. Esta determina al forzamiento radiativo solar de forma directa, la cual se encuentra en la ecuación (p) y afecta de igual manera al forzamiento radiativo natural que a su vez recibe el impacto negativo de las emisiones volcánicas.

La ecuación (s) establece la especificación final de la temperatura, La cual absorbe los efectos finales de los forzamientos radiativos, tanto natural como antropogénico. Se puede observar que no es necesario imponer una tendencia determinística debido a que ésta es capturada por la tendencia de las variables que determinan a las previas. En este caso, aparece heredada de las variables que si la contienen tales como, el consumo de energía mundial y la población. Lo anterior concuerda con la conclusión de Gay, Sánchez y Estrada (2009), la cual afirma que la temperatura presenta una tendencia determinística con un cambio estructural y no precisamente la existencia de una tendencia estocástica. Todo lo mencionado describe la

especificación empírica del esquema de los mecanismos del cambio climático analizado en el capítulo I.

4.2 *Validación y resultados del modelo econométrico socioeconómico climático*

La validación del modelo es importante porque nos permite decidir si las especificaciones hechas anteriormente representan en realidad el mecanismo generador de los datos o, si es necesaria la re-especificación del modelo para lograr replicar el comportamiento del sistema climático. Esta brinda la seguridad de hacer inferencia con los resultados del modelo si las variables que lo integran, así como los mecanismos propuestos, muestran realmente el comportamiento que origina el cambio climático. A través de las pruebas de correcta especificación se puede asegurar que el modelo econométrico cumple con los supuestos básicos probabilísticos (normalidad, linealidad, independencia y homogeneidad) y por lo tanto, se confirma que se trata de un modelo conformado de ecuaciones independientes e idénticamente distribuidas con media y varianzas constantes (iid)²⁴.

Lo anterior testifica la fiabilidad de la inferencia, en el momento que se garantiza que las probabilidades de los errores muestrales asociados están estrechamente aproximados por los datos reales. A continuación se analizan las elasticidades de las variables más importantes del mecanismo de transmisión del cambio climático. Se hace alusión únicamente a los factores del mecanismo antropogénico. Se comienza con las variables de la producción debido a que representan uno de los principales factores económicos generadores de emisiones de GEI.

La ecuación (t) presenta la relación del índice de producción agrícola (ipa) con sus determinantes.

$$t) \quad \log(ipa_t) = 0.351 + 0.807 * \log(ipa_{t-1}) + 0.171 * \log(ipa_{t-2}) - 0.102 * \log(ipa_{t-3}) + 0.012 * \log(ipa_{t-1}) - 0.030 * (tg_t) + \beta_1 D + e_t$$

De acuerdo a los resultados del modelo, el incremento en una unidad porcentual de los precios de los alimentos, provoca un aumento de 0.012% en la variable ipa, como consecuencia del incentivo que genera un mayor pago a la producción (Labini, 1988). Por su parte, el incremento en una unidad de la temperatura global genera una disminución de la producción agrícola en 3.0%. Estos resultados muestran el impacto de la temperatura en la economía global, pero toma más relevancia cuando se hace un análisis regional (Rao y Samarth, 2010).

²⁴ Las pruebas de correcta especificación se presentan en el anexo estadístico.

La razón de esto último es que existen países subdesarrollados y en desarrollo fuertemente dependientes del sector agrícola. Las anomalías en la temperatura frecuentemente cambian el ciclo de las cosechas y algunas veces dicho fenómeno elimina en su totalidad la producción agropecuaria, lo que provoca la vulnerabilidad económica de dichos países y la seguridad alimentaria mundial (IPCC,2013).

En la ecuación (u) se pueden observar los resultados del modelo del índice de producción industrial (ipi). Éste se relaciona de manera positiva con el consumo de energía mundial, la formación bruta de capital y la población.

$$u) \quad (ipi_t) = -6.588 + 0.922 * (ipi_{t-1}) + 24317.46 * \log(cem_t) - 23757.72 \log(cem_{t-1}) + 162.33 * (pob_{t-1}) - 331.19 * (pob_{t-2}) + 170.37 * (pob_{t-3}) + 0.082 * (ifbk_t) - 0.069 * (ifbk_{t-1}) + 0.107 * (pp_t) - 0.069 * (pp_{t-1}) + \beta_1 D + e_t$$

El incremento en una unidad porcentual del consumo de energía, genera un aumento de 5.59 unidades en la producción industrial. Por su parte, la población tiene un impacto en ipi de 1.70 unidades. Asimismo, la formación bruta de capital genera un aumento en ipi de 0.013 unidades. Finalmente, los precios del petróleo tienen un impacto negativo sobre el índice de producción industrial de 0.015 unidades.

El comportamiento de las variables de formación bruta de capital y de la población como variables proxys del capital y trabajo, cumplen con la teoría de la función de producción clásica mencionada en el marco teórico. Los factores de consumo de energía y los precios del petróleo se añaden en la ecuación debido a su importancia en el sistema productivo actual. El consumo presenta un signo positivo, ya que un mayor uso de energía genera más producción. Contrario es el signo de los precios del petróleo que representan el nivel general de precios. Esto por los costos de los factores que incluyen los insumos intermedios.

Por su parte, el consumo de energía es una variable importante en la producción, en el desarrollo económico, y en la realización de las actividades de la vida diaria. Dicha dependencia se debe a la tecnología industrial preponderante a base de combustibles fósiles. De esta manera los determinantes del consumo de energía mundial, mostradas en la ecuación (v), son los precios del petróleo, la producción y la temperatura. Los resultados de la estimación son los siguientes. El incremento en una unidad de los precios del petróleo

genera un decremento en el consumo de energía de 0.11%. Por su parte, el incremento en una unidad de la temperatura provoca un incremento en el consumo de energía mundial (cem) de 0.80%. Por último, la producción industrial tiene un efecto positivo en cem de 0.94 %.

$$v) \log(\text{cem}) = 0.189 + 1.476 * \log(\text{cem}_{t-1}) - 0.505 * \log(\text{cem}_{t-2}) - 0.002 * \text{pp}_{t-1} + 0.001 * \text{pp}_{t-2} + 0.008 * \text{tg}_{t-3} + 0.939 * \log(\text{ipi}_t) + \beta_1 D + \gamma_1 t + e_t$$

El primer resultado de la ecuación refleja la relación inversa entre precio y cantidad, la cual se sustenta en la teoría de la demanda microeconómica (Varian, 2010). El segundo sugiere que los cambios en los patrones de la temperatura, traducidos en eventos de climas extremos generan mayor consumo de energía para enfrentar las adversidades (Jiang y Hardee, 2011). El tercer resultado muestra la existencia de la relación positiva entre el cem e ipi, debido a que el consumo de energía es uno de los principales insumos para llevar a cabo la producción mundial. Por lo tanto, un incremento en la producción industrial requerirá mayores cantidades de energía. Hasta este momento se han analizado los resultados de los principales factores económicos que causan el cambio climático. A continuación, se revisará otra de las causas de dicho fenómeno.

En la revisión de trabajos previos, la población es el precursor más importante de los mecanismos antropogénicos. Su especificación se encuentra en la ecuación (w), en dónde se observa que está determinada por el comportamiento de la natalidad y de la mortalidad. Los resultados son los siguientes, el incremento en una unidad porcentual en la natalidad provoca un aumento en la población de 0.014%. Por su parte la mortalidad tiene un efecto negativo en la población, de 0.001%.

$$w) \log(\text{pob}_t) = 0.010 + 1.287 * \log(\text{pob}_{t-1}) - 0.299 * \log(\text{pob}_{t-2}) + 0.014 * \log(\text{nat}_{t-1}) + 0.030 * \log(\text{mor}_t) - 0.031 * \log(\text{mor}_{t-1}) + \beta_1 D + e_t$$

Los resultados anteriores implican que el incremento en la población es provocado principalmente por el comportamiento de la natalidad, ya que el desarrollo en las técnicas médicas ha generado una probabilidad de supervivencia mayor en los nacimientos, a pesar de la disminución de la tasa de fecundidad (Rao y Samarth, 2011). Por la misma razón, la tasa de mortalidad ha disminuido; lo cual se ve reflejado en un coeficiente muy bajo en la estimación. Las tres variables analizadas previamente pertenecen al bloque económico y

demográfico, y son las principales predecesoras de las emisiones de GEI (O'Neill, et al, 2011).

Los resultados del mecanismo generador de las emisiones de GEI aparecen en la ecuación (x). En ésta se encuentran los efectos de la población, la producción y el consumo de energía, los cuales corresponden a lo esperado por la teoría expuesta en capítulos anteriores.

$$x) \quad egei_t = -35581 + 0.738 * (egei_{t-1}) + 13.673 * (ipi_t) - 10.075 * (ipi_{t-1}) + 18.343 * (ipa_t) - 16.770 * (ipa_{t-1}) + 1552 * \log(pop_t) + 1738 * \log(cem_t) - 1255 * \log(cem_{t-1}) + \beta_1 D - \gamma * t + e_t$$

Todos los determinantes tienen un efecto positivo que hace que las emisiones aumenten. La variable que mayor impacto tiene es la población que al expandirse porcentualmente provoca un aumento en las emisiones de 15.5 unidades. En segundo lugar, se encuentra el consumo de energía que al acrecentarse en 1% implica que las emisiones crezcan en 4.83 unidades. En tercer y cuarto lugar se encuentra la producción industrial y agrícola cuyas elasticidades son 3.59 y 1.57 puntos de las emisiones. Es importante evaluar el impacto de cada uno de estos precursores, ya que de ésta manera se pueden determinar las posibles políticas de contención y disminución de emisiones.

Lo anterior permite analizar las consecuencias de la dinámica demográfica en el desarrollo económico y en la generación de emisiones. El crecimiento de la población impulsa a la economía al generar mayor demanda de bienes y servicios, pero esto se traduce en mayores emisiones. Esto se explica a través del comportamiento de la población (migración, urbanización, etc.) y como consecuencia del sistema productivo actual que es altamente contaminante al hacer uso extensivo de combustibles fósiles.

Las emisiones preceden a las concentraciones. La cantidad de éstas varían de acuerdo a las características químicas de los GEI y pueden reaccionar con periodos de retraso (IPCC, 2001). Algunos tienen vida más larga que otros, lo cual hace necesaria la modelación individual de los principales gases contaminantes.

En las ecuaciones (y), (z) y (aa) se muestran la relación de las emisiones con las concentraciones de gases de efecto invernadero. El impacto de las emisiones en las concentraciones de dióxido de carbono es positivo, con un coeficiente de 0.417 unidades.

Este resultado confirma la hipótesis de que el dióxido de carbono es el elemento que más se genera (IPCC, 2013).

$$y) \quad cco_{2t} = 296.703 + 2.605 * (cco_{2t-1}) - 3.446 * (cco_{2t-2}) + 3.679 * (cco_{2t-3}) - 3.141(cco_{2t-4}) + 2.107 * (cco_{2t-5}) - 1.109 * \log(cco_{2t-6}) + 0.302 * \log(cco_{2t-7}) + 41.796 * \log(egei_{t-4}) + \beta_1 D + \gamma * t + e_t$$

En segundo lugar de los GEI atmosféricos más abundantes es el óxido nitroso. El impacto de las emisiones de gases de efecto invernadero es positivo. Es decir, el incremento en una unidad porcentual de egei provoca un incremento de cn_2o_t en 0.142 unidades.

$$z) \quad cn_2o_t = 0.617 + 2.425 * (cn_2o_{t-1}) - 2.820 * (cn_2o_{t-2}) + 2.699 * (cn_2o_{t-3}) - 1.874 * (cn_2o_{t-4}) + 0.457 * (cn_2o_{t-5}) + 0.106 * \log(cn_2o_{t-6}) + 14.246 * \log(egei_{t-5}) + \beta_1 D + 0.003 * t + e_t$$

Finalmente, el incremento en una unidad porcentual de las emisiones genera un aumento de 0.013 unidades en las concentraciones de metano. Esto indica que el metano actualmente se ha reducido de acuerdo a la información presentada por el IPCC-AR5. Lo que posiciona a dicho gas en tercer lugar.

$$aa) \quad cch_{4t} = -6.653 + 2.511 * (cch_{4t-1}) - 2.265 * (cch_{4t-2}) + 1.042 * (cch_{4t-3}) - 0.367 * (cch_{4t-4}) + 0.076 * (cch_{4t-5}) + 1.301 * \log(egei_t) + \beta_1 D + 2.218 * t + e_t$$

Las estimaciones revelan que el mecanismo antropogénico del cambio climático descrito con anterioridad se cumple empíricamente. Después del análisis se puede concluir que los principales factores responsables del incremento de las emisiones de GEI son la población y el consumo de energía en 15.5 y 4.83 unidades respectivamente. La razón de lo anterior es la siguiente. Primero, la población ha incrementado de manera sustancial a partir de la década de los sesentas del siglo XX. El desarrollo científico en el área médica ha permitido que esto suceda, como resultado se observa un incremento en las tasas de natalidad y un decremento en la mortalidad (Lutz y Qiang, 2002).

Este fenómeno ha generado mayores tasas de producción y consumo y por ende un incremento de las emisiones de GEI. La propia dinámica de la población y los cambios de uso de suelo principalmente por la deforestación dan como resultado mayores emisiones. Segundo, el desarrollo tecnológico del sistema de producción capitalista se basa en los

insumos de origen fósil, los cuales son, en su mayoría, altamente contaminantes (EPA)²⁵. El acrecentamiento de emisiones de GEI es provocado por el consumo de energía. También se cumple el mecanismo de transmisión de las emisiones hacia las concentraciones y de éstas hacia el forzamiento radiativo antropogénico; lo cual permite dar paso al análisis estructural del SVAR donde se obtienen los resultados del efecto de los forzamientos radiativos en la temperatura.

4.3 *Los forzamientos radiativos como causantes directos de las anomalías en la temperatura*

Una vez revisadas las relaciones de las variables que afectan a los forzamientos radiativos es pertinente analizar de qué manera se relacionan éstas últimas con la temperatura. Precisamente, la causalidad en el sentido de Granger ofrece un enfoque más confiable de las atribuciones y resultados de cada uno de los forzamientos hacia el cambio climático. En una serie de tiempo la variable x (forzamiento radiativo antropogénico o natural) causa en el sentido de Granger a y (temperatura), si los valores pasados de x ayudan a predecir el valor actual de y dada otra información importante (Kaufmann, 2014). En el cuadro 4 se muestran dichas interacciones.

Cuadro 4. Causalidad en el sentido de Granger para el modelo de Temperatura

TG		
Variable	Estadístico	Prob.
FRA	15.848	0.014
FRN	8.670	0.193
Conjunto	22.340	0.033

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de la prueba de causalidad indican que el forzamiento radiativo antropogénico es el mayor causante de las anomalías en la temperatura y no el correspondiente al natural. Sin embargo, el hecho de que el último no cause directamente a la temperatura no significa que no sea importante, sino que su efecto es en menor medida, ya que la prueba conjunta es significativa. Estos resultados permiten plantear las posibles restricciones que se pueden imponer en el modelo SVAR que a continuación se presentará.

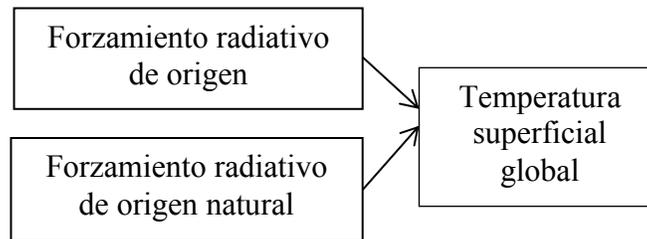
²⁵ <http://www3.epa.gov/climatechange/ghgemissions/global.html>

4.4 Relación entre los forzamientos radiativos y la temperatura

Para comprobar las relaciones teóricas entre los forzamientos y la temperatura se estimó el modelo SVAR, el cual permite evaluar los mecanismos directos entre estos. Solo es posible la identificación de las iteraciones contemporáneas (de corto plazo) debido a que las variables que se utilizan son estacionarias en niveles.

De acuerdo a la teoría fundamentada en el IPCC, planteada anteriormente, las anomalías presentes en la temperatura se deben principalmente a los forzamientos radiativos provenientes de las actividades humanas y poco a las naturales (esto se observa en las causalidades de Granger). Se inicia el SVAR con un modelo exactamente identificado para obtener la estructura final de las ecuaciones que se presentan en el esquema 2.

Esquema 2. Mecanismo de transmisión de los forzamientos radiativos a la temperatura



Fuente: Elaboración propia

La forma más sensata de llegar a la correcta especificación es a través de la eliminación de los parámetros que no sean significativos (ver imagen 1). La estructura final comprueba la hipótesis planteada entre los forzamientos y la temperatura.

Imagen 1. Restricciones del SVAR de temperatura²⁶

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ a_{31} & a_{32} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{FRA_t} \\ \varepsilon_{FRN_t} \\ \varepsilon_{TG_t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & 0 & 0 \\ 0 & b_{22} & 0 \\ 0 & 0 & b_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{FRA_t} \\ u_{FRN_t} \\ u_{TG_t} \end{bmatrix}$$

Fuente: Elaboración propia

Las restricciones de la matriz se pueden reescribir como:

$$\varepsilon_{FRA_t} = b_{11}u_{FRA_t}$$

²⁶ En el modelo planteado la diagonal de la matriz B cumple con la sola tarea de normalizar las varianzas de los residuales.

$$\begin{aligned}\varepsilon_{FRN_t} &= b_{22}u_{FRN_t} \\ \varepsilon_{TG_t} + a_{31}\varepsilon_{FRA_t} + a_{32}\varepsilon_{FRN_t} &= b_{33}u_{TG_t}\end{aligned}$$

De esta manera, para obtener el efecto final se deriva ε_{TG_t} con respecto a ε_{FRA_t} y

ε_{FRN_t} :

$$\varepsilon_{TG_t} = -a_{31}\varepsilon_{FRA_t} - a_{32}\varepsilon_{FRN_t} + b_{33}u_{TG_t}$$

$$\frac{d\varepsilon_{TG_t}}{d\varepsilon_{FRA_t}} = -a_{31}$$

$$\frac{d\varepsilon_{TG_t}}{d\varepsilon_{FRN_t}} = -a_{32}$$

$$\frac{d\varepsilon_{TG_t}}{d\varepsilon_{FRA_t}} = -(-8.618) = 8.618$$

$$\frac{d\varepsilon_{TG_t}}{d\varepsilon_{FRN_t}} = -(0.568) = -0.568$$

Los resultados sugieren que el efecto del forzamiento radiativo antropogénico es positivo (8.61), contrario al natural cuya elasticidad es negativa de 0.56. Esto implica que la tierra se encuentra en una fase de enfriamiento, lo cual concuerda con recientes declaraciones del IPCC (2013). No obstante, el factor antrópico contrasta con este efecto, y al ser mayor y más significativo se obtiene un resultado total positivo. Para dar robustez a la credibilidad de los resultados obtenidos en este modelo se aplicó la prueba de impulsos-respuestas.

4.5 Respuesta de la temperatura a choques en los forzamientos radiativos

El análisis de impulso-respuesta es un tipo de simulación que se hace sobre las innovaciones del modelo que contienen la dinámica conjunta de las variables. Un impacto en una variable del sistema transmite toda la información de las endógenas a través de la estructura dinámica (rezagos) del modelo. Normalmente las variables suelen ser correlacionadas, lo cual implica que tienen un componente común que no necesariamente corresponde a alguna variable específica.

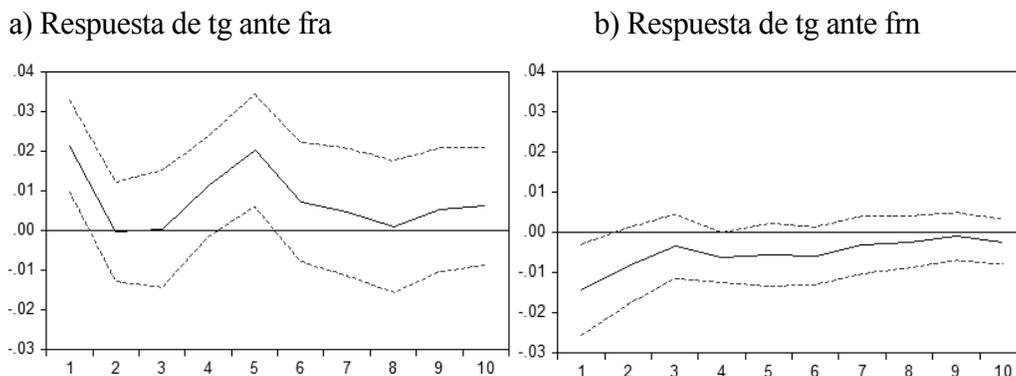
Por esta razón, es necesario realizar una transformación de manera que los residuales resulten no correlacionados. Para esto, el método de Cholesky es el indicado. Éste utiliza la inversa del factor de Cholesky para la matriz de varianzas y covarianzas con la finalidad de orthogonalizar los impulsos. Lo anterior impone un orden para las variables en el modelo VAR y

atribuye todos los efectos a cualquier componente común para la primera variable del sistema. Una vez realizada la transformación resulta sencillo interpretar los resultados como un cambio en la i -ésima variable endógena $y_{i,t}$. En la gráfica 14 se puede observar la respuesta de la temperatura ante un cambio de cada uno de los forzamientos radiativos.

En el panel a) de la figura 14 se presenta la respuesta de la temperatura cuando cambia el forzamiento antrópico, el cual es positivo y significativo durante los 10 periodos de análisis. Este resultado concuerda con lo obtenido en los coeficientes del SVAR. Esto implica que las actividades humanas han sido las principales responsables del incremento en las anomalías en la temperatura.

En contraste, la respuesta de la temperatura correspondiente a un choque en el forzamiento natural es negativa. Lo que confirma la fase de enfriamiento asociada al ciclo solar. Una vez realizado el análisis estadístico de las estimaciones, se presenta la simulación y pronóstico de las variables más importantes del mecanismo de cambio climático.

Figura 14. Impulsos respuesta del modelo de temperatura



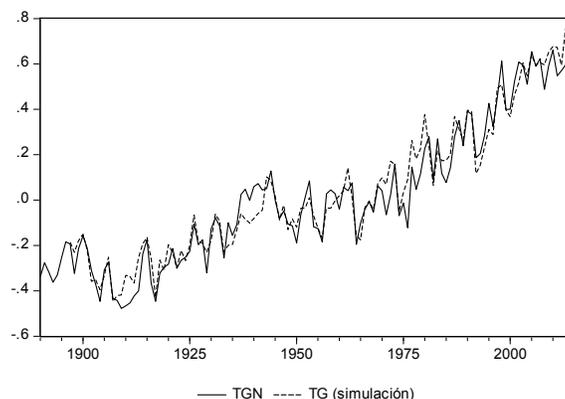
Fuente: Elaboración propia

4.6 Simulación

Uno de los objetivos más importantes en series de tiempo, una vez que se tienen modelos correctamente especificados, es la simulación de las variables de interés. Es decir, observar que tanto el modelo replica el comportamiento de los datos, que para este caso son los mecanismos causantes del cambio climático. La simulación es una herramienta de análisis

que robustece la correcta especificación de los modelos y hace más confiables los futuros pronósticos.

Gráfica 16. *Simulación de la temperatura superficial global, 1890-2013*



Fuente: Elaboración propia

En la gráfica 16 se presenta la simulación de la temperatura a través de la solución simultánea.²⁷ La especificación final, con base en el marco teórico de cambio climático, describe de manera muy similar el comportamiento de la temperatura. Es evidente que se ha logrado capturar los patrones probabilísticos de la serie, ya que se visualiza un buen ajuste en media y varianza, las cuales se ven reflejadas en la volatilidad y la tendencia.

4.7 *Proyecciones futuras de la temperatura*

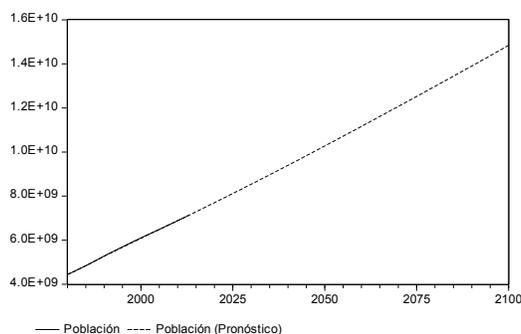
El hecho que las simulaciones sean cercanas a la realidad permite proceder al pronóstico (2014 – 2100). A continuación, se presenta la trayectoria futura de la población, ya que los resultados empíricos de las estimaciones consideran a éste como el principal generador del desequilibrio climático. Posteriormente, se muestran los forzamientos radiativos, tanto antropogénico como natural. Para evaluar las proyecciones futuras se obtienen los estadísticos de ajuste RMSE, MAE, MAPE, THEIL, los cuales avalan la cercanía al verdadero proceso generador de los datos. Los pronósticos van a reflejar el comportamiento tendencial de las variables considerando las especificaciones encontradas en la modelación.

De acuerdo a las prospectivas estimadas, para el año 2050, la población será aproximadamente de 10 mil millones de personas en el mundo, mientras que para el 2100 se alcanzarán los 14 mil millones. Esto resulta estar dentro de los rangos, de 8 a 10 mil

²⁷ En el Anexo B se observan las simulaciones de todas las variables endógenas.

millones para 2050 y de 7 a 16 mil millones para el año 2100, que presenta el departamento de población de la ONU. Mismos que utiliza el IPCC para los modelos de evaluación integral. Dichos resultados coinciden con los pronósticos especiales presentados por el IPCC en SRES (2001), donde las estimaciones de la demografía para los diferentes escenarios²⁸ reflejan un crecimiento en los factores contaminantes.

Gráfica17. *Pronóstico de la población, 1990-2020*



Fuente: Elaboración propia

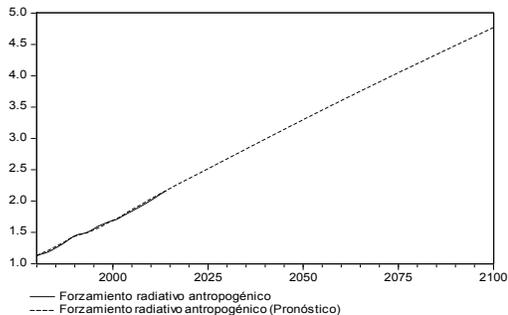
Como se mencionó, el incremento de la población impacta directamente en las emisiones y por ende en las concentraciones. Esto acorde a lo dicho por Marland, et al. (2007). Es decir, el hecho que aumente la población genera mayor demanda de bienes y servicios, lo cual provoca un incremento en la producción. La tecnología que se utiliza actualmente en los procesos productivos es altamente contaminante por la quema de combustibles fósiles, lo que resulta en mayores emisiones.

El aumento de estas últimas se debe principalmente a dos razones. Por una parte, la transición mundial a tecnologías amigables con el medio ambiente es muy lenta y costosa (Rogelj et al, 2013; IPCC, 2007), y por otra, los gases de carbón en la atmósfera tienen un periodo de vida aproximadamente de diez años. Incluso si las emisiones actuales dejaran de producirse, los efectos de éstas permanecerían en el mediano plazo (Jiang y Hardee, 2011). Todo lo anterior genera un aumento en el forzamiento radiativo antropogénico (ver panel a) de la figura 18), que causa anomalías en la temperatura.

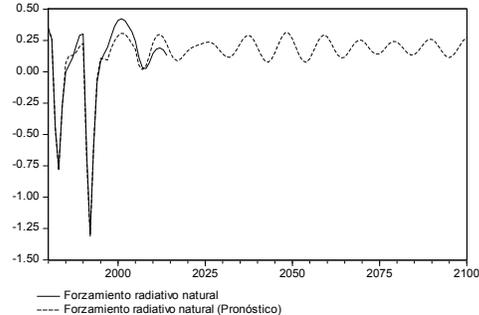
²⁸ El reporte especial de escenarios de las emisiones del IPCC, identifica 4 familias con cambios futuros en el aumento de la población, el crecimiento económico, innovaciones tecnológicas, uso de energía y cambios en el uso del suelo (Jiang y Hardee, 2010).

Gráfica18. *Pronóstico del forzamiento radiativo natural y antropogénico, 1990-2020*

a) Forzamiento radiativo antropogénico



b) Forzamiento radiativo natural

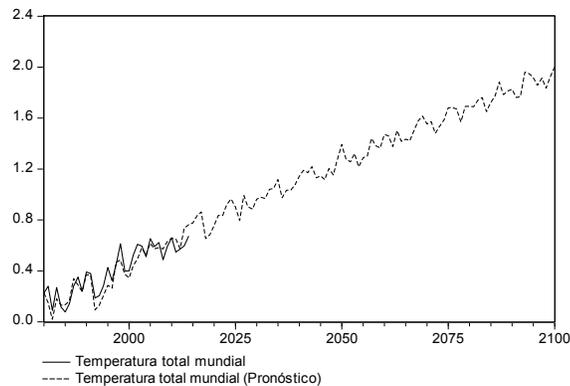


Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, el ciclo del mecanismo natural raramente cambia, es decir los patrones que sigue son muy marcados. El sol continúa irradiando de acuerdo a sus características físicas. La periodicidad de éste es muy regular (de 11 a 13 años), lo que facilita su pronóstico. Adicionalmente, los volcanes siguen emitiendo gases ácidos que forman parte de los aerosoles. En contraste con la irradiación solar, las emisiones volcánicas son imposibles de predecir, razón por la cual se consideran determinísticas. De acuerdo al quinto informe del equipo de expertos que evalúan el cambio climático, el mecanismo natural se encuentra en su fase de enfriamiento, el cual va acorde al ciclo solar (gráfica 18b).

Los resultados anteriores en conjunto explican el comportamiento futuro de la temperatura, la cual muestra una tendencia ascendente heredada del factor antropogénico (ver gráfica 19). De acuerdo con Gay, et al (2009) las causas naturales explican la volatilidad (varianza) de la temperatura, la cual es constante. El hecho de afirmar que la variabilidad no cambia significa que el impacto sobre el cambio climático es principalmente consecuencia de las actividades humanas.

Gráfica 19. *Pronóstico de la Temperatura de la superficie global, 1990-2100*



Fuente: Elaboración propia

Los pronósticos dan evidencia de que en 50 años la temperatura aumentará en 1.5°C, mientras que para el año 2100 incrementará los temidos 2°C que es el límite establecido por el UNFCCC en la convención de 1992 para evitar un peligroso cambio climático futuro. Si se continúa con los mismos patrones de crecimiento de la población y las mismas tecnologías para la producción, es posible que en menos de 100 años la vida humana, como la conocemos, se vea alterada por el aumento en las anomalías de la temperatura.

4.8 Escenarios

Los escenarios son una herramienta que sirven en el diseño de políticas. Para evaluar más a fondo el impacto de la población en el cambio climático, y los resultados de posibles políticas de control demográfico, se han establecido dos panoramas: uno alto (2% de crecimiento constante) y otro bajo (0.33% de crecimiento constante), los cuales son contrastados con el pronóstico de referencia. Estos dos escenarios son evaluados para un periodo de 86 años a partir de 2014, con el fin de observar el efecto del éxito de las políticas de planificación familiar.

- **Escenario de referencia:** en éste se considera el comportamiento tendencial de las variables que integran el sistema climático. Es decir, en el campo demográfico, la población sigue un crecimiento de aproximadamente 0.82% anual. Como consecuencia de una disminución tanto de la tasa de natalidad como de la

mortalidad en 1.44% y 0.57% respectivamente por cada mil habitantes. Estas cifras son resultados del desarrollo de técnicas médicas y fomento a la salud, desde el nacimiento hasta el deceso de la población.

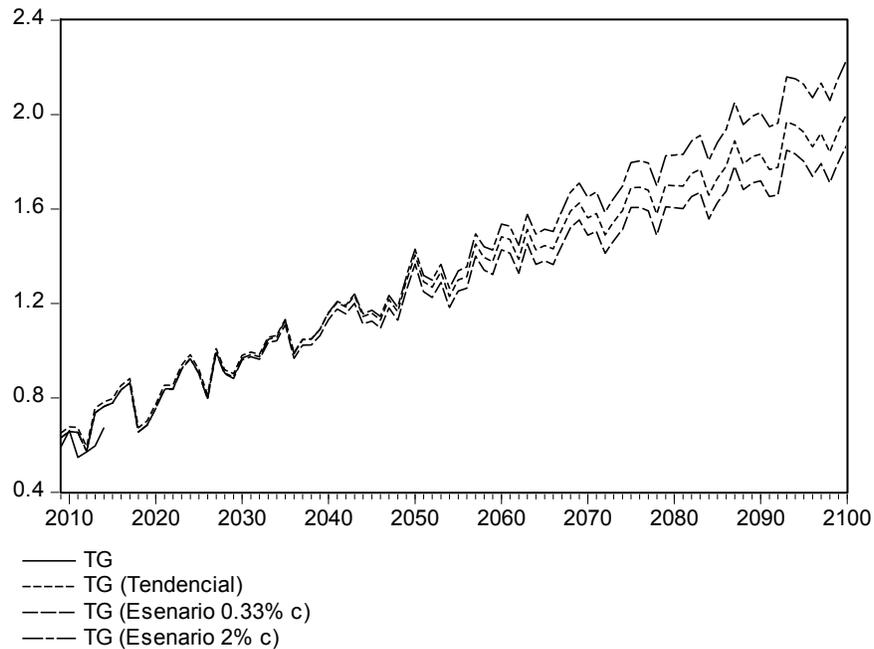
- **Escenario Alto:** en dicho escenario se asume que las políticas de planificación familiar no han funcionado, lo que ha llevado a incremento de la natalidad. Por otro lado, el desarrollo científico en la tecnología médica ha reducido la tasa de mortalidad. Ambos efectos llevan a un crecimiento de la población de 2% permanente.

- **Escenario Bajo:** en este último se considera cambios tecnológicos en la ciencia médica, lo cual disminuye la tasa de mortalidad, pero a su vez, las políticas de planeación familiar han tenido resultados favorables al hacer más conscientes a las nuevas familias. Lo que da como resultado un tasa de crecimiento de la población de 0.33 % permanente.

Los resultados se observan en la gráfica 20, en la cual se presenta el efecto final sobre la temperatura. Lo anterior es posible debido a que, como se mencionó, esta última responde positivamente a cambios en el forzamiento radiativo antropogénico, derivados de un aumento en las emisiones y concentraciones, que a su vez se incrementan por la expansión de la población (revisar capítulo 1).

En los tres escenarios, las anomalías en la temperatura siguen una tendencia positiva trazada por la población. En la década de 2060, dicha variable crece en 1.5 °C en todos los escenarios. En 2087 el alto alcanza los 2°C; mientras que el tendencial y bajo no llegan a esta tasa para el 2100. Esto concuerda con los resultados de los escenarios del IPCC, los cuales afirman que es probable que para finales del siglo XXI, la temperatura global en superficie se encuentre dentro del rango de 1.5 a 2.5°C superior a la del periodo de 1850 y 1900.

Gráfica 20. Mundial: *Pronóstico de la Temperatura de la superficie global con escenarios en la población, 2010-2100*



Fuente: Elaboración propia

El hecho de que esto ocurra se traduce en cambio climático. Lo cual se refleja en grandes variaciones del proceso del ciclo de carbono que agudiza la cantidad de CO₂ contenida en la atmósfera. Los efectos de esto son: la acidificación de los océanos, aumento en el nivel del mar, calentamiento del agua oceánica, días y noches más calientes, reducción de los días nevados, disminución de la capa de hielo, cambios en las precipitaciones, entre otros más (IPCC, 2007). Consecuentemente, la alteración de los ecosistemas que actualmente se conocen es inminente, dando como resultado grandes catástrofes mundiales que afectan a toda clase de vida existente en la tierra y al desarrollo humano.

Conclusiones y recomendaciones

Existe gran evidencia de que los cambios provenientes por las actividades humanas son los principales responsables de los aumentos de las emisiones de GEI desde la época preindustrial (IPCC (2001-2014), UNFCCC, Kaufmann (2006)). El diseño de políticas, para la mitigación de dichos percusores del daño al medio ambiente, es estrictamente necesario al considerar las tendencias de los mecanismos del cambio climático.

En la presente investigación se han evaluado las causas y consecuencias de los factores, naturales y antropogénicos, que determinan el cambio en la temperatura. Se hizo uso de la técnica del sistema de ecuaciones simultáneo, como complemento para los modelos de evaluación integral y alternativa a las simulaciones de Montecarlo, para pronóstico e inferencia. Dicha metodología asume supuestos probabilísticos, donde se busca la correcta especificación estadística que lleva a cada una de las ecuaciones a evaluaciones, a través de pruebas que hacen más confiables los resultados.

Los hallazgos de las estimaciones demostraron que las implicaciones de las actividades humanas en el sistema climático son definitivas. La población resultó ser la principal responsable de la tendencia ascendente en las anomalías de la temperatura en el mecanismo antropogénico. De acuerdo a los resultados de las estimaciones, el incremento de esta variable es provocado por el comportamiento de la natalidad y de la mortalidad. El desarrollo en las técnicas médicas ha generado una probabilidad de supervivencia mayor en ambos casos. El crecimiento de la población demanda mayor cantidad de bienes y servicios, lo cual se traduce en un incremento en la producción y por ende en las emisiones. Esto último a razón del sistema productivo actual que es altamente contaminante, al hacer uso excesivo de combustibles fósiles.

El efecto de un aumento en las emisiones se refleja en mayores concentraciones, las cuales alteran el forzamiento radiativo de origen humano. Para analizar el efecto final de éste último, junto al natural, en la temperatura se estimó un modelo SVAR, cuyos resultados sugieren que el efecto del forzamiento radiativo antropogénico es positivo y significativo, contrario al natural cuya elasticidad es negativa. Como se mencionó, esto último implica que la tierra se encuentra en una fase de enfriamiento, lo cual concuerda con

las declaraciones del IPCC(2013). No obstante, el factor antrópico contrasta con este efecto, y al ser mayor y más significativo se obtiene un resultado total positivo. Los impulsos respuesta analizados previamente dan robustez a éstos resultados.

Una vez revisado el mecanismo completo, se evaluó, a través de escenarios, el impacto del factor demográfico en el sistema climático, para determinar las posibles políticas de contención y disminución de emisiones, a través de programas de planificación familiar, ya que como se mencionó anteriormente, dicha variable es el motor del aumento en las anomalías en la temperatura. Las simulaciones muestran que si no se toman medidas, para el control de las emisiones, es probable que para el año 2100, la temperatura aumente aproximadamente 2° C. Lo que implica cambios radicales en el ecosistema.

Con esto se concluyó que el cumplimiento o no de las políticas establecidas de planificación familiar pueden marcar un fuerte cambio en el comportamiento de la temperatura. No obstante, es posible observar que no es suficiente realizar dichas políticas para evitar un futuro adverso. Es necesario tomar otras medidas adicionales para disminuir la tendencia de las anomalías en la temperatura, tales como la reducción de las emisiones de GEI a través de tecnologías verdes. De acuerdo a Chaims (Smith, 2008), la reducción de la población es importante más no suficiente debido a que los países desarrollados, los cuales tienen menores tasas de natalidad, son los responsables de mayores emisiones por el estilo de vida que tienen.

Recomendaciones

Por lo anterior, se tienen dos vías para disminuir el impacto humano sobre el clima, por un lado a través del control demográfico; por el otro mediante políticas económicas que conduzcan al menor uso de energías de origen fósil.

Las medidas para el control demográfico están encaminadas principalmente a la generación de conciencia de la importancia de la planificación familiar dadas las condiciones mundiales actuales. Debe considerarse que tratar con la variable demográfica tiene fuertes implicaciones sociales y religiosas por lo que debe tomarse con cautela.

En cuanto a los aspectos económicos, de acuerdo al IPCC (2007,2013), a Harris, et al (2015) y al FMI (2015), existen dos medidas para direccionar el cambio climático. La primera es a través de prevención y mitigación, que permita reducir o eliminar la intensificación del efecto invernadero; la segunda es mediante la adaptación, cuya finalidad es disminuir el impacto de las consecuencias del deterioro ambiental. Dada la dificultad a nivel global de adoptar la primera, la adaptación ha tomado impulso como primer paso para actuar contra el cambio climático.

Las opciones de política económica generalmente aceptadas y disponibles hasta el momento son la de impuestos al consumo de carbón y la de permisos negociables. La primera, ha resultado ser muy eficiente y, aunque de primera instancia pareciera afectar a los consumidores por la elevación de los costos de los combustibles, genera ingresos fiscales que pueden fomentar el crecimiento económico. Esta política incentiva a los consumidores de combustibles fósiles a disminuir su consumo y a buscar energías alternativas que lo sustituyan. La segunda, también conocida como cap-and-trade puede tener alcances nacionales o internacionales. Esta política consiste en asignar permisos para generar cierto nivel de emisiones de carbón a los países miembros del programa, con la finalidad de acercarse poco a poco al nivel objetivo (como el caso del Protocolo de Kyoto), además de incentivar al proceso de transición a uso de combustibles alternativos (FMI, 2015; Harris, et al., 2015).

Otras medidas que pudieran servir como instrumento para hacer frente al cambio climático son la redirección de los subsidios a energías basadas en combustibles fósiles hacia aquellas provenientes de fuentes renovables; fijar estándares de eficiencia en las tecnologías actuales que generan energía; fomento a la investigación y desarrollo que promueva la comercialización de tecnologías alternativas; y la transferencia de tecnología a las naciones en vías de desarrollo (Harris, et al., 2015).

Para cualquiera de las políticas propuestas, ya sea para el control demográfico a través del fomento de programas de planificación familiar y conciencia social sobre el medio ambiente, o para la mitigación y adaptación al cambio climático, el enfoque económico sugiere aplicar a las políticas adoptadas evaluaciones mediante el análisis de costo beneficio con análisis de costo efectividad. El análisis de costo beneficio ofrece las

bases para decidir si una política debe o no ser implementada, mientras que el costo efectividad acepta una meta dada por la sociedad, y utiliza técnicas económicas para evaluar la forma más eficiente para llegar a esa meta (Harris, et al., 2015).

Finalmente, sería interesante poder hacer un escenario en donde se observe la transición de las economías industrializadas a base de combustibles fósiles hacia tecnologías verdes. Sin embargo, aún falta mucho por hacer para considerar este posible escenario.

Apéndice

Apéndice A: Modelo clásico de la producción

Para comprender el modelo clásico de producción es necesario desarrollar los siguiente: Primero, se asume que la economía produce solo un bien (Y) por unidad de tiempo, y se determina de la siguiente manera:

$$Y = C + I + G + \delta k$$

Dónde:

C=Tasa de consumo real.

I=Tasa real de inversión.

G=Tasa real de compras del gobierno.

δk =Tasa real de depreciación de capital. (Sargent, 1982)

La economía está organizada en tres sectores:

- a) Empresas: Utilizan capital y trabajo para producir.
- b) Gobierno: Recibe impuestos y compra bienes; también a su vez, emite bonos y dinero y lleva a cabo operaciones de mercado abierto.
- c) Economías domésticas: Poseen dinero, los bonos del gobierno y todas las acciones de las empresas.

La función de producción de las empresas es:

$$Y = f(K, N)$$

Dónde:

Y= Unidad de producción por unidad de tiempo.

K=Stock de Capital.

N=Nivel de Empleo.

En la ecuación anterior es claro ver que el nivel de producción depende del stock de capital (Factor capital) y del nivel de empleo (Factor Empleo). Se asume que la producción está en función del producto marginal tanto del capital y como del trabajo, de forma directa; aunque estos tienden a ser decrecientes. (Sargent, 1982)

Por lo anterior en este modelo, el producto marginal del capital depende únicamente de la relación capital-trabajo y viceversa. No obstante, un supuesto importante es que la cantidad de capital es fijo. Esto implica que las empresas puedan alterar su empleo instantáneamente. Esto se da gracias a que las empresas se encuentran en un mercado competitivo, por lo que en cualquier momento, los empresarios pueden contratar tanto trabajo como deseen al salario corriente. (Sargent, 1982)

Una vez dicho lo anterior la función de beneficio de las empresas es:

$$\Pi = pf(K, N) - wN - (r + \delta - \pi)pK$$

Dónde:

Π = Beneficio.

r = Tasa de interés.

δ = Tasa de depreciación de los bonos del gobierno.

π = Tasa de inflación previa.

$(r+\delta-\pi)$ representa el costo de capital.

Dado a que se asumió que el capital es fijo, se maximizan los beneficios de las empresas con respecto al empleo:

$$\frac{\delta\Pi}{\delta N} = pF(K, N) - w = 0$$

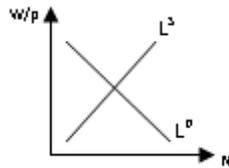
Despejando:

La última ecuación establece que la empresa iguala el producto marginal del trabajo al salario real; de igual forma muestra la función de demanda de trabajo de una empresa

que, dado K , relaciona inversamente la demanda de empleo con el salario real. Esta relación se muestra en la siguiente gráfica:

$$F(K, N) = \frac{w}{p}$$

Por lo tanto, las empresas van a demandar más mano de obra a un menor salario. La gráfica anterior, también, muestra la relación de equilibrio entre oferta y demanda de trabajo.



Donde se concluye que la oferta de trabajo está en función del salario real. El mismo efecto se da, si se asume fijo el empleo

Apéndice B: Formas alternativas del modelo AB para SVAR

A continuación se muestran las otras formas alternativas:

a) **Modelo K**

K es una matriz invertible de $(n \times n)$ tal que:

$$KA(L)y_t = K\varepsilon_t$$

$$K\varepsilon_t = e_t$$

$$E\varepsilon_t = 0E(e_t e_t') = I_n$$

La matriz K pre-multiplica la representación autoregresiva e induce a una transformación en las innovaciones ε_t mediante la generación de un vector (e_t) de residuales ortonormalizados (su matriz de covarianzas no es sólo diagonal, sino también igual a la matriz identidad I_n).

Las correlaciones contemporáneas entre los elementos de y , por lo tanto, están modeladas a través de la especificación de la matriz invertible K . El modelo estructural K puede ser considerado como una forma estructural particular con un vector de perturbación ortonormal.

Note que si suponemos conocer la verdadera matriz de varianzas y covarianzas, en términos de ε_t :

$$K\varepsilon_t = e_t$$

$$K(\varepsilon_t\varepsilon_t'K') = e_te_t'$$

Considerando las expectativas inmediatamente se obtiene:

$$K\Sigma K' = I_n$$

Lo cual implica imponer $n(n + 1)/2$ restricciones no lineales en la matriz K , y dejar $n(n - 1)/2$ parámetros libres en K .

b) **Modelo C**

Existe otro tipo de modelo, el cual es conocido en la literatura como el modelo C, en el cual C es una matriz invertible de $(n \times n)$ tal que:

$$A(L)y_t = \varepsilon_t$$

$$\varepsilon_t = Ce_t$$

$$Ee_t = 0 \qquad E(e_te_t') = I_n$$

En este modelo estructural particular, se tiene una forma estructural donde no existen relaciones instantáneas entre las variables endógenas del modelo explícito. Cada variable en el sistema es afectada por un conjunto de innovaciones ortonormales cuyo efecto del impacto se modela explícitamente a través de la matriz C .

Sims (1988) resalta que no existe razón teórica para suponer que C deba ser una matriz cuadrada del mismo orden que K . Si C fuera una matriz cuadrada, el número de innovaciones independientes transformadas (ortonormalizadas) sería igual al número de

ecuaciones. Muchas razones llevan a pensar que el número verdadero de choques originalmente independientes en el sistema podría ser muy grande. En dado caso, la matriz C sería una matriz de $(n \times m)$, con m estrictamente $> n$. En este sentido, ésta forma de investigación es opuesta a la estudiada en el análisis factorial, que trata de encontrar a m (el número de factores independientes) estrictamente menor que n . El caso para una matriz C rectangular de $(n \times m)$, con $m > n$ oculta un número de problemas relacionados con el modelo en su conjunto y la agregación sobre los agentes.

El vector ε_t es generado por una combinación lineal de innovaciones independientes (ortonormales) a las cuales nos referiremos como e_t . Esto puede tener diferente significado al modelo K , cuando uno está preocupado del modelado explícito para relaciones instantáneas entre variables endógenas.

Para el modelo C note que:

$$\varepsilon_t = C e_t$$

$$\varepsilon_t \varepsilon_t' = C e_t e_t' C'$$

Si se toman las expectativas:

$$\Sigma = C C'$$

Si volvemos a asumir que conocemos la matriz Σ , la matriz de ecuaciones previa implícitamente impone un conjunto de $n(n + 1)/2$ restricciones no lineales en la matriz C , dejando $n(n - 1)/2$ parámetros libres en C .

Los modelos C y K se establecen como casos especiales. De hecho, el modelo C puede ser visto como un caso particular del modelo AB , donde A se elige como matriz identidad, y el modelo K corresponde a un modelo AB con la matriz diagonal B .

Así, como en el caso previo, de:

$$A \varepsilon_t = B e_t$$

$$A \varepsilon_t \varepsilon_t' A' = B B'$$

para una matriz Σ conocida, ésta ecuación también impone un conjunto de $n(n + 1)/2$ restricciones no lineales en los parámetros de las matrices A y B, dejando un total de $2n^2 - n(n + 1)/2$ parámetros libres.

Anexo

Anexo A: Estadístico

Cuadro 1a. Variables que componen el modelo de cambio climático

Prp	producción mundial de petróleo
Pp	precios del petróleo
Pa	índice de producción agrícola
Cem	consumo de energía mundial
Ipi	índice de producción industrial
Ipa	índice de producción agrícola
tn	tasa de nacimiento
Nat	Natalidad
Tm	tasa de mortalidad
Mor	Mortalidad
Pob	Población
Fbk	índice de formación bruta de capital
Ist	irradiación solar total
Egei	emisiones de gases de efecto invernadero
cco2	concentraciones de bióxido de carbono
cn2o	concentraciones de óxido nitroso
cch4	concentraciones de metano
Frs	forzamiento radiativo solar
Fra	forzamiento radiativo antropogénico
Frn	forzamiento radiativo natural
Tg	temperatura global

Cuadro 2a. Correlación entre las variables

Variables	Correlación
TN vs POB	-0.874
TM vs POB	-0.959
CEM vs POB	0.898
IPI vs POB	0.877
IPA vs POB	0.805
POB vs GEI	0.934
POB vs CN	0.851
POB vs FRA	0.846
POB vs TG	0.800
GEI vs CN	0.975
CN vs FRA	0.997
FRA vs TG	0.936
FRN vs TG	0.112
TSI vs FRS	0.854
FRS vs FRN	0.236

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 3a. Prueba de raíces unitarias 1890-2013

Variable	Prueba ADF	Valor crítico al 5%	Orden de integración
Prp	-5.427925	-2.885249	I(0)
PP	-6.891549	-2.885249	I(0)
Pa	-4.61322	-2.885249	I(0)
Cem	-5.232427	-2.88545	I(0)
Ipi	-2.755654	-2.579491	I(0)
Ipa	-4.879012	-2.885654	I(0)
Tn	-2.990332	-2.885249	I(0)
Tm	-9.567206	-2.88545	I(0)
Pop	-1.1985	-2.886074	I(1)
FBK	-8.930796	-2.88545	I(0)
Tsi	-6.057396	-2.885249	I(0)
Gei	-5.670034	-2.885863	I(0)
Cco2	-3.231353	-2.886509	I(0)
cn2o	-4.202231	-2.88629	I(0)
Cch4	-9.357475	-2.886074	I(0)
Fra	-3.095002	-2.885863	I(0)
Fm	-3.071593	-2.885654	I(0)
Frs	-7.534963	-2.886074	I(0)
Tg	-4.750544	-2.885051	I(0)

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 4a. Pruebas individuales de correcta especificación en el bloque socio-económico

Variables	Autocorrelación		Normalidad		Prueba heteroscedasticidad	
	Estadístico F	Prob	Estadístico JB	Prob	Estadístico F	Prob
PPP	1.848	0.177	4.444	0.108	1.335	0.214
PP	0.165	0.685	0.122	0.940	1.072	0.388
PA	3.774	0.055	1.970	0.373	0.762	0.801
CEM	3.162	0.048	1.124	0.570	0.941	0.569
IPI	0.282	0.596	1.745	0.417	1.571	0.517
IPA	1.086	0.299	2.657	0.264	0.827	0.702
FBKF	1.487	0.231	0.757	0.684	1.415	0.122
TN	1.836	0.178	0.981	0.612	1.243	0.218
TM	0.934	0.396	0.261	0.877	1.376	0.136
POP	1.535	0.187	1.312	0.518	1.495	0.079

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 5a. Pruebas individuales de correcta especificación en el modelo de cambio climático

Variables	Autocorrelación		Normalidad		Prueba heteroscedasticidad	
	Estadístico F	Prob	Estadístico JB	Prob	Estadístico F	Prob
GHG	0.413	0.521	4.699	0.095	1.028	0.437
CN20	1.475	0.195	0.306	0.858	0.853	0.660
CCO2	1.967	0.070	4.554	0.102	1.576	0.047
CCH4	1.155	0.338	0.994	0.608	0.786	0.781
TSI	0.494	0.483	1.266	0.530	1.011	0.459
FRSOL	2.535	0.045	0.712	0.700	0.436	0.988
FRANT	2.389	0.055	0.241	0.886	1.239	0.274
FRNAT	1.537	0.210	0.324	0.049	1.061	0.401
TG	3.315	0.040	1.247	0.535	0.734	0.814

Fuente: Elaboración propia con datos de

Análisis de VAR estructural

Cuadro 6a. Pruebas individuales de correcta especificación del SVAR de temperatura

Variables	Autocorrelación		Normalidad		Prueba heteroscedasticidad	
	Estadística F	Prob	Estadística Chi ²	Prob	Estadística F	Prob
FRA	1.315	0.276	3.353	0.187	0.313	0.999
FRN	1.560	0.218	4.224	0.120	0.365	0.996
TG	0.006	0.993	5.108	0.077	0.208	0.999

Fuente: Elaboración propia

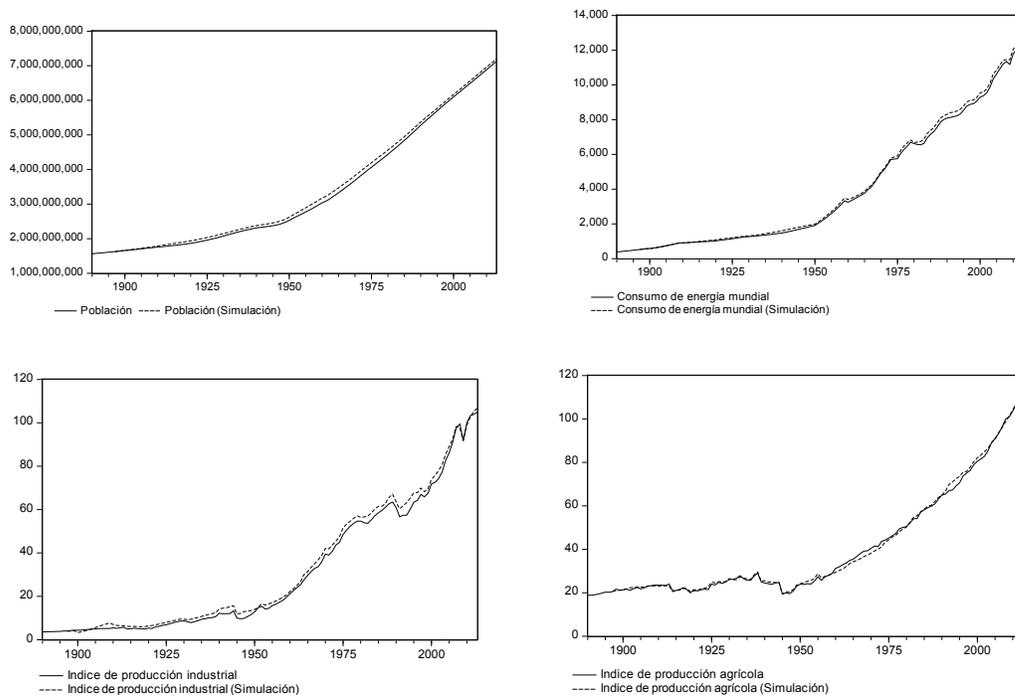
Cuadro 7a. Pruebas conjuntas de correcta especificación del SVAR de temperatura

Modelo	Autocorrelación		Normalidad		Prueba heteroscedasticidad	
	Estadística F	Prob	Estadística Chi ²	Prob	Estadística F	Prob
TG	0.908	0.569	12.749	0.047	0.260	0.999

Fuente: Elaboración propia

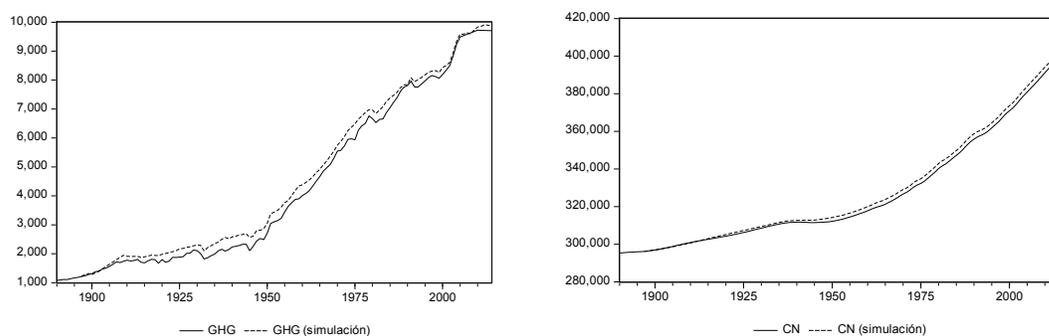
Anexo B: Simulación

Gráfica 1b. Simulación de la población, del consumo de energía mundial, producción industrial y agrícola.



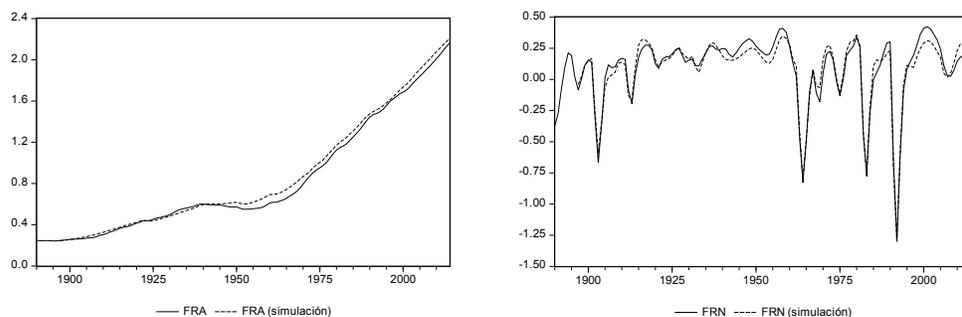
Fuente: Elaboración propia

Gráfica 2b . Simulación de las emisiones y concentraciones de GEI



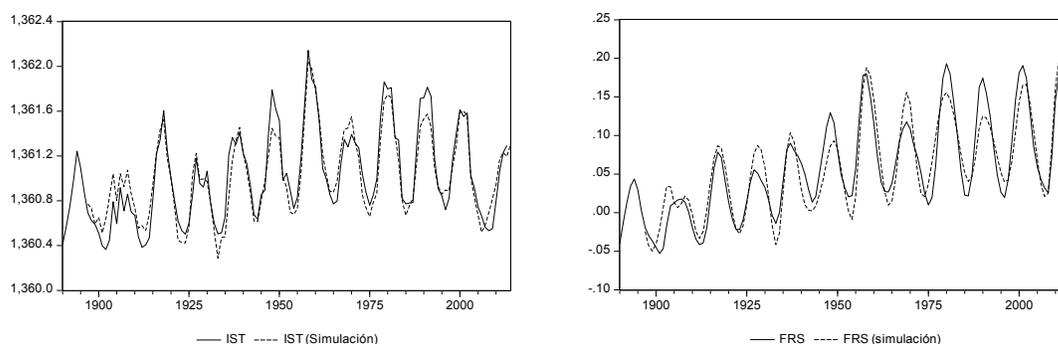
Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3b. Simulación del forzamiento radiativo antropogénico y natural



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 4b. Simulación de la irradiación y forzamiento radiativo solar



Fuente: Elaboración propia

Cuadro 5b. Estadísticos de ajuste del sistema (para tghhp de 1990 a 2020)

Variable	Prueba	Estadístico
Pop	Rmse	11821651.340
	Mae	8885383.058
	Mape	0.042
	Theil	0.001
FRA	Rmse	0.017
	Mae	0.015
	Mape	0.966
	Theil	0.005
FRN	Rmse	0.072
	Mae	0.060
	Mape	38.162
	Theil	0.096
TG	Rmse	0.070
	Mae	0.056
	Mape	30.275
	Theil	0.079

Fuente: Elaboración propia

Fuente de los datos

Los 17 datos utilizados para la elaboración del modelo econométrico de los mecanismos del cambio climático tienen una periodicidad que abarca de 1890 a 2014.

- Producción de petróleo:

Etemad & Luciani (190-1980); US EIA Historical Statistics (1981-2010);
<http://www.bp.com/content/dam/bp/excel/Energy-Economics/statistical-review-2015/bp-statistical-review-of-world-energy-2015-workbook.xlsx>

- Precios del petróleo:

<http://www.bp.com/en/global/corporate/about-bp/energy-economics/statistical-review-of-world-energy/statistical-review-downloads.html>;
<https://research.stlouisfed.org/fred2/series/DCOILBRENTU>

- Precios de los alimentos:

<http://www.eia.gov/dnav/pet/hist/LeafHandler.ashx?n=PET&s=MCRFPUS1&f=A>

- Consumo de energía mundial:

<http://themasites.pbl.nl/tridion/en/themasites/hyde/consumptiondata/totalenergy/index-2.html>
<http://www.bp.com/en/global/corporate/about-bp/energy-economics/statistical-review-of-world-energy-2013.html>

- Producción industrial:

<http://www.rug.nl/research/ggdc/data/historical-national-accounts>

- Producción agropecuaria:

<http://www.rug.nl/research/ggdc/data/historical-national-accounts>;

- Índice de formación bruta de capital:

<http://data.worldbank.org/country> ; <http://www.rrojasdatabank.info/lamcapitalform.pdf> ;

- Población:

<http://ourworldindata.org/data/population-growth-vital-statistics/world-population-growth/>
<http://esa.un.org/unpd/wpp/DVD/>

- Natalidad:

<http://data.worldbank.org/>; <http://www.mortality.org/>

-Mortalidad:

<http://data.worldbank.org/>; <http://www.mortality.org/>

-Emisiones de GEI, Concentraciones y Forzamientos radiativos:

<http://www.pik-potsdam.de/~mmalte/rcps/> ;

<http://tntcat.iiasa.ac.at:8787/RcpDb/dsd?Action=htmlpage&page=download> ;

-Irradiación solar total:

<https://www.ngdc.noaa.gov/stp/solar/solarirrad.html>

-Temperatura Global:

http://data.giss.nasa.gov/gistemp/tabledata_v3/GLB.Ts+dSST.txt

Bibliografía

- AAG, centro de educación geográfica global. “*Teoría Malthusiana de la población*” Módulo sobre población y recursos naturales: Marco Conceptual. http://cgge.aag.org/PopulationandNaturalResources1e/CF_PopNatRes_Jan10ESP/CF_PopNatRes_Jan10ESP8.html (Marzo, 2015).
- Ackerman, F., DeCanio, S., Howarth, R., y Sheeran, K. “*The Need for a Fresh Approach to Climate Change Economics*”. Workshop Proceedings, Assessing the Benefits of Avoided Climate Change: Cost-Benefit Analysis and Beyond.
- Agarwal, K., “*Monte Carlo Simulation: The Basics*”. Investopedia, LLC, 2015. <<http://www.investopedia.com/articles/investing/112514/monte-carlo-simulation-basics.asp?view=print>>, (25 Junio 2015).
- Amisano, G., Giannini, C., 1997. “*Topics in Structural VAR Econometrics*”. Springer Verlag, New York.
- Anderson, B., Borgonovo, E., Galeotti, M. y Roson, R. “*Uncertainty in Integrated Assessment Modelling: Can global sensitivity analysis be of help?*”. Working paper no. 52. September, 2012.
- Bairoch, P., y Goertz, G. “*Factors of Urbanisation in the Nineteenth Century Developed Countries: A Descriptive and Econometric Analysis*”. Urban Studies (1986) 23,285-305.
- Bairoch, P., y Goertz, G., “*Factors of Urbanization in the Nineteenth Century Developed Countries: A Descriptive and Econometric Analysis*”. Urban Studies (1986) 23, 285-305.
- Banaeian, N., y Zangeneh, M. “*Estimating Production Function of Walnut Production in Iran Using Cobb-Douglas Method*”. Agricultura Tropica Et Subtropica, Vol. 44 (4) 2011.
- Bakhat, M y Würzburg, K. “*Price Relationships of Crude Oil and Food Commodities*”. Economics for energy. WP FA06/13.
- Banco Mundial. “*Glosario*” <http://www.worldbank.org/depweb/beyond/beyondsp/glossary.html#begin> (Marzo, 2015)
- Beenstock, Reingewertz, and Paldor. “*Polynomial cointegration tests of anthropogenic impact on global warming*” Earth Syst. Dynam., 3, 173–188, 2012.
- Blanchett, D., y Pfau, W. “*The Power and Limitations of Monte Carlo Simulations*”. Agosto 2014, Advisor Perspectives.
- Borgonovo, E, et al. “*Uncertainty in Integrated Assessment Modelling: Can Global Sensitivity analysis be of Help?*”. JEL Classification July 2012.
- Bradsher, K. “*High rice cost creating fears of Asian unrest*”. The New York Times, http://www.nytimes.com/2008/03/29/business/worldbusiness/29rice.html?pagewanted=print&_r=0. November 2008.

- Bruns, S. *“The role of energy in economic Production- Empirical Evidence from a Biophysical Perspective: A preliminary Assessment”*. Schumpeter conference in Brisbane, July 2012.
- Burr, W. *“State department Intelligence and research predicted 1973 Arab-Israeli war”*. National Security Archive Electronic Briefing Book, No. 415. March 2013.
- Butler, C y McMichael, A.J. *“Population health: where demography, environment and equity converge”*. Journal and Public Health Vol. 32 No. 2, pp.157-158.
- Cantore, N. *“The relevance of climate change integrated assessment models in policy desing”*. Overseas Development Institute 2009. ISSN 1756-7610.
- Cartlidge, E. *“Historic Vatican meeting urges action on climate change”*. Nature doi:10.1038/nature.2015.17431.
- Cassoni, A. *“Una propuesta metodológica para la especificación de modelos econométricos”*. Universidad de la Republica Facultad de Ciencias Sociales, -Departamento de Economía, Documento No. 07/92 1992.
- Climate & Global Dynamics Laboratory (CGD). *“IAM Climate and Atmospheric Composition Model ”*. <<http://www2.cgd.ucar.edu/sections/tss/iam/iam-climate-and-atmospheric-composition-model>>, (24 Junio 2015).
- Climate & Global Dynamics Laboratory (CGD). *“IAM Demographic Model”*. <<http://www2.cgd.ucar.edu/sections/tss/iam/iam-demographic-model>>, (24 Junio 2015).
- Climate & Global Dynamics Laboratory (CGD). *“IAM Energy-Economic Model”*. <<http://www2.cgd.ucar.edu/sections/tss/iam/iam-energy-economic-model>>, (24 Junio 2015).
- Climate & Global Dynamics Laboratory (CGD). *“IAM Modeling Overview”*. <<http://www2.cgd.ucar.edu/sections/tss/iam/iam-modeling>>, (24 Junio 2015).
- Cohen, J. *“Population and climate change”*. Proceedings of the American philosophical society, VOL. 154, NO. 2, JSTOR, June 2010.
- Consortium for International Earth Science Information Network (CIESIN). 1995. *“Thematic Guide to Integrated Assessment Modeling of Climate Change”*. University Center, Mich. CIESIN URL: <http://sedac.ciesin.org/mva/iamcc.tg/TGHP.html>.
- Cook, R. *“How many people have ever lived on earth?”*. Popul. Bull. 18, 1–19. Cook, R. C. 1962
- Consortium for International Earth Science Information Network (CISIN). 1995. *“Thematic Guide to Integrated Assessment Modeling of climate Change”*. <http://sedac.ciesin.org/mva/iamcc.tg/TGHP.html>.
- Crawshaw, J., *“Why Some Advisors Just Say No to Monte Carlo Simulatioos”*. WealthManagement.com, 2015. <http://wealthmanagement.com/practice-management/why-some-advisors-just-say-no-monte-carlo-simulations>.

- Dell, M., Jones, B. y Olken, B. “*Temperature Shocks and Economic Growth: Evidence from the Last Half Century*”. August 2011, Historical fluctuations in temperature.
- Dixon, Robert. “*Simultaneous (and Recursive) Equation Systems*”. Department of Economics at the University of Melbourne.
- Ebi, K., et al. “*A new scenario framework for climate change research: background, process, and future directions*”. Climatic Change (2014) 122:363-372 DOI 10.1007/s10584-013-0912-3
- EIA “*Global Crude Oil Prices*” . <http://www.eia.gov/forecasts/steo/report/prices.cfm> Agosto, 2015
- Enders, W., 2003. “*Applied Econometric Time Series*”. Wiley, New Jersey.
- Estrada, F., Gay, C., y Sánchez, A. “A replay to “*Does temperature contain a stochastic trend? Evaluating conflicting statistical results*” by R. K. Kaufmann et al”. Climatic Change (2010) 101:407-414 doi:10.1007/s10584-010-9928-0.
- Estrada, F., Perron, P., Gay, C., y Martínez, B. “*A Time-Series Analysis of the 20th Century Climate Simulations Produced for the IPCC’s Fourth Assessment Report*”. PLoS ONE 8(3): e60017. Doi:10.1371/journal.pone.0060017.
- Estrada, F., y Perron, P. “*Breaks, trends ant the attribution of climate change: a time-series analysis*”. Universidad Nacional Autonoma de Mexico, Marzo 2012.
- FAO. “*The State of Food and Agriculture*”. CL 34/2 Roma, 1960.
- FAO. “*The State of Food and Agriculture, 2000*”. No. 32 ISSN 008 I -4539 Roma, 2000.
- FAO. “*What happened to world food prices and why?*”. The state of agricultural commodity markets 2009.
- FAO. “*The State of Food and Agriculture*”. ISSN 0081-4539 Roma, 2011.
- Fattouh, B. “*OPEC Pricing Power. The need for a new perspective*”. Oxford Institute for Energy Studies. WPM 31, 2007.
- Fidelman, P. “*Effects of Population Change on CO2 Emissions*”. Population Earth Governance, <<http://earthgovernance.org/tag/population/>> (25 Junio 2015).
- Flaim, P. “*Population changes, the baby boom, and unemployment rate*”. Monthly labor review, Agosto 1990.
- Galbraith, J., y Green, C. “*Interference about Trends in Global Temperature Data*”. Climatic Change (1992) 22:209-221.
- Gay, C., Estrada, F., y Sánchez, A. “*Global and hemispheric temperatures revisited*”. Climatic Change (2009) 94:333-349 doi:10.1007/s10584-008-9524-8.

- Global Environmental Facility, “*Tecnology Transfer for Climate Change*”, <<https://www.thegef.org/gef>>, (24 Junio 2015).
- González, A. “*Avances y tendencias actuales en el estudio de la pandemia de gripe de 1918-1919*”. ISSN 2254-6901, Vínculos de Historia, núm. 2 (2013)
- Hacket, L. “*Industrial Revolution. Industrialization: the first phase*”. <http://history-world.org/Industrial%20Intro.htm>. (1992)
- Hamilton, J., “*Historical Oil Shocks*”. Department of Economics, University of California. February 2011.
- Hansen, G., Stone, D., y Auffhammer, M. “*Detection and attribution of climate change impacts – is a universal discipline possible?*”. Impact World 201, International Conference on Climate Change Effects, Potsdam, May 27-30.
- Hansen, H. y Johansen, S., 1993. “*Recursive Estimation in Cointegrated VAR-Models*”. Institute of Mathematical Statistics, University of Copenhagen, Preprint 1993–1.
- Hansen, Stone and Auffhammer. “*Detection and attribution of climate change impacts – is a universal discipline possible?*”. Impacts World 2013, International Conference on Climate Change Effects, Potsdam, May 27-30.
- Hedrich, A. “*Recent trend of the birth rate*”. Presented before the Vital Statistics Section of the American Public Health- Association at the Seventythird Annual Meeting in New York, N. Y., Vol. 35. October 3, 1944.
- Hollin, G. y Pearce, W. “*Tension between scientific certainty and meaning complicates communication of IPCC reports*”. Nature Climate Change, Published online: 8 June 2015, DOI:10.1038/NCLIMATE2672.
- Harris, J., Roach, B. y Codur, A. “*The economics of Global climate change*”. Global Development and Environment Institute. Tufts University. Medford, MA 02155. (2015)
- Husain, Arezki, Breuer, Haksar, Helbling, Medas, Sommer, and an IMF Staff Team, “*Global Implications of Lower Oil Prices*”. International Monetary Fund, 2015.
- Ibboston Product Support., 2005. “*Monte Carlo Simulation*”. Ibbotson Associates 2005.
- Integrated Environmental Health Impact Assessment System, “*Methods for Uncertainty analysis*”. <https://www.integrated-assessment-eu/guidebook/methods_uncertainty_analysis>, (1 Julio 2015).
- Intergovernmental Panel on Climate Change. “*Impacts, Adaptation and Vulnerability*”. <<http://www.ipcc.ch/ipccreports/tar/wg2/index.php?idp=90>>, (25 Junio 2015).
- IPCC, 2001. “*Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*” Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881pp.

- IPCC WGI Fourth Assessment Report, “*Climate Change 2007: The Physical Science Basis*”. Intergovernmental Panel on Climate Change (2007).
- IPCC, 2007. “*Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*”. IPCC, Ginebra, Suiza, 104.
- IPCC, 2013. “*Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*”. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Jiang, L. y Hardee, K. “*How to recast population trends matter to climate change?*”. Springer Science and Business. *Popul Res Policy Rev* (2011). DOI 10.1007/s11113-010-9189-7
- Johansen, S., 1988. “*Statistical analysis of cointegration vectors*”. *Journal of Economic Dynamics and Control* 12.
- Johansen, S., 1995. “*Likelihood Based Inference on Cointegration in the Vector Autorregressive Model*”. Oxford University Press, Oxford.
- Johansen, S. T. and A. Rahbek 1998 “*Statistical analysis of cointegration vectors*”. *Journal of Economic Dynamics and Control*. 12(213), 231-254.
- Juselius Katarina, 2006. “*The cointegrated VAR Model: Methodology and Applications*”. Oxford University Press.
- Karlovits, G. “*Monte Carlo Simulation to Characterize Runoff Uncertainty in a Climate*”. Washington State University 2010, Department of Civil and Environmental Engineering.
- Kats, R., “*Techniques for estimating uncertainty in climate change scenarios and impact studies*”. *Climate Research* Vol.20:167-185, 2002.
- Kaufmann, R. K. & Stern, D. I. “*Evidence for human influence on climate from hemispheric temperature relations*”. *Nature* 388, 39-44 (1997).
- Kaufmann, R. K., Kauppi, H. & Stock J H. “*Emissions, concentrations, and temperature: A time series analysis*”, *Climatic Change* 77(3-4), 249-278.
- Kaufmann, R. K., Kauppi, H., Mann, M. L., & Stock, J. H. “*Reconciling anthropogenic climate change with observed temperature 1998–2008*”. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108(29), 11790-11793 (2011).
- Kaufmann, R., Kauppi, H., Mann, M., y Stock, J. “*Does temperature contain a stochastic trend: linking statistical results to physical mechanisms*”. *Climate Change* (2013) doi:10.1007/s10584-012-0683-2.
- Kaufmann, R., Kauppi, H., Mann, M., y Stock, J. “*Reconciling anthropogenic climate change with observed temperature 1998-2008*”. *PNAS* 2011, doi/10.1073/pnas.1102467108.

- Kaufmann, R., y Stern, D., “*Evidence for human influence on climate from hemispheric temperature relations*”. NATURE Vol 388 3 Julio 1997.
- Kelly, D. y Kolstad, C. “*Integrated Assessment Models For Climate Change Control*”. US Department of Energy grant number DE-FG03-96ER62277. (1998).
- Kippen, R., McCalman, J., y Wiseman, J., “*Climate change and population policy: towards a just and transformational approach*”. Journal of Public Health, doi:10.1093/pubmed/fdq041.
- Kirk, D. “*Demographic Transition Theory*” Population Studies, Vol. 50, No. pp. 361-387. Taylor & Francis, Ltd. Noviembre, 1996.
- Kodra, Chatterjee and Ganguly. “*Exploring Granger causality between global average observed time series of carbon dioxide and temperature*”. Spring, 2010.
- Kriegler, E., et al., “*Socio-economic Scenario Development for Climate Change Analysis*”. CIRED, Working Paper, DT/WP No 2010-23, Octubre 2010.
- Landis, F. et al. “*Population, Households and CO₂ Emissions*”. Population Council.
- Liddle, B., “*Consumption-driven environmental impact and age structure change in OECD countries: A cointegration-STIRPAT analysis*”. Demographic Research doi:10.4054/DemRes.2011.24.30.
- Lipper, L., et al. “*Climate-smart agriculture for food security*”. Nature Climate Change, 26 Noviembre 2014, doi:10.1038/NCLIMATE2437.
- Lotze-Campen, H. “*Integrated assessment models (IAM)*”. <http://www.ivm.vu.nl/en/Images/M12_tcm53-161559.pdf>, (25 Junio 2015).
- Lutz, W. “*What can demographers contribute to understanding the link between Population and Climate Change*”. Population Network Newsletter Popnet No. 41, Winter 2009/10.
- Lutz, W y Qiang, R. “*Determinants of human population growth*”. The royal society, Agosto 2002.
- Mabro, R. “*Netback pricing and the Oil Price Collapse of 1986*”. Oxford Institute for Energy Studies. WPM 10, 1987.
- Mastrandrea, M. “*Representation of Climate Impacts in Integrated Assessment Models*”. Workshop Proceedings, Assessing the Benefits of Avoided Climate Change: Cost-Benefit Analysis and Beyond.
- Matsuoka, Y., Morita, T., y Kainuma, M. “*Integrated Assessment Model of Climate Change: The AIM Approach*”. Present and Future of Modeling Global Environmental Change: Toward Integrated Modeling, Eds., T. Matsuno and H. Kida, pp. 339-361.
- Metcalf, G. y Stock, J. “*The Role of Integrated Assessment Models in Climate Policy: A User’s Guide and Assessment*”. Discussion Paper 2015-68. The Harvard Project on Climate Agreements, March 2015.

- Mikkonen, S. et al. “*Trends in the average temperature in Finland 1847-2012*”. Core Climax Capacity –building Workshop 19 -20 March 2014, FMI, Helsinki.
- Mikkonen, S. y Mäkelä, H. “*Gridded historical temperature dataset and time series analysis in climate change detection*”. Core Climax Capacity –building Workshop 19 -20 March 2014, FMI, Helsinki.
- Morgan, J., Pham, A., y Saberi, S. “*Dynamic Integrated Climate Economy Model (DICE): The impact of population growth on climate change*”. Tyndall Centre Working Papers.
- Nature reports climate change. “*The population problem*”. Vol 2 Junio 2008 <<https://www.nature.com/reports/climatechange>>. (13 Junio 2015).
- New, M., y Hulme, M. “*Representing uncertainty in climate change scenarios: a Monte –Carlo approach*”. Integrated Assessment 1 (2000) 203-213.
- O’Neill, B., et al. “*Demographic change and carbón dioxide emission*”. Lancet 2012; 380:157-64 (2012).
- O’Neill, B., MacKellar, F., y Lutz, W. “*Population and Climate Change*”. Cambridge University Press, 0521018021.
- OPEC, Monthly Oil Market Report, “*Oil market developments*”. Helfferstorferstrasse 17,A-1010 Vienna, Austria, 10 Junio 2015.
- Otto, I. et al. “*Socioeconomic data for global environmental change research*”. Nature Climate Change. Comentario. doi:10.1038/nclimate2593 (May 2015).
- PAI. “*Why population matters to climate change*”. Population Action International, 2011.
- Parson, E., y Fisher-Vanden, K. “*Integrated Assessment models of Global Climate Change*”. Annu. Rev. Energy Environ. 1997.22:589-628.
- Population Action International. “*Why Population Matters to Climate Change*”. PA
- Radner, D. “*The retirement prospects of the baby boom generation*”. ORES working paper series, number 74. January, 1998.
- Rao, M., y Samarth, A. “*Population dynamics and climate change: links and issues for development*”. Journal of Public Health, doi:10.1093/pubmed/fdq041.
- Risbey, J. et al. “*Assessing Integrated Assessments*”. Climatic Change 34: 369-395, 1996.
- Rogelj, J. et al. “*Energy system transformations for limiting end-of-century warming to below 1.5 °C*”. Nature DOI:10.1038/Nclimate2572.
- Romer, C. “*Great Depression*”. Forthcoming in the Encyclopædia Britannica. December 2013.
- Rosen, K. “*Matemática discreta y sus aplicaciones*”. 5ta edición. ISBN: 0072424346. 2011.
- Rosenzweig, C., y Parry, M. “*Potential impact of climate change on world food supply*”. NATURE Vol 367, 13 Enero 1994.

- Ruxanda, G. y Muraru, A., “*FDI and Economic Growth. Evidence from Simultaneous Equation Models*”. Romanian Journal of Economic Forecasting – 1/2010.
- Schneider, S. and Lane, J. “*Integrated Assessment Modeling of Global Climate Change: Much Has Been Learned—Still a Long and Bumpy Road Ahead*”. The integrated Assessment Journal: Bridging Sciences and policy. Vol. 5, Iss. 1 (2005).
- Schwanitz, V., “*Evaluating integrated assessment models of global climate change*”. Environmental Modelling & Software 50 (2013) 120-131.
- Schweizer, V., y O’Neill, B., “*Systematic construction of global socioeconomic pathways using internally consistent element combinations*”. Climate Change 2014 doi:10.1007/s10584-013-0908-z.
- Smid, J., Verloo, D., Barker, G. y Havelaar, A. “*Strengths and weaknesses of Monte Carlo simulation models and Bayesian belief networks in microbial risk assessment*”. International Journal of Food Microbiology, doi:10.1016/j.ijfoodmicro.2009.12.015.
- Smith, R. “*Use of Monte Carlo Simulation in Risk Assessments*”. Mid-Atlantic Risk Assessment, EPA903-F-94-001, 1994.
- Smith, S., Edmonds, J., Hatin, C., Mundra, A., y Calvin K., “*Near-term acceleration in the rate of temperature change*”. Nature Vol 5 2015 <www.nature.com/natureclimatechange> (25 Junio 2015).
- Spanos, A., 1986. “*Statistical Foundations of Econometric Modeling*”. Cambridge University Press.
- Spanos, A., 1990. “*The simultaneous-equations model revisited. Statistical Adequacy and Identification*”. USA Journal of Econometrics 44 (1990) 87-105. North-Holland. VP/ and Slale Universil.V. Blackshurg.
- Steck, T. “*Human population explosion*”. The encyclopedia of earth. <<http://www.eoearth.org/view/article/153596/>> (Febrero, 2014).
- Stern, D. “*The role of energy in economic growth*”. Crawford School, The Australian National University. CCEP working paper 3.10, October 2010.
- Stern, D., y Kaufmann, R. “*Is There a Global Warming Signal in Hemispheric Temperature Series?*”. The Australian National University CRES 9708, (1997).
- Stern, D. y Kaufmann, R. “*Detecting a global warming signal in hemispheric temperature series: a structural time series analysis*” Climatic Change 47: 411–438, 2000.
- Stern, D., Csereklyei, Z. y Rubio, M. “*Energy and the economy: Energy and the economic growth: the stylized facts*”. International Association for Energy Economics, 2014.
- Stone, D. A. & Allen, M. R. “*Attribution of global surface warming without dynamical Models*”. Geophysical Research Letters 32, L18711 (2005).

- Stone, D. A., Allen, M. R., Stott, P. A., Pall, P., Min, S.-K., Nozawa, T., & Yukimoto, S. “*The detection and attribution of human influence on climate*”. Annual Review of Environment and Resources 34, 1-16 (2009).
- Stone, D., et al. “*The Detection and Attribution of Human Influence on Climate*”. Annual Review of Environment Resources, Volume 34, 2009.
- Stone, D., y Allen, M. “*Attribution of global surface warming without dynamical models*”. Geophysical Research Letters, Vol. 32, L18711, doi:10.1029/2005GL023682, 2005.
- Stone, Daithi’ A. and Allen, M. R. “*Attribution of global surface warming without dynamical models*” Geophysical research letters, vol. 32, 2005.
- Stott, P., y Forest, C. “*Ensemble climate predictions using climate models and observational constrains*”. 2007 The Royal Society, doi:10.1098/rsta.2007.2075.
- Taylor, K., Stouffer, J., y Meehl, G. “*An Overview of CMIP5 and the Experiment Design*”. American Meteorological Society 2011, doi:10.1175/BAMS-D-11-00094.1.
- Tocher, K., Jones, G., y O’Connor, P., “*Monte-Carlo Simulation*”. Applied R&M Manual for Defence Systems Part D – Supporting Theory.
- Tollesfson, J., “*Climate-change ‘hiatus’ disappears with new data*”. Nature doi:10.1038/nature.201517700.
- Tyagi, A., “*A Model of Enviroment, Economy and Population – an Overlapping Generations Approach*”. Paper presentation for the Annual Meeting of the Population Association of America 2015.
- United Nations, “*Population, Environment and Development: The concise report*”. Economic and social affairs. ST/ESA/SER.A/202. New York, 2001.
- United Nations, “*Speakers Call for Greater Global Efforts in Implementing Goals of 1994 Conference on Population and Development, as General Assembly Reviews Progress*”. GA/11556, 2014.
- United States Enviromental Protection Agency, “*Causes of climate Change*”. <<https://www.epa.gov/climatechange/science/causes.html>>, (12 Agosto 2015).
- US EPA. “*Integrated Assessment Modeling*”. <<http://www.epa.gov/sustainability/analytics/integrated-assessment.html>>, (25 Junio 2015).
- Vandenbroucke, G. “*On a demographic consequence of the First World War*”, <http://www.voxeu.org/article/demographic-consequence-first-world-war> (Agostos 2012).
- Vellinga, P y Verseveld, W. “*Climate change and extreme weather events*”. Institute for environmental Studies, WWF. September 2000.
- Vitale, D., y Bilancia, M., “*Role of the natural and anthropogenic radiative forcings on global warming: evidence from cointegration-VECM analysis*”. Environ Ecol Stat 2013, doi:10.1007/s10651-012-0226-z.

- Vuuren, D., et al. “*A comprehensive view on climate change: coupling of earth system and integrated assessment models*”. Environmental –Research Letters doi:10.1088/1748-9326/7/2/024012.
- Vuuren, D. “*How well do integrated assessment models simulate climate change*”. Diciembre 2009, Climate change doi:10.1007/s10584-009-9764-2.
- World Bank, “*Beyond Economic Growth: An Introduction to Sustainable Development*”. Chapter 3: World Population Growth. Second edition, 2004.
- World Bank. “*Commodity markets outlook*”. Global economic prospects. Octubre 2014.
- WTRG Economics, “*History and Analysis – Crude Oil Prices*”. <<http://www.wtrg.com/prices.htm>>, (13 Julio 2015).
- Yohe, G. “*How to Select an Integrated Assessment Model*”. <<http://sedac.ciesin.columbia.edu/mva/MVAUG/ugselect.html#choosing>>, (10 Junio 2015).
- Yorba, L. “*President Nixon and the role of intelligence in the 1973 Arab- Israeli war*”. Presidential Series. Center for the study of intelligence, 2013.
- York, R., Rosa, E. y Dietz, T. “*STIRPAT, IPAT and ImPACT: analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts*”. Ecological Economics doi:10.1016/S0921-8009(03)00188-5.