

Efectos potenciales del calentamiento global sobre el bienestar y el crecimiento económico en Colombia: una aplicación del modelo DICE

Por:

Pablo Gómez Muñoz
Manuel Guzmán Gómez

Clasificación JEL:

O44

Asesor:

Alejandro Torres García

2019

Universidad EAFIT
Escuela de Economía y Finanzas

1. Introducción

Cuando se piensa en el calentamiento global y en los demás fenómenos climáticos es imposible no establecer una relación con las dinámicas económicas de los países, ya que es debido a la actividad humana que estos fenómenos se han venido presentado de manera más acelerada en las últimas décadas, producto del aumento en la población y, por ende, de la necesidad de aumentar progresivamente la explotación de los recursos naturales.

Por lo general, los análisis que se hacen sobre los impactos negativos que genera el calentamiento global a nivel mundial se realizan desde una perspectiva meramente ambiental, es decir, miden las consecuencias que el calentamiento global tiene sobre los biomas¹. Sin embargo, debido a que la discusión sobre el calentamiento global y el cambio climático se ha extendido en los últimos años a diferentes áreas de conocimiento, incluyendo la económica, resulta relevante hacer un análisis de cómo estos fenómenos son vistos desde la teoría económica y también cómo estos tienen efectos sobre el crecimiento económico y el bienestar de la población colombiana.

A este respecto, es importante contextualizar acerca de la repercusión de la actividad humana sobre los procesos naturales. Según lo indica Sánchez Albavera (2004) “la intensidad y la

¹ Biomas: es una gran área geográfica donde se comparte fauna, flora y condiciones climatológicas. El clima determina el tipo de bioma que existe en cada región.

diversidad de las intervenciones humanas en los procesos bióticos y geológicos crecieron enormemente durante el siglo XX” (p. 11). Así, la intervención humana en algunos sistemas naturales del planeta -como por ejemplo los ciclos globales del carbono, del agua y del nitrógeno- es impresionante. Prueba de ello es el increíble aumento en las emisiones atmosféricas de carbono que entre el año 1900 y el 2000 pasaron de 500 a 7.300 millones de toneladas anuales. De igual forma, durante el siglo XX, las emisiones humanas de nitrógeno procedentes de la combustión de carburantes fósiles aumentaron de 1,25 a aproximadamente 25 millones de toneladas anuales.

Lo anterior produjo entonces el aumento en la temperatura media mundial, especialmente en el último siglo. Por su parte, Mann *et al*, mediante un análisis de tendencias de las tres principales fuerzas que determinan la variabilidad del clima del planeta (actividad solar, actividad volcánica y concentración de Gases de Efecto Invernadero (GEI)), encontraron que, si bien los tres factores fueron determinantes en la variación de la temperatura, el factor que más incidió en esta variación durante el siglo XX fue la concentración de GEI (citado en González *et al*, 2003, p. 378). Es importante aclarar que el efecto invernadero es un fenómeno natural que ha estado funcionando por millones de años en el planeta, pero en los últimos años debido a las actividades humanas que requieren de quema de combustibles fósiles, cambios en el uso de la tierra, la deforestación y la agricultura, se han incrementado significativamente las concentraciones de GEI en la atmósfera terrestre, disminuyendo la capacidad de enfriamiento de la Tierra y provocando un forzamiento radiactivo positivo que genera un calentamiento en la superficie terrestre y la baja atmósfera. Este proceso es lo que se conoce como calentamiento global (Olivo, 2010).

La variación térmica mundial del siglo pasado trajo consigo varias consecuencias graves, entre ellas se encuentran la disminución de la superficie cubierta por nieve; la reducción en el tiempo en que algunos lagos y ríos permanecen congelados en el año; incrementos en el nivel del mar; mayor frecuencia e intensidad de eventos climáticos extremos; fenómenos como “El Niño” y “la Niña” más intensos; entre otros (González *et al*, 2003, p. 378).

Sin embargo, con el paso del tiempo, la sociedad ha adquirido un nivel de conciencia mayor frente a esta problemática y es por eso que muchos países han incluido la lucha contra el calentamiento global y el cuidado del ambiente dentro de sus agendas políticas, en donde plasman sus prioridades. Prueba de ello han sido los diversos congresos internacionales que han tenido lugar en varios lugares del mundo y en los que han participado las personalidades más importantes

del mundo. Los congresos más relevantes que han surgido bajo esta temática han sido: la Conferencia de Estocolmo, en 1972; el Informe Brundtland, en 1987; la Cumbre de la Tierra, en 1992; la Cumbre de Kyoto, en 1997; la Cumbre del Milenio, en el 2000; la Cumbre Rio+10, en 2002; la Cumbre Rio+20, en 2012; y la Conferencia de las Partes (COP) 21, también llamado Acuerdo de París, en 2015.

Ahora bien, los congresos internacionales que estaban más enfocados al tema del calentamiento global y cambio climático fueron la Cumbre o Protocolo de Kyoto y el Acuerdo de París. El Protocolo de Kyoto fue una de las primeras reuniones entre los países más industrializados con el fin de tratar el tema del cambio climático como una problemática que produce efectos negativos y significativos en el planeta. Esta reunión, según sostiene De García (2007), se llevó a cabo el 11 de diciembre de 1997 en la ciudad de Kyoto, Japón, y su objetivo principal era promover el desarrollo sostenible mediante la limitación y la reducción de las emisiones de GEI. De otro lado, el Acuerdo de París, como lo resume Fernández-Reyes (2016), es un acuerdo que surgió en el marco de la conferencia de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) sobre el clima (COP 21) que se llevó a cabo el 12 de diciembre de 2015 en París y el cual fue firmado por 195 naciones. El objetivo principal de este acuerdo fue lograr que el aumento de la temperatura promedio mundial se mantuviera muy por debajo de los 2°C y que las partes comprometidas con este acuerdo continuaran con los esfuerzos para limitar este aumento a 1,5°C respecto a niveles preindustriales, todo esto mediante una reducción considerable de las emisiones de GEI.

Si bien entonces se han realizado varios esfuerzos para mitigar y reducir los efectos del calentamiento global y el cambio climático, sus resultados solo pueden evidenciarse a largo plazo, por lo que no es posible todavía evaluar la eficiencia de las diferentes políticas que se han implementado alrededor del mundo para reducir las emisiones de GEI. Es por esto que se lleva a cabo la utilización de modelos económicos que buscan predecir los efectos de dichos esfuerzos en el crecimiento económico y el bienestar de la población.

Para comprender mejor lo anterior, se hace necesario entonces revisar el desarrollo teórico fundamental de las afectaciones del cambio climático sobre el crecimiento económico y el bienestar, que fue realizado por el economista William Nordhaus, quien es el creador del Primer Modelo de Evaluación Integrada (IAMs, por sus siglas en inglés), el cual responde al nombre de modelo Dinámico Integrado de Clima y Economía (DICE). Este último “es un modelo agregado

global que ve la economía del cambio climático desde la perspectiva neoclásica de crecimiento económico” (Ruiz Velasco, 2017, p. 16). Adicional a esto, integra la economía, las variables ambientales más importantes y los impactos para lograr identificar los costos y beneficios de tomar medidas para reducir el cambio climático.

El presente trabajo tiene como objetivo determinar como el bienestar de la población colombiana se ve afectada a partir de las consecuencias del calentamiento global, mediante la construcción de un modelo simple de crecimiento económico ala Ramsey, adaptado para considerar los efectos potenciales del cambio climático sobre la productividad y bienestar social, siguiendo la filosofía planteada en el marco del modelo DICE.

Por medio del presente trabajo se obtuvieron resultados a favor de la existencia de una relación negativa entre la degradación ambiental y los niveles crecimiento económico y de bienestar, demostrando que los niveles de emisiones de CO₂ liberados en un periodo, consecuencia de las actividades productivas, generan unos daños ambientales que reducen la productividad en el periodo siguiente, provocando así una pérdida en el bienestar. Lo anterior, haría necesaria la implementación de instrumentos que permitan de cierta forma mitigar estos efectos negativos para reducir dichas pérdidas.

El resto del trabajo se divide en las siguientes secciones: en la sección 2 se encuentra una revisión de literatura llevada a cabo con el fin de contextualizar sobre la forma en la que se ha desarrollado la corriente ambiental dentro de la teoría económica, además de ahondar en la explicación del modelo DICE. En la sección 3 se hace la descripción del modelo económico implementado, se explica su composición, el significado de sus variables y se realiza el análisis de los resultados obtenidos del mismo. Seguidamente, en la sección 4 se hallan las conclusiones finales del trabajo y, posteriormente, en la sección 5, están las referencias bibliográficas.

2. Marco teórico

2.1. La Economía y el Ambiente

La Economía Ambiental es una disciplina relativamente nueva de la Economía Aplicada, cuya aparición se sitúa en los inicios de la década del sesenta, a la par con la proliferación de los movimientos ecologistas y ambientalistas en los países más desarrollados del mundo (Lambadeira, 2007, p. 3). Sin embargo, los fundamentos teóricos de esta disciplina pueden situarse mucho antes,

con aportes relevantes de diferentes autores, como Thomas R. Malthus (1798), John S. Mill (1848), William S. Jevons (1865), Alfred Marshall (1890), Arthur C. Pigou (1920), entre otros.

Inicialmente, uno de los primeros autores en mostrar cierto nivel de preocupación por cuestiones asociadas a la escasez de los recursos naturales fue Thomas R. Malthus. Sus teorías se fundamentaron en el conflicto existente entre la capacidad de la tierra para producir alimentos y el incremento de la población, pues el ritmo de crecimiento poblacional es superior a la capacidad que tiene la tierra para aumentar o mantener un volumen de producción de alimentos que permita la subsistencia de la especie. En otras palabras, Malthus explica que a pesar de que exista una tendencia positiva y creciente en la destinación de tierras para actividades agrícolas, esto no alcanza a impedir que la propensión dominante sea la saturación en el uso de la tierra (Alfranca, 2012).

A continuación, Willian S. Jevons también aportó a la consolidación de la Economía Ambiental como una nueva disciplina de la teoría económica principalmente gracias a su teoría del agotamiento de los recursos y su contribución en la teoría de la utilidad marginal del consumo. En primer lugar, su teoría sobre el agotamiento de los recursos consiste básicamente en que cuando las reservas de un recurso comienzan a agotarse la obtención del mismo se dificulta, encareciendo el producto final. Para explicar esta teoría, Jevons utilizó la extracción de carbón en Inglaterra en 1865 como ejemplo, pues indicó que, debido a la rápida industrialización de la época, las reservas de carbón estaban comenzando a agotarse, lo que forzaba a los mineros a llevar a cabo la extracción del mineral en reservas menos accesibles, dificultando su obtención y, por lo tanto, encareciéndolo. En segunda instancia, Jevons estableció que cuando una mercancía era esencial y abundante su precio no sería elevado puesto que una unidad adicional del bien no tendría un gran valor para los consumidores; mientras que si una mercancía es escasa su valor sería elevado, ya que los consumidores estarían dispuestos a pagar más por cantidades adicionales del bien, aunque este no sea esencial para la vida, ejemplo de ellos serían el oro y los diamantes (Alfranca, 2012).

Ahora bien, un concepto clave en la teoría de la Economía Ambiental es el de *externalidad*, introducido por Alfred Marshall. Este autor también concluyó, por medio del análisis económico del sector minero y del sector agrícola, que la tierra que se encuentra destinada para la agricultura, si es usada de forma correcta, podría mantener o soportar un ritmo de explotación durante un

periodo de tiempo ilimitado; mientras que, por otro lado, en el caso de la minería, concluye que es imposible evitar el agotamiento de los recursos.

Es de aclarar que, inicialmente, Marshall creó el concepto de externalidad considerando únicamente la existencia de externalidades positivas relacionadas con el desarrollo industrial, las cuales tienen que ver con los beneficios que los agentes pueden aprovechar sin realizar ningún tipo de pago adicional ya que se encuentran por fuera del mercado o por fuera de la negociación. Posteriormente, Arthur C. Pigou, postuló que este tipo de “bienes de no mercado” pueden representar tanto un beneficio como un costo, en otras palabras, existen tanto las externalidades positivas como las negativas (Alfranca, 2012). En este sentido, cuando una zona es declarada como reserva natural es un ejemplo de una externalidad positiva, pues de esta forma se la protege (su agua, flora y fauna) de la explotación con fines productivos. Por otro lado, un ejemplo de externalidad negativa es el caso en el que la fumigación que se lleva a cabo en un cultivo de flores contamina los pastos de una finca ganadera aledaña, afectando a las vacas y, por ende, a la producción de leche. Aquí el precio de la leche no recogería el costo del daño por la fumigación ni tampoco se podría trasladar este costo al precio de las flores, por lo que el mercado falla (Castaño & González, 2011).

Con los ejemplos anteriores se podría afirmar que la aparición de las externalidades se da cuando las actividades que realizan los diferentes agentes económicos inciden de cierta forma en la producción o en el consumo de otros agentes, sin que exista ninguna especie de compensación. Es decir que, si bien se sabe de la existencia de estos costos o beneficios, al no tener un precio establecido, ni los beneficiados ni los perjudicados deben pagar compensación alguna.

Ahora bien, es consabido que los recursos naturales son indispensables para el crecimiento económico, por lo que el agotamiento de estos sería visto como un gran problema para la economía. Es por esto que la sociedad está constantemente en la búsqueda de una asignación óptima de los recursos naturales no renovables de tal forma que estos sean extraídos de la forma más conveniente posible, maximizando el bienestar de la población. Harold Hotelling (1931), para dar solución a este problema, presentó una regla según la cual era posible encontrar el óptimo de extracción de un recurso natural no renovable sin llegar al agotamiento total del mismo y maximizando, a la vez, los beneficios del propietario. Esta regla recibe el nombre de Regla Hotelling (González, 2015, p. 5)

Por su parte, K. William Kapp (1950) es quien se refiere propiamente a las afectaciones que generan las dinámicas productivas, en el medio ambiente, en busca de un crecimiento económico. Dicho en otras palabras, Kapp vincula al crecimiento económico con las consecuencias ambientales del mismo, y lo hace por medio de lo que él denomina costos sociales, los cuales son aquellos que resultan de la actividad productiva y que se transmiten a terceros por medio de la contaminación, ya sea del aire o de fuentes hídricas. La contaminación es el ejemplo por excelencia de externalidad negativa debido a que esta tiene la capacidad de generar daños en los procesos productivos de los diferentes sectores de la economía, además que puede generar afectaciones en la salud de los agentes entre muchas otras consecuencias negativas (Alfranca, 2012).

Posteriormente, Kenneth Boulding (1966) centró su atención en el concepto de sostenibilidad. Su trabajo concluye que el crecimiento económico sostenido es insostenible, especialmente por la forma en la que se venían desarrollando los países más industrializados de la época. Boulding afirma que el sistema socioeconómico mantiene una constante interacción con el ecosistema. Es de aclarar que en el primer sistema entran recursos y salen en forma de residuos, los cuales pueden volver a reciclarse como recursos materiales luego de incurrir en un gasto energético y una eficiencia limitada. Es por estas razones que el autor considera que el planeta tierra es un sistema cerrado que no tiene la capacidad para soportar un crecimiento económico mundial, al tener limitadas una cantidad de recursos y una capacidad para absorber los residuos contaminantes que resultan de las actividades productivas (Alfranca, 2012).

Al llevar a cabo un estudio sobre el camino que ha seguido la teoría económica ambiental, se pudo notar que, a pesar de que se dan ciertas contradicciones entre los diferentes autores, hubo algo en común entre todos y es que buscaron integrar a la economía con el ambiente, y sus aportes en conjunto fueron los que conformaron los fundamentos teóricos de la Economía Ambiental, la cual pretende aplicar los principios y conceptos económicos a la gestión de los recursos naturales y a los problemas ambientales.

Entonces, a raíz del surgimiento de la corriente ambiental dentro de la economía, la atención de los pensadores de la materia dejó de enfocarse únicamente en el agotamiento de los recursos y comenzó a expandirse para analizar y solucionar un mayor número de problemáticas,

como por ejemplo las afectaciones del calentamiento global sobre el crecimiento económico y el bienestar de los agentes económicos, problema que es el objeto de estudio del presente trabajo.

Es de conocimiento general que cuando se hace referencia al crecimiento económico es inevitable pensar en niveles de contaminación y daños ambientales crecientes, puesto que cuando una economía crece significa que tuvo incrementos en sus niveles de producción, lo que a su vez significa una utilización cada vez mayor de los recursos naturales. Si bien esta conexión que se hace inicialmente de manera intuitiva entre crecimiento y degradación ambiental es cierta, existen sustentos teóricos que indican o sugieren que a mayores niveles de desarrollo económico, la degradación ambiental va siendo cada vez menor, esto debido principalmente a los diferentes avances tecnológicos que permiten cambiar las dinámicas productivas de las economías para que estas sean cada vez más amigables con el ambiente.

Un ejemplo teórico importante que respalda esta idea sería el argumento detrás de la Curva Ambiental de Kuznets (EKC, por sus siglas en inglés). El razonamiento detrás de la hipótesis principal de la EKC es que, como lo explica Dinda (2004), en una etapa inicial o temprana de desarrollo, la degradación ambiental incrementa junto con los niveles de ingreso *per cápita*. Pero en etapas posteriores donde ya se evidencian niveles de desarrollo mayores, esta degradación tiende a decrecer (relación que se representa por medio de una U invertida).

Lo anterior, explicado de otra manera, significa que, en niveles bajos de desarrollo económico, la degradación ambiental se ve limitada por los impactos de la actividad económica de subsistencia (primitiva) en los recursos y por las bajas cantidades de desechos biodegradables. Luego, a medida que el desarrollo económico se acelera con el despegue de la industrialización, la extracción de otros recursos naturales y con la intensificación de la agricultura, las tasas de agotamiento de los recursos comienzan a exceder sus tasas de regeneración, por lo que la generación de desechos aumenta de manera importante tanto en su cantidad como en su toxicidad. Posteriormente, en los niveles más altos de desarrollo el cambio estructural hacia industrias y servicios más especializados -junto con una mejor tecnología, una mayor conciencia ambiental, el cumplimiento de las regulaciones ambientales impuestas por las entidades reguladoras y mayores gastos para la conservación y cuidado del ambiente- dan como resultado una nivelación y una disminución gradual de la degradación ambiental.

Si la hipótesis de la EKC llega a sostenerse, en general, esto podría implicar que, en lugar de representar una amenaza para el ambiente como generalmente se cree, el crecimiento económico sea el medio para el mejoramiento ambiental. Sin embargo, en términos de la experiencia actual y de los diferentes estudios que se han llevado a cabo, se ha demostrado que, en algunos casos, la evidencia ha sido consistente con la hipótesis de la EKC, mas es de resaltar que en otros casos no, como lo menciona Dinda (2004).

Una postura similar es la de Holtz-Eakin & Sendel (1995), quienes en sus trabajos buscaron la forma de relacionar las emisiones de CO₂ con el Producto Interno Bruto (PIB) (ambos en sus términos *per cápita*), a partir de un modelo econométrico en el cual se incluyen ambas variables, discriminadas por año y país. Gracias a este modelo econométrico, los autores concluyen que, efectivamente, existe una pequeña relación entre ambas variables y, en especial, una menor propensión marginal a emitir CO₂ a medida que se desarrollan las economías. Esto quiere decir que cuando la producción se tecnifica y las economías en el tiempo adquieren mayor conciencia ambiental, los niveles de emisiones aumentan en menor proporción al desarrollo.

Con el fin de determinar si la teoría detrás de la EKC y del aporte realizado por Holz-Eakin & Sendel es consistente, se llevó a cabo un ejercicio práctico en el cual se tomaron las variables PIB (US\$ a precios actuales) y emisiones de CO₂ (kt, kilotonelada) como aquellas que exponen el nivel de crecimiento y de degradación ambiental para Estados Unidos, China y para el caso de Colombia, respectivamente. Los datos usados para el ejercicio fueron tomados de la base datos del Banco Mundial (2019) y van desde 1960 hasta el año 2014, para cada país. A continuación, se presentan las gráficas resultantes:

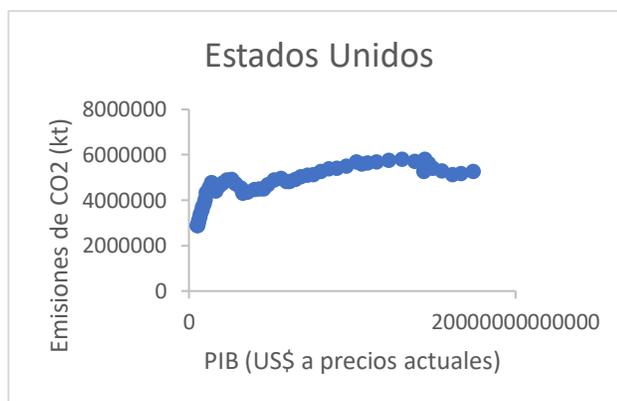


Figura 2.1.1

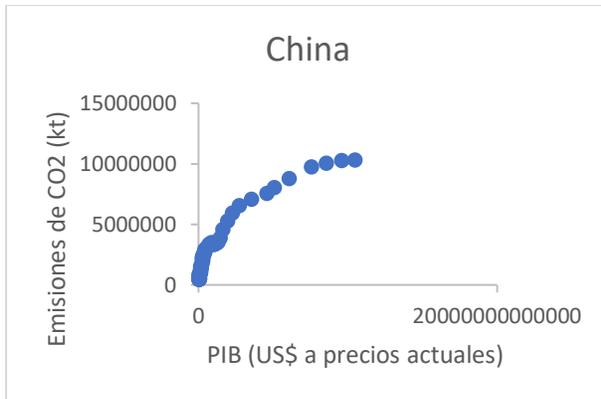


Figura 2.1.2

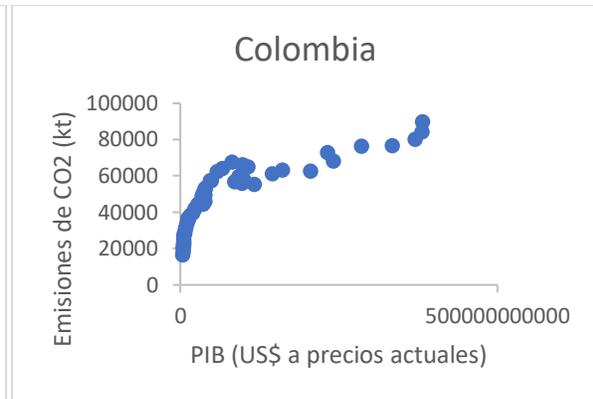


Figura 2.1.3

Fuente: Banco Mundial (2019)

Cada punto en las gráficas representa el nivel de emisiones de CO₂ correspondiente a cada nivel de producción, los cuales van siendo mayores en cada periodo. Es importante aclarar también que, debido a que los datos utilizados van desde el año 1960, el comportamiento de U invertida, que se describe en la teoría de la EKC, no es tan evidente. Si los datos fueran tomados desde varias décadas atrás, el comportamiento se vería más marcado en las gráficas ya que se contaría con unos niveles de producción menores, pero con un ritmo de crecimiento mayor. Sin embargo, se pueden apreciar en las tres gráficas los niveles decrecientes en las emisiones de CO₂ a medida que el nivel de producción va aumentando.

Para el caso de Estados Unidos se puede observar cómo el nivel de emisiones de CO₂ se ha estabilizado a medida que el nivel de producción ha aumentado, a tal punto que inclusive las emisiones han disminuido luego de alcanzar su nivel máximo. De otra parte, el caso de China dista un poco del de Estados Unidos ya que, como se puede ver, aunque los niveles de las emisiones de CO₂ han decrecido, aún no se han estabilizado. Por el contrario, se puede apreciar cómo a medida que el nivel de producción va aumentando el nivel de emisiones también lo hace. Por último, la gráfica de Colombia muestra cómo el aumento en las emisiones se ha controlado a medida que el nivel de producción ha aumentado, es decir, se evidencia el comportamiento decreciente de las emisiones. Esto es sorprendente teniendo en cuenta que Colombia es un país en vía de desarrollo, lo que significa, según la teoría, que las emisiones deberían tener un aumento marcado debido a que la industria se sigue desarrollando y a la falta de conciencia ambiental que se supone existe en los países en vía de desarrollo.

Adicionalmente, otra forma de analizar los efectos del calentamiento global sobre el crecimiento económico y el bienestar de la población podría hacerse por medio de los desastres naturales, ya que, como se mencionó anteriormente, el aumento en la ocurrencia y en la intensidad de fenómenos climáticos extremos es una consecuencia del calentamiento global. Tal cual lo menciona Jaramillo *et al* (2015) en su trabajo, los fenómenos naturales, en algunos casos, pueden causar afectaciones en lo que se refiere a la acumulación de capital físico y humano, además de la posible destrucción de los recursos naturales. Lo anterior puede provocar un fuerte impacto sobre el crecimiento económico tanto en el corto como en el largo plazo, siendo las economías en vías de desarrollo las más afectadas debido a que la población más vulnerable es la más pobre.

A este respecto, diferentes autores han planteado la existencia de una relación no lineal entre el nivel de desarrollo económico de un país con el impacto potencial de un desastre. Relación que se explica por medio de una curva de Kuznets, en la que los países con un nivel bajo de desarrollo no tienen mucho que perder ante la ocurrencia de un desastre natural. Pero, a medida que el nivel de desarrollo de un país va aumentando, también se incrementa su vulnerabilidad, a causa de la creciente urbanización y del incremento de los activos. Sin embargo, luego de alcanzar cierto nivel de desarrollo, los países comienzan a tener una mayor capacidad para protegerse contra el riesgo que representa un desastre natural (Jaramillo *et al*, 2015, p. 10-11).

Finalmente, lo anterior, junto con lo planteado en la EKC y el aporte realizado por Holtz-Eakin & Sendel, indica que, muy por el contrario de ser un enemigo del ambiente, el desarrollo y el crecimiento económico son las vías por las cuales se pueden solucionar los problemas ambientales. Y esto porque, por un lado, la disminución de las emisiones de CO₂ comienza a darse en los países con niveles más altos de desarrollo, aportando a que los niveles de temperatura incrementen en un menor ritmo. Adicionalmente, un nivel alto de desarrollo les facilita a los países la estructuración de planes o programas que disminuyan la vulnerabilidad ante desastres naturales que podrían tener impactos sobre el crecimiento económico.

2.2 Contexto ambiental colombiano

Colombia es uno de los países más ricos del mundo en cuanto a biodiversidad. Rangel-Ch (2005, p. 292) indica que, para el año 2005, existían en el país alrededor de 26.500 especies de

plantas con flores, lo que representa un 12% de la riqueza vegetal del planeta. Además, en términos de fauna, Colombia posee el mayor número de especies en el mundo, con, aproximadamente, 3.312. Sin embargo, al mismo tiempo, sufre de serios problemas ambientales que constantemente amenazan las condiciones de riqueza ambiental nombradas anteriormente.

La principal amenaza a la biodiversidad y a la situación climática de Colombia es la creciente deforestación en diferentes regiones, responsable, para el 2005, de la pérdida de un 30% en la cobertura boscosa original del país, siendo la región Andina y el Chocó Biogeográfico las zonas más afectadas. Según Meyer *et al* (2019), la tasa de deforestación en Colombia es de 219.973 hectáreas por año, de las cuales el 6,1%, equivalente a 13.474 hectáreas, provienen del Chocó Biogeográfico. Las razones por las cuales se presentan estos niveles de deforestación están vinculadas a la extracción de combustibles fósiles y de recursos para actividades productivas, minería ilegal y por la conversión de los bosques para agricultura.

También el aumento significativo en el nivel de emisiones de CO₂, que se ha presenciado en el país, es uno de los principales culpables del deterioro ambiental. El desarrollo de la industria colombiana, la deforestación, la combustión de los vehículos, entre otros factores, son los causantes de que los niveles de CO₂ liberados en la atmósfera se incrementaran en un 412,4% entre 1960 y 2014. Esto contribuyó al calentamiento global y, por lo tanto, trajo consecuencias muy negativas para el medio ambiente del país. A continuación, se presenta una gráfica que ilustra dicho incremento en el nivel de emisiones.

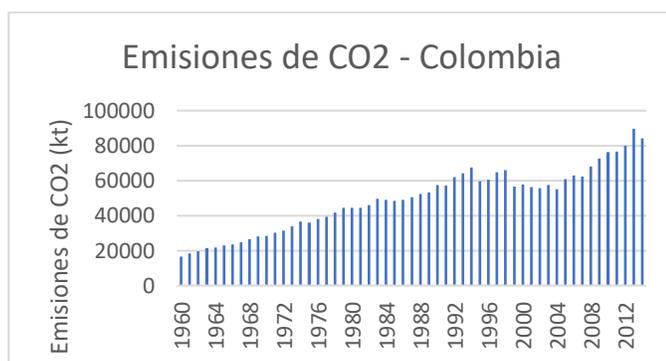


Figura 2.2.1

Fuente: Banco Mundial (2019)

Situaciones como las mencionadas anteriormente y como lo son la cacería ilegal de especies animales, los monocultivos, los cultivos ilícitos, los constantes ataques de grupos

subversivos a líneas petroleras que afectan las fuentes hídricas, entre muchos otros, son las principales problemáticas ambientales que afectan la biodiversidad y el bienestar de los y las colombianas.

Teniendo en cuenta lo explicado anteriormente, las consecuencias del cambio climático en Colombia son innegables. El aumento de aproximadamente 0,65°C en la temperatura de la superficie durante los últimos 50 años; el del nivel del mar en 3,1 milímetros por año durante los últimos 15; y el derretimiento de los glaciares a un metro de espesor por año son las principales afectaciones que se han presentado en el país, según afirma Carlos Costa (2007) ex director del Instituto De Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).

Por otro lado, estos cambios en el entorno generan a su vez diferentes consecuencias sobre los recursos, como por ejemplo los sistemas de agua dulce del país los cuales han sufrido cambios importantes en su operación, de esta forma lo describe María Claudia García (2012), subdirectora del IDEAM: “los caudales máximos serán más pronunciados en épocas húmedas y los mínimos serán más bajos durante periodos secos” (p. 62).

Ahora bien, ya que se abordaron las afectaciones que se han hecho presentes en el país debido al calentamiento global, es importante realizar un monitoreo sobre la regulación ambiental que existe en territorio colombiano. Para ello, inicialmente, se debe destacar la participación del país en congresos internacionales que han surgido alrededor de esta problemática, como lo han sido: la conferencia de Estocolmo en el año 1973 y la COP 21 o Acuerdo de París en 2015, entre otros; ya que, a partir de estos, es que se ha generado gran parte de la regulación.

Luego de la participación de Colombia en la conferencia de Estocolmo, se creó la Ley 23 de 1973, con la cual se le concedieron al presidente de la República facultades extraordinarias para expedir el Código de los recursos naturales y protección al medio ambiente. A partir de lo anterior, en el año 1974 se sancionó el decreto Ley 2811 por el cual se dictó el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente, en donde se definió su objetivo en el artículo segundo “[...] fundado en el principio de que el ambiente es patrimonio común de la humanidad y necesario para la supervivencia y el desarrollo económico y social de los pueblos” (Ley N° 2811, 1974).

Asimismo, este código es el contacto inicial y el más importante que se ha generado en materia de regulación ambiental en el país pues mediante él se siguen los lineamientos legislativos para el cuidado, preservación y mantenimiento de los recursos naturales. Posteriormente, se creó

la Constitución de 1991 donde se introdujo un cuerpo normativo garantista y promotor de las políticas ambientales vigentes para la época y donde, más adelante, mediante la Ley 99 de 1993, se crearon instituciones veladoras del cumplimiento normativo, como lo es el Sistema Nacional Ambiental (SINA), el Ministerio de Ambiente y las Corporaciones Autónomas Regionales (CAR), principalmente.

A partir de los acontecimientos explicados anteriormente es que nacen la normatividad ambiental y los entes que la regulan, los cuales se han ido adaptando, a medida que avanza el tiempo, con el propósito de mejorar las regulaciones que siguen vigentes hasta el día de hoy.

Cabe aclarar que, a raíz del Acuerdo de París, se creó el decreto 1076 de 2015 por medio del cual se expidió el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiental y Desarrollo Sostenible, del que es importante destacar los objetivos de desarrollo que se dictaron y a los cuales se comprometió Colombia en la COP 21 para regir la normatividad de los años siguientes.

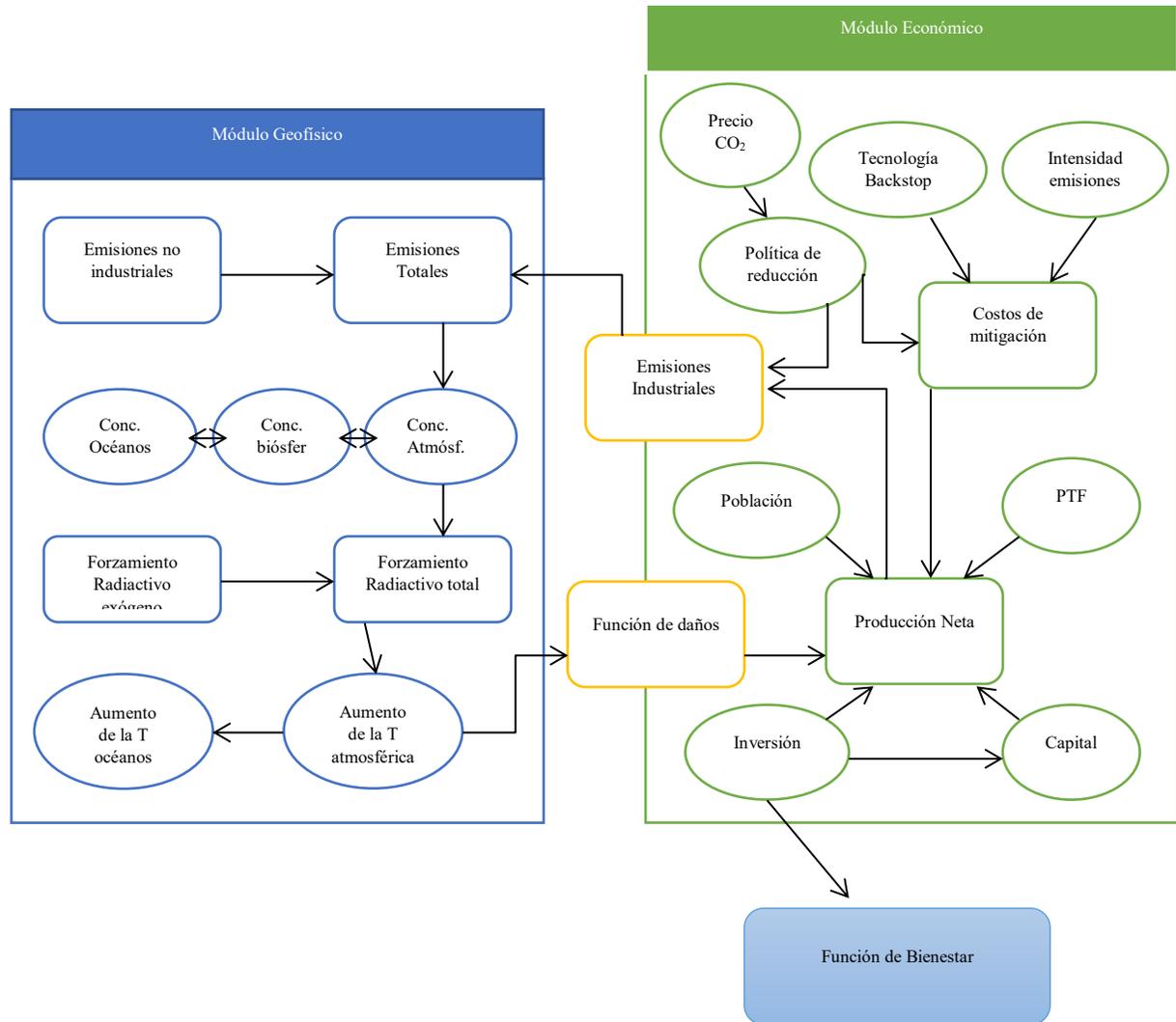
2.3 Una aproximación a la cuantificación de los impactos sobre el bienestar social y el crecimiento: el modelo DICE

El modelo DICE, desarrollado por el economista William Nordhaus (2013), es un modelo analítico y empírico cuyo propósito es integrar la economía con la ciencia climática, el ciclo del carbono y los impactos ambientales, de tal forma que se logren calcular los costos y beneficios de tomar decisiones para reducir los cambios en la temperatura. Este modelo ha sido útil para que los economistas comprendan cómo las emisiones de GEI se acumulan en la atmósfera, afectando las temperaturas medias globales, y cómo este incremento en las temperaturas podría afectar negativamente la productividad y el consumo en una economía. Este modelo, al incorporar una función de bienestar (ver Ecuación 2.3.1) que valora el flujo de consumo a lo largo del tiempo, permite ilustrar también los efectos que podrían traer al bienestar de la población las diferentes políticas de reducción de GEI (Ruiz Velasco, 2017).

$$W = \sum_{t=0}^{\infty} \ln c_t * \beta^t \quad (2.3.1).$$

Ahora bien, antes de comenzar con el análisis es necesario realizar un acercamiento más amplio hacia la dinámica del modelo DICE. En este modelo se cuenta con tres módulos: uno económico, uno geofísico y uno que consiste en la función de bienestar. Las conexiones entre los módulos se pueden apreciar de mejor forma en el esquema 2.3.1, donde se observa el módulo

geofísico, en el cual se producen los cálculos para determinar la función de daños. En este se incluyen componentes climáticos como: el ciclo del carbono, el forzamiento radiactivo, la concentración de CO₂ y los aumentos de temperatura.



Esquema 2.3.1. Sacado de Ruiz Velasco, 2011, p. 33.

Puede observarse que en el módulo económico se tienen los cálculos productivos normales de la teoría neoclásica: producción neta, población, capital, inversión y productividad. Pero, además, en este módulo se incluyen las emisiones industriales, las cuales son el factor inicial con el cual se determinan los daños climáticos que afectan la productividad. Es decir, el producir hoy genera unas emisiones que desencadenan un aumento en la temperatura, el cual genera unos daños sobre la productividad de los periodos siguientes, provocando la disminución de esta (Nordhaus, 2013, p.5).

A este respecto, Nordhaus incluye en la producción neta de su modelo la variable Omega (Ω), encargada de medir las pérdidas de productividad derivadas del ciclo anteriormente descrito, y la función de costos de mitigación, como se puede observar en la ecuación 2.3.2. Allí la variable Omega hace referencia a la función de daños, la cual es definida por la ecuación 2.3.3, la cual es decreciente y se deriva de una función cuadrática de los aumentos de temperatura provenientes de la producción.

$$Q_t = \Omega_t * (1 - \Lambda_t) * A_t * k_t^\alpha * l_t^{1-\alpha} \quad (2.3.2). \text{ (Tomado de Ruiz Velasco, 2017, p. 58)}$$

$$\Omega_t = \frac{\psi * T a t_t^2}{1 + \psi * T a t_t^2} \quad (2.3.3). \text{ (Tomado de Ruiz Velasco, 2017, p. 66)}$$

Lo anterior se puede ver de forma más clara en el esquema 2.3.1. Pero, en conclusión, la función de daños por cambio climático del modelo DICE depende de la producción de los periodos anteriores. El modelo a su vez construye una ecuación empírica para justificar la mitigación, la cual depende, en su mayoría, de la inclusión del precio de tecnologías limpias (tecnología Backstop ($Pback_t$)), pero también de las políticas de reducción y de la intensidad de emisiones industriales (σ_t), como se muestra en la ecuación 2.3.4. Esta función de costos de mitigación afecta la productividad del periodo en el cual se toma la decisión de mitigar, pero a su vez reduce la función de daños, al disminuir las emisiones generadas.

$$\Lambda_t = \frac{\sigma_t * Pback_t}{2,6} * \mu_t \quad (2.3.4). \text{ (Tomado de Ruiz Velasco, 2017, p. 69)}$$

Es decir, la dinámica del modelo propuesto por Nordhaus trata de explicar no solo las pérdidas de bienestar provocadas por los aumentos de temperatura, sino también la importancia de la mitigación y cómo esta puede reducir la influencia sobre los periodos siguientes de la pérdida de bienestar.

Por su parte, Ruiz Velasco (2017) llevó a cabo una aplicación del modelo DICE en un ejercicio que comprendía diferentes escenarios, en el que pretendía capturar los efectos de las diferentes políticas o instrumentos que se están implementando a nivel mundial para la mitigación de los impactos del calentamiento global. Para esto construyó varios escenarios, entre los cuales se encontraba uno base, uno óptimo, uno en el que se implementaba el Acuerdo de París y otro en el cual Estados Unidos dejaba de ser parte del acuerdo anteriormente mencionado. El resultado más relevante que arrojó dicho ejercicio fue el que indicaba que grandes esfuerzos para mitigar los

efectos del cambio climático pueden generar pérdidas importantes en los niveles de bienestar. Así mismo, Nordhaus (2014, p. 308) replica el modelo DICE2013-R de forma global para hallar los costos sociales del carbono, donde concluye que para el año 2015, el costo por tonelada de CO₂ emitido será de 18,6 dólares estadounidenses (USD).

3. Un modelo de crecimiento económico con costos ambientales en la productividad:

3.1 Un modelo básico de referencia

Siguiendo la línea básica del módulo económico propuesto en el modelo DICE, el análisis de este trabajo comienza con la construcción de un modelo de crecimiento neoclásico, específicamente el modelo de Ramsey, donde se supone una economía pequeña y cerrada, y se asumen rendimientos constantes a escala. Este se encuentra compuesto por una función de bienestar, la cual está dada por la sumatoria desde cero hasta infinito de la utilidad proveniente del consumo (c) de cada periodo, descontada por un factor de preferencia intertemporal (β), como se puede apreciar en la ecuación 3.1.1. Esta nos permite medir los niveles de bienestar social alcanzados bajo diferentes especificaciones del modelo, lo cual será fundamental en este estudio gracias a que posibilitará, más adelante, medir la pérdida de los mismos. En el modelo empleado se utilizará una forma funcional básica pero ampliamente utilizada en la literatura, en donde la utilidad instantánea está determinada por el logaritmo natural del consumo descontado por el factor de preferencia (como se puede observar en la ecuación 3.1.2).

$$W = \sum_{t=0}^{\infty} u[c_t] * \beta^t \quad (3.1.1).$$

$$W = \sum_{t=0}^{\infty} \ln c_t * \beta^t \quad (3.1.2).$$

Este modelo a su vez está sujeto a diferentes restricciones. Una de ellas es la acumulación de capital, la cual está dada por el capital (k) del periodo pasado (descontado por la depreciación (δ)) acompañado de la inversión (i) del mismo periodo (ver ecuación 3.1.3). También se encuentra sujeto a la producción, la cual, para simplificar, se asumirá que está compuesta por la productividad

total de los factores (A) y el capital por trabajador², el cual depende del parámetro alfa (α) que representa la participación del capital observado en el producto, representada de manera funcional en la ecuación 3.1.4.

Por último, se tiene el cierre macro o identidad macroeconómica, donde se define que la producción es el resultado aditivo del consumo y la inversión, como se puede observar en la ecuación 3.1.5.

$$k_{t+1} = (1 - \delta) * k_t + i_t \quad (3.1.3).$$

$$y_t = A_t * k_t^\alpha \quad (3.1.4).$$

$$y_t = c_t + i_t \quad (3.1.5).$$

Ciertamente, el problema del planificador central es maximizar el valor presente de la utilidad de toda la vida de las familias, sujeto a las restricciones descritas anteriormente, lo que equivale a obtener los senderos temporales de consumo y ahorro (inversión). Para este fin se debe realizar un proceso de optimización para obtener las condiciones de primer orden del problema. Luego de obtenerlas, es posible lograr el estado estacionario del modelo (ver Anexo 1). De esta manera, resultan las siguientes condiciones de primer orden:

$$k_{ss} = \left(\frac{1 - \beta(1 - \delta)}{\beta * \alpha * A_{ss}} \right)^{\frac{1}{\alpha - 1}} \quad (3.1.6).$$

$$c_{ss} = A_{ss} * k_{ss} - \delta * k_{ss} \quad (3.1.7).$$

Como se aprecia en las dos ecuaciones anteriores, los valores de estado estacionario de k y c dependen exclusivamente de los parámetros estructurales de la economía analizada. En este punto se realiza la calibración correspondiente al modelo empleado, implementando los valores utilizados por Hamman y Riasco (1998) para el caso colombiano, donde se toma una tasa de participación del capital observado en el producto (α) de 0.33, una tasa de depreciación de 0.05 y una tasa de preferencia de 0.93 (de tal manera que el retorno al capital en estado estacionario sea cercano al 10%). Además, se asume que la constante A (productividad total de los factores), la cual es un parámetro de escala de la función de producción, equivale a uno, por conveniencia (p.

² Dado que la función de producción es homogénea de grado 1, sus propiedades se mantienen a nivel *per cápita*. En este modelo se asume que no hay crecimiento poblacional.

15). Estos valores establecidos por Hamman y Riasco en 1998, pueden ser implementados en el presente modelo gracias a que en ambos se supone y se lleva a estado estacionario.

Ahora que se cuenta con las ecuaciones de primer orden del modelo base en estado estacionario, y ya realizada la parametrización del mismo, se deben encontrar los valores óptimos de consumo (c^*) y de capital (k^*)³, los que a su vez permitirán hallar los valores óptimos para la producción, la inversión y por supuesto el bienestar o utilidad. Por ende, de lo anterior se obtuvieron los siguientes resultados:

Variable en estado estable	Resultados modelo base
c^*	1,2470
k^*	2,6515
Pcto. Neto	1,3796
u	0,2207
i	1,15886

Tabla 3.1.1

Los resultados de este escenario o modelo inicial mostrados en la tabla anterior serán de utilidad para tomarlos como referencia a continuación, gracias a que son los valores óptimos de un modelo de Ramsey sencillo y netamente económico al cual se le agregará, en el siguiente apartado, el componente climático.

3.2 Un modelo con daños climáticos

Con el fin de incluir daños climáticos y evaluar sus efectos potenciales en términos de bienestar social, se tomó como fundamento teórico el modelo creado por William Nordhaus, en el cual, como observó anteriormente, se cuenta con un módulo geofísico para dar explicación a los factores ambientales. Este esencialmente propone que los daños generados sobre la producción son derivados de los aumentos en temperatura, que al mismo tiempo son resultado de los ciclos

³ Los cálculos referentes a la solución del modelo fueron obtenidos en el aplicativo Matlab R2019a, por medio de la licencia ofrecida por la Universidad EAFIT para los estudiantes.

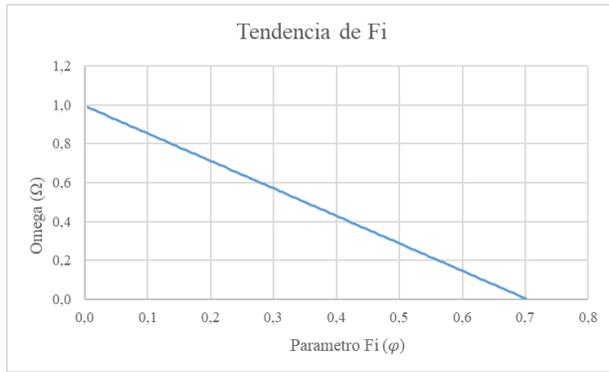
productivos pasados. Es decir, una proporción de la producción de hoy afectará de manera negativa la temperatura, aumentándola, lo cual afecta los ciclos productivos siguientes. De esta forma, como lo verifica Ruiz Velasco (2017, p.66): “El modelo DICE asume que a medida que sube la temperatura, se pierde una fracción creciente de la producción debido a los daños climáticos”.

Luego de estudiar la dinámica del módulo geofísico y teniendo en cuenta que la propuesta de este trabajo se compone esencialmente por un modelo base y una reducción del DICE, se asume que una variable para aproximar la magnitud de los daños climáticos, y sus efectos sobre la productividad, es la producción pasada. Es decir, se considera que la producción generada en el periodo $t-1$, provocará daños en una proporción no lineal sobre los recursos ambientales, lo cual afectará directamente la productividad en el periodo siguiente. Específicamente, las pérdidas en productividad se caracterizaron a partir de la siguiente función:

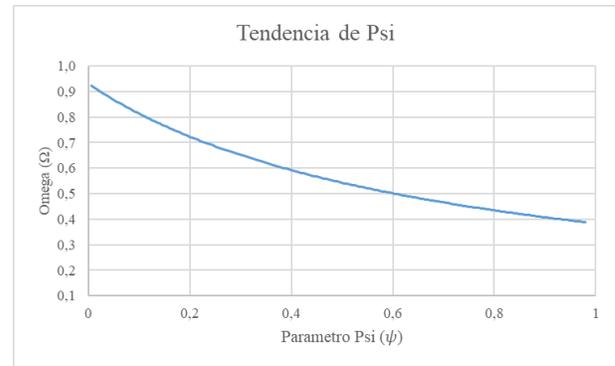
$$\Omega_t = \frac{1-\varphi * A_{t-1} * K_{t-1}^\alpha}{1+\psi * A_{t-1} * K_{t-1}^\alpha} \quad (3.2.1).$$

Como se puede observar en la ecuación 3.2.1, los daños que reducirán la productividad en el periodo t están en función del producto del periodo $t-1$ restringido por dos parámetros φ (φ) y ψ (ψ), los cuales buscan capturar la intensidad con la que la producción presente afecta la productividad futura. Estos parámetros, entonces, permitirán simular diferentes escenarios de afectaciones sobre la productividad derivados de la mayor o menor intensidad con la que los efectos climáticos la afecten. Además, es importante aclarar que Ω_t es una función decreciente y sus valores se encontrarán entre 0 y 1⁴. En las siguientes gráficas se logra ilustrar el comportamiento de la función de daños, a partir de cambios en los parámetros.

⁴ Mientras Ω_t sea más cercano a cero habrá mayor pérdida de productividad, de la misma forma mientras su valor sea cercano a uno habrá menores pérdidas.



Gráfica 3.2.1. Relación entre distintos valores del parámetro Fi y la función de productividad



Gráfica 3.2.2 Relación entre distintos valores del parámetro Psi y la función de productividad

Ahora bien, para realizar el análisis de tendencia del parámetro Fi (ver Gráfica 3.2.1) se mantuvo constante el valor de Psi en 0,004 y para realizar el procedimiento sobre el parámetro Psi, se dejaron constantes los valores de Fi en 0,05. Para ambos escenarios se utilizaron los mismos valores productivos (tomados del modelo base) para el periodo t-1. Se puede concluir que ambos valores producen una relación inversa, pero en diferente proporción con respecto a la función de daños.

Para pasar del modelo base al modelo con daños climáticos se utilizó la misma estructura del modelo base, pero incluyendo ahora la pérdida de productividad producto de Ω_t . Esto implica además que el cierre macro estará vinculado con la nueva función de producción neta y por último se agregará la función de daños. De esta forma, el modelo puede escribirse como:

Max:

$$W = \sum_{t=0}^{\infty} \ln c_t * \beta^t \quad (3.2.2).$$

s.a:

$$k_{t+1} = (1 - \delta) * k_t + i_t \quad (3.2.3).$$

$$y_t = A_t * k_t^\alpha \quad (3.2.4).$$

$$Q_t = \Omega_t * y_t \quad (3.2.5).$$

$$Q_t = c_t + i_t \quad (3.2.6).$$

$$\Omega_t = \frac{1 - \varphi * A_{t-1} * k_{t-1}^\alpha}{1 + \psi * A_{t-1} * k_{t-1}^\alpha} \quad (3.2.7).$$

La solución del problema responde a la misma lógica del caso anterior, pero ahora las condiciones de primer orden estarán afectadas por la función Ω_t . En este caso, los valores de estado estacionario para el consumo y el capital estarán dados por⁵:

$$\frac{-1}{c} + \frac{\beta * \alpha * A * k^{\alpha-1}}{c} * \frac{1 - \varphi * A * k^{\alpha}}{1 + \psi * A * k^{\alpha}} + \frac{\beta(1-\delta)}{c} + \frac{(\beta^2 * \alpha * k^{2\alpha-1}) * (-\varphi - \psi)}{c * (1 + \psi * A * k^{\alpha})^2} = 0 \quad (3.2.8).$$

$$A * k^{\alpha} * \frac{1 - \varphi * A * k^{\alpha}}{1 + \psi * A * k^{\alpha}} - c - \delta k = 0 \quad (3.2.9).$$

Asimismo, se puede observar que las condiciones de primer orden han cambiado en gran medida. Sin embargo, cabe aclarar que si se toman, por ejemplo, valores de cero para los parámetros de la función de daño (φ y ψ), se van a obtener como resultado las mismas condiciones de primer orden con las que se cuenta en el escenario base⁶, lo que respalda que la ecuación empírica de omega es coherente con la teoría, puesto que si el porcentaje de la producción que causa contaminantes es igual a cero, no se verá afectada la productividad ni los puntos óptimos de consumo, capital y bienestar.

En lo que concierne al modelo, ahora se debe realizar la calibración de los parámetros. Para ello, se utilizarán los valores empleados en el modelo base para el factor de descuento, la depreciación y la participación del capital sobre la producción. Y para los parámetros de la función de daños -los cuales definen el porcentaje de la producción que desencadena una contaminación sobre los recursos y afecta de tal forma los siguientes ciclos- se simulan diferentes escenarios tomando en cuenta calibraciones alternativas, ya que no es posible obtener de manera directa valores para ellos. De esta manera, se logran obtener las pérdidas potenciales de bienestar asociadas a cada uno de los escenarios. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 3.2.1

⁵ Diríjase a el Anexo 2 para observar los procedimientos.

⁶ Diríjase al Anexo 3 para observar el procedimiento.

		Modelo con daños climáticos								
		φ	$\varphi=0,005$				$\varphi=0,002$	$\varphi=0,03$	$\varphi=0,07$	$\varphi=0,1$
Variables	Base	$\psi=0,002$	$\psi=0,04$	$\psi=0,1$	$\psi=0,25$	$\psi=0,005$				
Ω	1	-0,963%	-5,884%	-12,73%	-26,158%	-0,959%	-4,796%	-10,276%	-14,387%	
c	1,2470	-0,601%	-4,074%	-10,01%	-15,156%	-0,601%	-3,21%	-7,610%	-11,532%	
K	2,6515	1,852%	11,99%	27,87%	41,365%	1,840%	9,802%	23,262%	35,576%	
Pdcto. Neto	1,3796	-0,362%	-2,324%	-5,354%	-17,22%	-0,361%	-1,812%	-3,865%	-5,341%	
u	0,2207	-2,733%	-18,841%	-47,77%	-74,459%	-2,733%	-14,807%	-35,859%	-55,507%	
i	1,1589	0,090%	0,822%	2,725%	-6,319%	0,091%	0,663%	2,229%	4,215%	

Tabla 3.2.1.

Ahora bien, la anterior tabla, está compuesta por la diferencia (expresada en porcentajes) entre los resultados del modelo base y los obtenidos del modelo con daños climáticos⁷ para las diferentes combinaciones realizadas para los parámetros φ y ψ . Es decir, estos resultados son las pérdidas o las ganancias obtenidas en la modelación para cada una de las variables. Por ejemplo, si se toma la menor calibración realizada (escenario conservador), se puede observar que al asignar los valores: $\varphi=0,005$ y $\psi=0,002$; se genera una pérdida de productividad cercana al 1% (Ω). Esto provoca una disminución en la producción neta del 0,36%, lo que desencadena pérdidas de 0,6% en consumo, el cual es el encargado de impactar la función de bienestar y, por ende, para este escenario, provocar sobre el bienestar pérdidas cercanas al 2,8%.

Por lo contrario, si se observan los resultados obtenidos de un escenario en el cual los valores de φ y ψ sean mayores, como por ejemplo asignando valores de: $\varphi=0,07$ y $\psi=0,005$, se logra apreciar que existe una mayor pérdida de productividad (expresada en Ω). Esto provoca una reducción elevada sobre la producción neta, disminuyendo el bienestar en un 35,85%, lo cual es una pérdida elevada del mismo. Por ende, se observa que los parámetros φ y ψ son los encargados de medir la proporción de influencia del deterioro de los recursos generado en la producción pasada. Lo anterior se traduce en que menores valores asignados a estos parámetros concluirán en menores pérdidas de productividad.

⁷ Los cálculos referentes a la solución del modelo fueron obtenidos en el aplicativo Matlab R2019a, por medio de la licencia ofrecida por la Universidad EAFIT para los estudiantes.

Asimismo, se puede identificar a primera vista que el modelo con daños climáticos tiene efectos negativos en todas las combinaciones sobre la productividad, la producción neta, el bienestar y el consumo. Esto confirma que una pérdida de productividad, producto de los daños generados por la pérdida de recursos gracias a la contaminación, desencadena una disminución de la producción neta, lo cual afecta el consumo y por ende genera pérdidas sobre el bienestar. De lo anterior se concluye que un choque negativo en la productividad, producido por los daños causados por la dinámica productiva de los periodos anteriores, genera influencias negativas sobre la producción neta. Esto afecta de la misma forma el consumo y, por ende, pérdidas sobre el bienestar.

4. Conclusiones

Este trabajo incluye la construcción de un modelo simple tipo Ramsey, el cual permite calcular el costo social producido por el cambio climático, a partir de pérdidas potenciales de productividad, desarrollo y bienestar. En este modelo se logró evidenciar que efectivamente el deterioro de los recursos conduce a disminuciones sobre la productividad, lo cual desencadena una influencia negativa sobre el crecimiento y el bienestar. También, es importante aclarar que uno de los impedimentos del presente trabajo es que no se logró calcular un porcentaje de pérdidas exacto, sino una tendencia a partir de la simulación de diferentes escenarios.

En segundo lugar, se evidenció que es fundamental buscar instrumentos que permitan mitigar y reducir las emisiones de GEI, el deterioro de los recursos y los aumentos de temperatura, con el fin de reducir las pérdidas descritas anteriormente. Además, se encontraron diferentes formas de mitigar o reducir esta degradación, como la implementación de tecnologías limpias por parte de los agentes, la intervención estatal por medio de incentivos -en donde se observó que Colombia cuenta con una fuerte estructura constituida por instituciones y regulaciones ambientales- y el esfuerzo de particulares por reducir las emisiones no industriales, entre otros.

Por otra parte, teniendo en cuenta la revisión literaria, se pudo llegar a la conclusión de que el desarrollo y el crecimiento económicos, en lugar de ser enemigos del ambiente, son una posible solución para la degradación ambiental. Esto debido a que, a medida que los países se desarrollan, adquieren una capacidad mayor para incorporar tecnologías más limpias que ayudan a reducir las

emisiones de GEI que son liberadas a la atmósfera, y de esta forma disminuyen el ritmo en el que se está calentando el planeta.

5. Referencias

- Alfranca, O. (2012). Evolución del Pensamiento Económico sobre los recursos naturales. *Nuevas corrientes de pensamiento económico*, 865, 79-90. Recuperado de <http://bit.ly/2LFL0IA>
- Cairncross, F. (1993). *Las cuentas de la tierra: Economía verde y rentabilidad ambiental*. Madrid, España: Acento Editorial.
- Castaño, R. A. y González, H. (2011). *Economía Ambiental*. Bogotá, Colombia: ECOE Ediciones
- Costa Posada, C. (2007). La adaptación al cambio climático en Colombia. *Revista de Ingeniería*, (26), 74-80. <http://dx.doi.org/10.16924%2Fria.v0i26.298>
- De García, L. F. y Cuesta, C. F. (2007). El Protocolo de Kioto y los costos ambientales. *Revista Digital del Instituto Internacional de Costos*, (1), 9-31. Recuperado de http://www.revistaiic.org/articulos/num1/articulo1_esp.pdf
- Dinda, S. (2004). Environmental Kuznets Curve Hypothesis: A Survey. *Ecological Economics*, 49, 431-455. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2004.02.011>
- Fernández-Reyes, R. (2016). El Acuerdo de París y el cambio transformacional. *Papeles de Relaciones Ecosociales y cambio Global*, (132), 101-114. Recuperado de <http://bit.ly/2JgCG01>
- Friedl, B., & Getzner, M. (2003). Determinants of CO₂ emissions in a small open economy. *Ecological Economics*, 45, 133-148. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(03\)00008-9](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(03)00008-9)
- García, M., Piñeros Botero, A., Bernal Quiroga, F., y Ardila Robles, E. (2012). Variabilidad climática, cambio climático y el recurso hídrico en Colombia. *Revista de Ingeniería*, (36), 60-64. Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/ring/n36/n36a12.pdf>
- González, C. (2015). La Regla de Hotelling para la Gestión Óptima de Recursos Naturales No Renovables (tesis de grado). Universidad de Valladolid, Valladolid, España.

- González, M. & Jurado, E. & González, S. & Aguirre, O. & Jiménez, J. & Navar, J. (2003). Cambio climático mundial: origen y consecuencias. *Ciencia UANL*, 6, 377-385. Recuperado de <http://www.redalyc.org/pdf/402/40260313.pdf>
- Hamman, A. F. y Riasco, J. A. (1998). Ciclos económicos en una economía pequeña y abierta – una aplicación para Colombia. *Borradores de economía del Banco de la República*, (89). Recuperado de <http://www.banrep.gov.co/sites/default/files/publicaciones/pdfs/borra089.pdf>
- Herrán, C. (2012). El cambio climático y sus consecuencias para América Latina. *Proyecto Energía y Clima de la Fundación Friedrich Ebert-FES*. México: Editorial.
- Holtz-Eakin, D., & Sendel, T. (1995). Stoking the fires? CO₂ emissions and economic growth. *Journal of Public Economics*, 57, 85-101. [https://doi.org/10.1016/0047-2727\(94\)01449-X](https://doi.org/10.1016/0047-2727(94)01449-X)
- Jaramillo, F., Gómez, M. A. & Calderón, S., Romero, G., Ordoñez, D. A., Álvarez, A. & Sánchez-Aragón, L. & Ludeña, C. E.. (2015). Impactos Económicos del Cambio Climático en Colombia: Costos Económicos de los Eventos Extremos. *Banco Interamericano de Desarrollo*, Monografía No. 260, Washington D.C.
- Jacobs, M. (1995). *Economía verde medio ambiente y desarrollo sostenible*. Bogotá, Colombia: TM Editores y Ediciones Unidad.
- Labandeira, X., León, C. L. y Vázquez, M. X. (2007). *Economía Ambiental*. Madrid, España: PEARSON EDUCACIÓN, S.A.
- Ley N° 2811. Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección del Medio Ambiente, Colombia, Bogotá, 18 de diciembre de 1974.
- Meyer, V., Saatchi S., Ferraz, A., Xu, L., Duque, A. & García, M. (2019). Forest degradation and biomass loss along the Chocó region of Colombia. <https://doi.org/10.1186/s13021-019-0117-9>
- Nordhaus, W. & Sztorc, P. (2013). DICE 2013R: Introduction and user's manual.
- Nordhaus, W. (2014). Estimates of the Social Cost of Carbon: Concepts and Results from the DICE-2013R Model and Alternative Approaches. *The Association of Environmental and Resource Economists*, 1, 273-312. <http://dx.doi.org/10.1086/676035>
- Olivo, María de Lourdes, & Soto-Olivo, Alejandra. (2010). Comportamiento de los gases de efecto invernadero y las temperaturas atmosféricas con sus escenarios de incremento

- potencial. *Universidad, Ciencia y Tecnología*, 14(57), 221-230. Recuperado en 13 de mayo de 2019, de http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-48212010000400002&lng=es&tlng=es
- Rangel-Ch, J. O. (2005). La biodiversidad de Colombia. *Facultad de Ciencias Humanas – Universidad Nacional de Colombia*. 292-304. Recuperado de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/palimpsestvs/article/view/8083/8727>
- Ruiz Velasco, M. (2017). Análisis fundamental del modelo DICE y su aplicación a la economía del cambio climático (tesis de maestría). Universidad de Cantabria, Santander, España.
- Sánchez Albavera, F. (2004). El desarrollo productivo basado en la explotación de los recursos naturales. *CEPAL – SERIE Recursos naturales e infraestructura*, 86, 1-79. Recuperado de https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/6327/1/S0700966_es.pdf
- Streimikiene, D., & Mardani, A. (2019). Carbon dioxide (CO₂) emissions and economic growth: a systematic review of two decades of research from 1995 to 2017. *Science of the Total Environment*, 649, 31-49. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.229>

ANEXOS

Anexo 1.

$$LaGrange = \sum_{t=0}^{\infty} \ln c_t * \beta^t + \beta^t * \lambda_t * \{A_t * k_t^\alpha - c_t - k_{t-1} + (1 - \delta) * k_t\}$$

Foc

$$\frac{\partial L}{\partial c_t} \rightarrow \frac{1}{c_t} - \lambda_t = 0 \quad (1.1)$$

$$\frac{\partial L}{\partial K_{t-1}} \rightarrow -\lambda_t + \beta^1 * \lambda_{t+1} * (\alpha * A * K_t^{\alpha-1}) + \beta^1 * \lambda_{t+1} * (1 - \delta) = 0 \quad (1.2)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_t} \rightarrow A_t * k_t^\alpha - c_t - k_{t-1} + (1 - \delta) * k_t = 0 \quad (1.3)$$

Ahora reemplazamos 1.1 en 1.2, para obtener un sistema 2x2, el cual está compuesto por las expresiones 1.4 y 1.5:

$$-\frac{1}{c_t} + \beta^1 * \frac{1}{c_{t+1}} * (\alpha * A_t * k_t^{\alpha-1}) + \beta^1 * \frac{1}{c_{t+1}} * (1 - \delta) = 0 \quad (1.4)$$

$$A_t * k_t^\alpha - c_t - k_{t-1} + (1 - \delta) * k_t = 0 \quad (1.5)$$

Estas ecuaciones, ahora son llevadas a estado estacionario:

$$-\frac{1}{c_{SS}} + \beta^1 * \frac{1}{c_{SS}} * (\alpha * A_{SS} * k_{SS}^{\alpha-1}) + \beta^1 * \frac{1}{c_{SS}} * (1 - \delta) = 0 \quad (1.6)$$

$$A_{SS} * k_{SS}^\alpha - c_{SS} - k_{SS} + (1 - \delta) * k_{SS} = 0 \quad (1.7)$$

De 1.6 y 1.7 sacamos las condiciones de primer orden expuestas en el Modelo Base:

$$k_{SS} = \left(\frac{1 - \beta(1 - \delta)}{\beta * \alpha * A_{SS}} \right)^{\frac{1}{\alpha-1}} \quad (1.8).$$

$$c_{SS} = A_{SS} * k_{SS} - \delta * k_{SS} \quad (1.9).$$

A partir de las expresiones 1.8 y 1.9 se realizaron los procesos de modelación para hallar los valores óptimos de c^* y K^* mediante el aplicativo Matlab.

Anexo 2.

$$LaGrange = \sum_{t=0}^{\infty} \ln c_t * \beta^t + \beta^t * \lambda_t * \left\{ \frac{1-\varphi * A_{t-1} * k_{t-1}^{\alpha}}{1+\psi * A_{t-1} * k_{t-1}^{\alpha}} \right\} * A_t * K_t^{\alpha} - c_t - k_{t-1} + (1-\delta) * k_t \}$$

Foc

$$\frac{\partial L}{\partial c_t} \rightarrow \frac{1}{c_t} - \lambda_t = 0 \quad (2.1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial k_{t-1}} &\rightarrow -\lambda_t + \beta^1 * \lambda_{t+1} * \left[\frac{1-\varphi * A_t * k_t^{\alpha}}{1+\psi * A_t * k_t^{\alpha}} \right] * (\alpha * A_{t+1} * k_{t+1}^{\alpha-1}) + \beta^1 * \lambda_{t+1} * (1-\delta) \\ &+ \beta^2 * \lambda_{t+2} * \left\{ \frac{[(1+\psi * A_{t+1} * k_{t+1}^{\alpha}) * (-\alpha * \varphi * A_{t+1} * k_{t+1}^{\alpha})] - [(1-\varphi * A_{t+1} * k_{t+1}^{\alpha}) * (\alpha * \psi * A_{t+1} * k_{t+1}^{\alpha})]}{(1+\psi * A_{t+1} * k_{t+1}^{\alpha})^2} \right\} * A_{t+2} * k_{t+2}^{\alpha} = 0 \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_t} \rightarrow A_t * k_t^{\alpha} * \left[\frac{1-\varphi * A_{t-1} * K_{t-1}^{\alpha}}{1+\psi * A_{t-1} * K_{t-1}^{\alpha}} \right] - c_t - k_{t-1} + (1-\delta) * k_t = 0 \quad (2.3)$$

Ahora reemplazamos 2.1 en 2.2, y realizamos sobre la misma algebra para llegar a una ecuación más sencilla y manejable 2.4:

$$\begin{aligned} -\frac{1}{c_t} + \beta^1 * -\frac{1}{c_{t+1}} * \left[\frac{1-\varphi * A_t * K_t^{\alpha}}{1+\psi * A_t * K_t^{\alpha}} \right] * (\alpha * A_{t+1} * K_{t+1}^{\alpha-1}) + \beta^1 * \frac{1}{c_{t+1}} * (1-\delta) + \beta^2 * \frac{1}{c_{t+2}} * \\ \left\{ \frac{(\alpha * A_{t+1} * K_{t+1}^{\alpha}) * [(1+\psi * A_{t+1} * K_{t+1}^{\alpha}) * (-\varphi)] - (1-\varphi * A_{t+1} * K_{t+1}^{\alpha}) * (\psi)}{(1+\psi * A_{t+1} * K_{t+1}^{\alpha})^2} \right\} * A_{t+2} * K_{t+2}^{\alpha} = 0 \end{aligned} \quad (2.2.1)$$

$$\begin{aligned} -\frac{1}{c_t} + \beta^1 * \frac{1}{c_{t+1}} * \left[\frac{1-\varphi * A_{t-1} * K_{t-1}^{\alpha}}{1+\psi * A_{t-1} * K_{t-1}^{\alpha}} \right] * (\alpha * A * K_t^{\alpha-1}) + \beta^1 * \frac{1}{c_{t+1}} * (1-\delta) + \beta^2 * \frac{1}{c_{t+2}} * \\ \left\{ \frac{(\alpha * A_{t+1} * K_{t+1}^{\alpha}) * [-\varphi - \psi * \varphi * A_{t+1} * K_{t+1}^{\alpha} - \psi + \psi * \varphi * A_{t+1} * K_{t+1}^{\alpha}]}{(1+\psi * A_{t+1} * K_{t+1}^{\alpha})^2} \right\} * A_{t+2} * K_{t+2}^{\alpha} = 0 \end{aligned} \quad (2.2.2)$$

$$\begin{aligned} -\frac{1}{c_t} + \beta^1 * \frac{1}{c_{t+1}} * \left[\frac{1-\varphi * A_{t-1} * K_{t-1}^{\alpha}}{1+\psi * A_{t-1} * K_{t-1}^{\alpha}} \right] * (\alpha * A * K_t^{\alpha-1}) + \beta^1 * \frac{1}{c_{t+1}} * (1-\delta) + \beta^2 * \frac{1}{c_{t+2}} * \\ \left\{ \frac{(\alpha * A_{t+1} * K_{t+1}^{\alpha}) * [-\varphi - \psi]}{(1+\psi * A_{t+1} * K_{t+1}^{\alpha})^2} \right\} * A_{t+2} * K_{t+2}^{\alpha} = 0 \end{aligned} \quad (2.2.3)$$

Ahora llevamos nuestras ecuaciones 2.2.3 y 2.3 a estado estacionario, de donde obtenemos:

$$\begin{aligned} -\frac{1}{c_{SS}} + \beta^1 * \frac{1}{c_{SS}} * \left[\frac{1-\varphi * A_{SS} * K_{SS}^{\alpha}}{1+\psi * A_{SS} * K_{SS}^{\alpha}} \right] * (\alpha * A_{tSS} * K_{SS}^{\alpha-1}) + \beta^1 * \frac{1}{c_{SS}} * (1-\delta) + \beta^2 * \frac{1}{c_{SS}} * \left\{ \frac{(\alpha * A_{SS} * K_{SS}^{\alpha}) * [-\varphi - \psi]}{(1+\psi * A_{SS} * K_{SS}^{\alpha})^2} \right\} * \\ A_{SS} * K_{SS}^{\alpha} = 0 \end{aligned} \quad (2.4)$$

$$A_{SS} * K_{SS}^{\alpha} * \left[\frac{1-\varphi * A_{SS} * K_{SS}^{\alpha}}{1+\psi * A_{SS} * K_{SS}^{\alpha}} \right] - c_{SS} - K_{SS} + (1-\delta) * K_{SS} = 0 \quad (2.5)$$

Ahora tenemos dos ecuaciones con dos variables y nuestro modelo en estado estacionario, de tal forma que as podemos escribir de la siguiente manera:

$$\frac{-1}{c} + \frac{\beta * \alpha * A * K^{\alpha-1}}{c} * \frac{1-\varphi * A * K^{\alpha}}{1+\psi * A * K^{\alpha}} + \frac{\beta(1-\delta)}{c} + \frac{(\beta^2 * \alpha * K^{2\alpha-1}) * (-\varphi-\psi)}{c * (1+\psi * A * K^{\alpha})^2} = 0 \quad (2.6)$$

$$A * K^{\alpha} * \frac{1-\varphi * A * K^{\alpha}}{1+\psi * A * K^{\alpha}} - c - \delta K = 0 \quad (2.7)$$

A partir de las expresiones 2.6 y 2.7 se realizaron los procesos de modelación para hallar los valores óptimos de c^* y K^* mediante el aplicativo Matlab.

Anexo 3.

En las ecuaciones 3.1 y 3.2 tenemos las condiciones de primer orden para el Modelo con daño climático.

$$\frac{-1}{c} + \frac{\beta * \alpha * A * K^{\alpha-1}}{c} * \frac{1-\varphi * A * K^{\alpha}}{1+\psi * A * K^{\alpha}} + \frac{\beta(1-\delta)}{c} + \frac{(\beta^2 * \alpha * K^{2\alpha-1}) * (-\varphi-\psi)}{c * (1+\psi * A * K^{\alpha})^2} = 0 \quad (3.1)$$

$$A * K^{\alpha} * \frac{1-\varphi * A * K^{\alpha}}{1+\psi * A * K^{\alpha}} - c - \delta K = 0 \quad (3.2)$$

Ahora asignaremos valores de cero (0) para los parámetros φ (φ) y ψ (ψ). Por lo que tenemos:

$$\frac{-1}{c} + \frac{\beta * \alpha * A * K^{\alpha-1}}{c} * \frac{1-0 * A * K^{\alpha}}{1+0 * A * K^{\alpha}} + \frac{\beta(1-\delta)}{c} + \frac{(\beta^2 * \alpha * K^{2\alpha-1}) * (-0-0)}{c * (1+0 * A * K^{\alpha})^2} = 0 \quad (3.1.1)$$

$$A * K^{\alpha} * \frac{1-0 * A * K^{\alpha}}{1+0 * A * K^{\alpha}} - c - \delta K = 0 \quad (3.2.1)$$

$$\frac{-1}{c} + \frac{\beta * \alpha * A * K^{\alpha-1}}{c} * \frac{1}{1} + \frac{\beta(1-\delta)}{c} + \frac{0}{c * (1+0 * A * K^{\alpha})^2} = 0 \quad (3.1.2)$$

$$A * K^{\alpha} * \frac{1}{1} - c - \delta K = 0 \quad (3.2.2)$$

$$\frac{-1}{c} + \frac{\beta * \alpha * A * K^{\alpha-1}}{c} + \frac{\beta(1-\delta)}{c} = 0 \quad (3.1.2)$$

$$A * K^{\alpha} - c - \delta K = 0 \quad (3.2.2)$$

Este es el resultado (ecuaciones 3.1.3 y 3.2.3) de las condiciones de primer orden del modelo con daños climáticos dándole valores de cero a los parámetros de Omega. Estas condiciones son iguales a las del modelo base, las cuales mostramos a continuación por medio de las ecuaciones 3.3 y 3.4:

$$k_{SS} = \left(\frac{1-\beta(1-\delta)}{\beta * \alpha * A_{SS}} \right)^{\frac{1}{\alpha-1}} \quad (3.3).$$

$$c_{SS} = A_{SS} * k_{SS} - \delta * k_{SS} \quad (3.4).$$