



# Modelo del stock del carbono en bosques mediante Dinámica de Sistemas, para su implementación en el modelo WILIAM

Presenta: LEORELY REYES-ANDRADE

15/07/2021

Los recursos energéticos provenientes de la biomasa tienen un papel importante en la reducción de los impactos del efecto climático, al sustituir el uso de los combustibles fósiles, pero si sus ritmos de extracción superan los ciclos biológicos, su uso deja de ser neutro en carbono y se convierte en un importante destructor de los ecosistemas. Bajo el proyecto de investigación LÓCOMOTION se desarrolla un modelo de dinámica de sistemas que sirva de herramienta para el análisis del ciclo de carbono en los bosques y nos permita conocer cuál es el potencial sostenible de los mismos y su capacidad de captación de carbono y establecer los límites apropiados para la extracción de madera de los bosques de forma que no se supere el potencial sostenible del bosque. Utilizando el software de Vensim se modela las interacciones que intervienen en el ciclo de carbono en los ecosistemas forestales. Se han modelado resultados que muestran que el stock de la región Tropical está disminuyendo considerablemente en comparación con el resto de zonas climáticas estudiadas, teniendo un potencial negativo. En conclusión se ha creado una herramienta de gran utilidad para analizar las políticas de gestión de uso del bosque para su integración en el modelo de evaluación integrada del proyecto LÓCOMOTION.

## **PALABRAS CLAVES**

Bosques, LÓCOMOTION, Dinámica de Sistemas, Stock de Carbono, Potencial sostenible de biomasa, Extracción sostenible de biomasa.

## **PACS**

## **I | INTRODUCCIÓN**

Los ecosistemas terrestres y el suelo son depósitos considerables de carbono. Por ello los bosques son una pieza clave a la hora de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Por otra parte, los recursos extraídos de la biomasa viva son esenciales para el funcionamiento de numerosas actividades industriales y un recurso energético capaz de sustituir el consumo de los combustibles fósiles, por lo que se los suele ver como alternativa para evitar las consecuencias del cambio climático.

Desde 1990 el mundo ha perdido 178 millones de hectáreas de bosque siendo África quien más pérdidas netas de bosque reporto, seguido de América del Sur. El ritmo de pérdida neta de bosque (variación anual neta de la superficie forestal) disminuyó de 7.8 millones de hectáreas por año en el decenio de 1990-2000 a 4.7 millones de hectáreas por año en el periodo de 2010-2020 debido a la reducción de la deforestación que algunos países han tenido (FAO 2020), afectando considerablemente al balance general del ciclo del carbono. Además, los ritmos de pérdida de carbono por hectárea de bosque superan actualmente las capacidades de absorción de los ciclos biológicos, lo que está transformando los bosques de sumideros a fuentes netas de emisiones de carbono. Es por ello que es necesario cuantificar, no solo las hectáreas de bosque que existen, sino que también el balance de carbono en ellas, de forma que se pueda conocer el potencial de uso sostenible de los bosques que permita cumplir con la demanda de los productos forestales y a la vez conseguir que sigan

siendo sumideros de carbono.

### 1 | Evidencia del Cambio Climático

La acumulación de los gases de efecto invernadero (GEI), en la atmósfera está incrementando el efecto invernadero y contribuyendo al aumento de la temperatura (IPCC 2018). El principal gas de efecto invernadero es el CO<sub>2</sub> ya que la concentración atmosférica de este gas contribuye en más de dos tercios al calentamiento global. La concentración del CO<sub>2</sub> en la atmósfera alcanzo su máximo medio anual de 409.8 ppm en 2019 y sigue en aumento, (ver figura 1). Estos valores están por muy encima de los observados en los periodos históricos en los que el ser humano ha vivido hasta el momento.

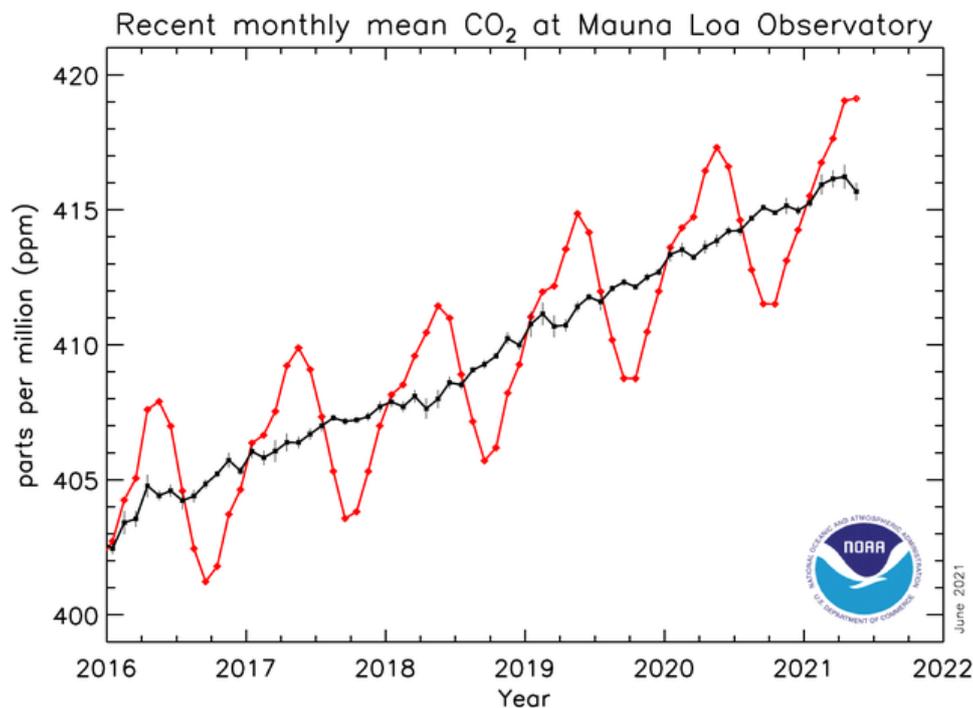


Figura 1: Evolución media mensual del dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) medido en el Observatorio Mauna loa, Hawaii. (Fuente: NOAA ESRL, sin fecha)

El 2020 se caracterizó por condiciones más cálidas que el promedio en gran parte del mundo. El informe sobre el clima mundial de la NOAA<sup>1</sup> (**NOAA2020**) reporto que, en promedio, la temperatura global de la superficie terrestre y oceánica de agosto de 2020 fue 0.94 °C por encima del promedio y la segunda temperatura más alta desde que comenzaron los registros mundiales en 1880. Solo agosto de 2016 fue más cálido con una diferencia de temperatura del promedio de + 0.98 °C. Los agostos más cálidos han ocurrido desde 1998; sin embargo, los cinco agostos más cálidos se han producido desde 2015 (**NOAA2020**).

Este aumento de temperatura coincide con el aumento de la concentración de CO<sub>2</sub>. el quinto informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el cambio climático (Masson-Delmotte et al. 2019) reporto (con un alto nivel de confianza) que son las actividades humanas lo que ha causado este calentamiento global de aproximadamente 1.0 °C con respecto a niveles preindustriales, siendo probable que el calentamiento llegue a

1. National Centers For Environmental Information

1.5 °C entre 2030 y 2052 si se continua con el ritmo actual.

Hacer frente a estos desafíos del cambio climático es una tarea compleja tanto para los científicos como las personas responsables de desarrollar políticas. Es por ello que se han desarrollado herramientas que permiten analizar todas las variables y las complejas interacciones que intervienen en estos procesos climáticos: los modelos climáticos integrándolos en modelos económicos, llamados IAM<sup>2</sup> (Parson y Fisher-Vanden 1995). Estos modelos IAM permiten evaluaciones en las cuales comparan los costes de las respuestas o acciones llevadas a cabo con los impactos que estas impiden (Ferreras 2017) En este contexto con el fin de analizar el papel de los bosques de cara al cambio climático y encontrar el potencial sostenible de los mismos, el presente TFM estudia el comportamiento que tiene el “stock” del carbono en las tierras forestales. Este trabajo será una aportación al módulo climático del modelo IAM denominado WILIAM del proyecto LOCOMOTION (*LOCOMOTION / H2020*, ).

LOCOMOTION<sup>3</sup> N°821105 — H2020-LC-CLA-2018-2, es un proyecto que tiene como objetivo la mejora del modelo de evaluación integrada MEDEAS (Capellán-Pérez et al. 2020), desarrollado por el grupo de investigación en Energía, Economía y Dinámica de Sistemas de la UVa (GEEDS-UVa) bajo el paraguas del proyecto europeo del mismo nombre. El objetivo del proyecto LOCOMOTION es desarrollar una herramienta capaz de asesorar a los hacedores de políticas acerca de los costes, impactos y opciones de políticas energéticas a nivel tanto europeo como globalmente: el modelo de evaluación integrada (IAMs) WILIAM (*LOCOMOTION / H2020*, ). Este modelo aumentara la robustez, transparencia, accesibilidad, usabilidad y confiabilidad del conjunto MEDEAS, mediante la ampliación de la cobertura geográfica, el detalle y la precisión de los módulos en los el conjunto de MEDEAS está estructurado.

Una de las mejoras que este proyecto plantea tiene que ver con la gestión de usos del suelo, que es uno de los aspectos poco desarrollados en el modelo MEDEAS. MEDEAS fue diseñado para evaluar los impactos y las limitaciones de la transición energética y su módulo de usos del suelo está orientado especialmente en el impacto que tienen los biocombustibles y la electricidad solar en la ocupación de territorio. Por ello, en este modelo los límites a la expansión del uso de la biomasa forestal están basados en revisiones bibliográficas, pero no se cuenta con un modelado del crecimiento de la biomasa forestal que pueda dar cuenta de estos límites de forma dinámica ni estudia los efectos que este crecimiento tiene sobre la captura de carbono en la biomasa forestal.

Por tanto, el grupo de trabajo # 6 de LOCOMOTION, está dedicado al modelado de los usos de la tierra, y está desarrollando un módulo ambiental que combine el modelado de los ciclos bio-geo-químicos del carbono y el agua con la asignación del territorio a usos como el forestal, la agricultura y ganadería, las energías renovables y la urbanización. Esto permite estudiar la competencia entre el sector energético y los otros usos de la tierra teniendo en cuenta las limitaciones biofísicas, asimismo facilita la evaluación de las emisiones de gases de efecto invernadero ligados al uso del suelo. Las diferentes tareas de este paquete de trabajo se están desarrollando, el *Centro de Ahorro y Fuentes de Energía Renovable (CRES)*, la *Asociación para la Investigación y Desarrollo de las Ciencias (FC.ID)* y el *Consorcio Público constituido por la Generalitat de Catalunya, la Universitat Autònoma de Barcelona, la Universitat de Barcelona y el Instituto de Estudios Catalanes (CREAF)*.

El principal propósito de este proyecto es el desarrollo de un modelo de Dinámicas de Sistemas que nos permita estudiar el comportamiento del carbono en los bosques de forma

2. Integrated Assesment Models

3. Low-carbon society: an enhanced modelling tool for the transition to sustainability

global. Este análisis se hace dentro del proyecto LOCOMOTION de forma que pueda ser integrado en el futuro en el modelo WILIAM. Para ello es necesario conocer el ciclo de carbono implementado ya en el módulo climático de WILIAM que está basado en el modelo climático C-ROADS y adaptarlo específicamente a los bosques, está hecho con el programa Vensim, que permite su fácil modificación ya que este software es también utilizado en WILIAM.

## II | CAMBIO CLIMÁTICO

El carbono es uno de los elementos más abundantes en la tierra, fuente de la mayoría de la energía consumida por la humanidad. Los principales depósitos de este elemento en la tierra son la atmósfera, la biosfera especialmente la vegetación, el humus (materia orgánica muerta del suelo) y el océano que contienen la mayor reserva de este elemento, la mayor parte encontrándose en las capas profundas y no en la circulación activa (Janzen 2004).

### 1 | Ciclo del Carbono

Las reservas de carbono en la biosfera son comparables con las reservas atmosféricas y aproximadamente un tercio del carbono orgánico se encuentra en los bosques (Janzen 2004).

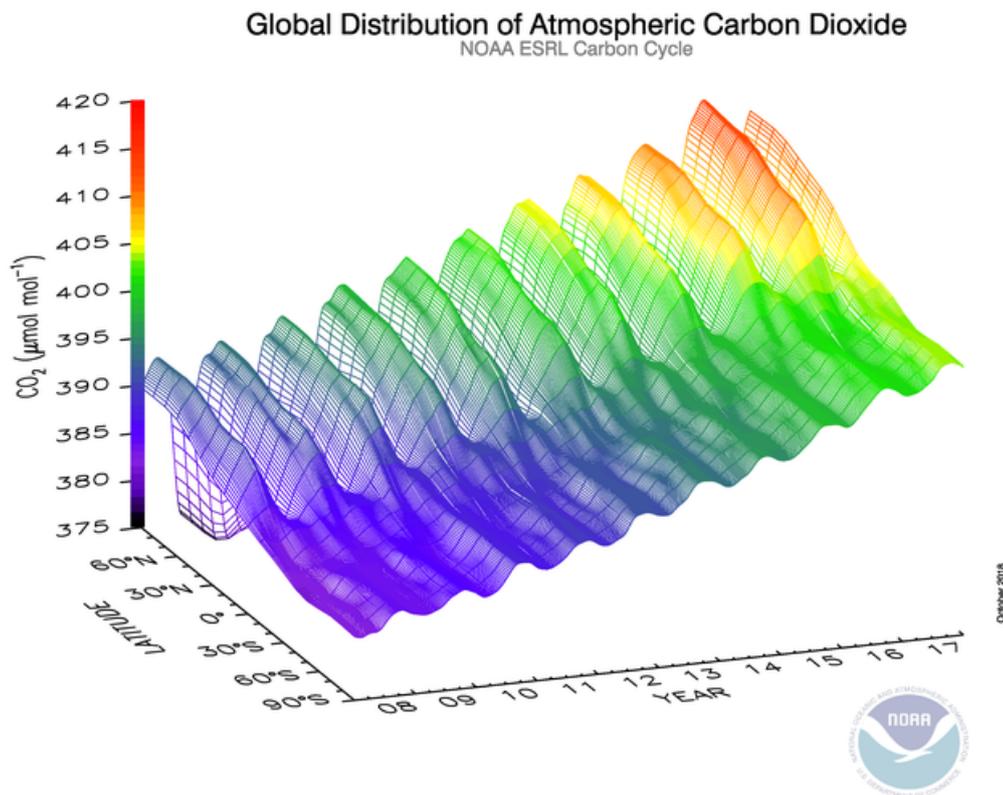


Figura 2: Representación tridimensional de la distribución latitudinal y temporal del dióxido de carbono atmosférico. Se utilizaron datos de la red cooperativa de muestreo de aire del ciclo del carbono. (Fuente: (NOAA ESRL 2019))

El suelo es un reservorio de carbono, contiene a una profundidad de un metro diversas

formas orgánicas, desde hojarasca vegetal que recientemente se ha convertido en ello hasta carbón vegetal y compuestos humificados muy antiguos. Todos estos depósitos de carbono están conectados, su intercambio entre “stocks” o reservorios se produce de forma cíclica (Ferreras 2017) siendo esto una combinación de procesos biológicos, químicos y físicos, las interacciones que sufren estos reservorios es lo que se llama ciclo del carbono.

Este ciclo se puede dividir en tres partes, que son: la producción de carbono por medio de la biosfera, la síntesis de carbono gobernada por los organismos fotosintéticos y por último el proceso de fijado del carbono, en el cual se almacena el carbono de la atmósfera en depósitos naturales o artificiales. El carbono atmosférico ingresa a la biomasa terrestre a través de la fotosíntesis, liberándose aproximadamente la mitad de forma rápida por medio de la respiración de la vegetación, también se libera carbono de la biosfera almacenándose en el suelo. El intercambio entre la atmósfera y el océano ocurre por procesos biogeoquímicos que involucran los equilibrios de  $\text{CO}_2$ – $\text{CO}_3$ .

Los modelos climáticos que incluyen el ciclo del carbono muestran la retroalimentación positiva que hay entre el ciclo del carbono y el cambio climático, al aumentar la fracción en la atmósfera del  $\text{CO}_2$ , se amplifica el aumento de la temperatura, estas retroalimentaciones especialmente antes de la época industrial se habían mantenido bastante estables. En una comparación realizada a 11 modelos con diversos grados de complejidad, exhibieron que las retroalimentaciones entre el ciclo del carbono y el  $\text{CO}_2$ , aumentan a finales del siglo XXI entre un 4% y 44% (Bonan 2008).

Desde el comienzo de la era industrial el ser humano ha estado usando como fuente de energía mediante los combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas) procesos que liberan grandes cantidades de  $\text{CO}_2$  a la atmósfera y la segunda fuente importante de emisiones son causados por los usos del suelo y los cambios que este sufre principalmente la deforestación, provocando una reducción global en los reservorios de carbono en la tierra (Sabine et al. 2013) aumentando el cambio climático. Por ello el ciclo del carbono juega un papel importante no solo en el funcionamiento de la biosfera, también tiene un papel vital en la regulación del clima.

## 2 | IAM (Modelos de Evaluación Integrada)

Los modelos de evaluación integrada, tienen un fundamento matemático que permite representar las diferentes interacciones en un comportamiento complejo, estas interacciones se representan en escalas espaciales y temporales, mostrando un esquema sencillo para abordar un problema, siendo los IAMs de gran utilidad en la temática del cambio climático.

De forma general estos modelos están conformados por un modelo climático simple en donde se tienen las representaciones biofísicas, bioquímicas del ciclo del carbono y la química atmosférica, determinando las concentraciones de los gases atmosféricos y otros gases traza, estimando el forzamiento radiativo, los cambios en el clima y los impactos en sistemas biofísicos y en la economía en general, incluyendo factores socioeconómicos, demográficos, tecnológicos energéticos, de producción y de consumo, que intervienen en la generación de emisiones de gases de efecto invernadero. Los IAMs reproducen de manera simple los distintos escenarios que le sean posible al simulador. Los IAMs son una herramienta para la toma de decisiones y creación de políticas, ya que analizan las interacciones entre el cambio climático y la economía a niveles globales como regionales.

Estos modelos se clasifican de dos formas, en respuestas al propósito por el cual se han creado. El primero es la optimización de políticas y el segundo son los modelos

dedicados a la evaluación de política (Ferrerias 2017). Los modelos de optimización se dividen principalmente en: “coste-beneficio”, su propósito es equilibrar los costos y beneficios de políticas climáticas; “en objetivos”, su principal propósito es optimizar las respuestas en base a un objetivo propuesto con respecto a las emisiones o efectos de cambio climático; y por último están los modelos basados en la “incertidumbre”, estos modelos se ocupan de la toma de decisiones en base a las condiciones de las incertidumbres encontradas. Mientras tanto los modelos de evaluación de políticas pueden ser modelos de “proyecciones deterministas” que en los que para cada entrada y salida solo toma un valor y los modelos de “proyección estocásticos” en los cuales algunas entradas y salidas del modelo pueden tener un rango de valores.

## 2.1 | MEDEAS

MEDEAS, acrónimo de *Modelización del Desarrollo Energético bajo Limites Ambientales y Socioeconómicos* es un conjunto de modelos dinámicos-recursivos de simulación de políticas, estos modelos tienen el mismo enfoque de modelado conceptual de diseño, aplicando la metodología de la dinámica de sistemas (Capellán-Pérez et al. 2020) creado por el grupo de Energía, Económica y Dinámica de Sistemas de la Universidad de Valladolid (GEEDS-Uva) y un consorcio de once socios en el marco del Programa de Investigación e Innovación de la Unión Europea Horizonte 2020 (GA 691287). Con un periodo de ejecución de desde 1995 hasta 2060, aunque el horizonte de la simulación permite extenderse hasta el 2100 cuando se enfoca en análisis de sostenibilidad estratégica a largo plazo. Es un modelo modular, permite explorar diferentes niveles con una alta resolución sectorial, temporal y espacial, el modelo es un puente entre la economía ecológica (que comprende las limitaciones entre la economía y la ecología, la cual no abandona el factor producción “Tierra”) y la economía Post-Keynesiana (entiende que la producción solo es función de la demanda).

Una parte interesante de este modelo es que aplica un conjunto de suposiciones que intentan corregir debilidades presentes en la mayor parte de los IAMs, que es la poca integración entre los submódulos, el predominio de enfoques artificiales de optimización y equilibrio para resolver la asignación de recursos, la asunción de abundancia de recursos energéticos (tanto fósiles como renovables), la omisión de las inversiones materiales y energéticas relacionadas con la transición hacia las renovables y la falta de coherencia con los impactos que desde las ciencias naturales se esperan por el cambio climático. Ya que los objetivos de esta herramienta principalmente son la identificación de los parámetros físicos clave y destacar cuales son los desafíos existentes para la transición da una economía baja en carbono, y con ello poder diseñar estrategias para abordar la solución de esos desafíos.

En MEDEAS, el módulo de suelo se orientó hacia el seguimiento de las demandas de suelo (para la producción de energía) y su principal objetivo fue comparar la demanda de suelo para energías renovables (tanto eléctrica como de biomasa) con otros usos. MEDEAS no distribuye dinámicamente la demanda de suelo para diferentes usos, ya que da prioridad a la energía sobre los usos alimentarios o industriales. De esta forma, MEDEAS calcula la demanda de suelo para biocombustibles de primera y segunda generación, energía eléctrica renovable y usos urbanos (según políticas de patrones de urbanización) y la demanda de biomasa extraída del bosque (incluidos usos tradicionales).



entre estos dos elementos y la biosfera, ha llevado a la incorporación de los tipos de suelo y vegetación.

El sistema de clasificación Köppen (Peel, Finlayson y McMahon 2007), se trata de un sistema empírico o que sólo tiene en cuenta los valores de precipitación y temperatura y su distribución a lo largo del año, desarrollado a principios del siglo veinte por el climatólogo y botánico alemán Wladimir Köppen. Esta clasificación comprende los principales climas, los identifico en un grupo de letras, que sirven solo como ordenación geográfica, empezando por el ecuador y terminando por los polos. En principio los agrupo con las primeras cinco letras del alfabeto:

- A: para climas tropicales lluviosos. En donde todos los meses la temperatura media es superior a los 18 °c.
- B: para climas secos. En donde la evaporación es superior a la precipitación.
- Climas templados lluviosos. En donde el mes más frío tiene una media comprendía entre 18 °c y -3 °c y la media del mes más cálido apenas está por encima de los 10 °c.
- D: Climas de invierno frío. La temperatura media del mes más frío es inferior a -3 °c y la del mes más cálido está por encima de los 10 °c. E: Climas polares. Los cuales no tienen estación cálida y el promedio mensual de temperaturas es siempre inferior a los 10 °c. H: Climas de alta montaña.

Esta clasificación climática ha sido mejorada continuamente, siendo hasta hoy uno de los métodos de clasificación más conocidos y usados por una variedad de investigadores como base para la regionalización climática para la evaluación de los modelos climáticos globales.

#### 2.4 | Regionalización climática en WILIAM

El cálculo de las emisiones/absorciones del bosque y las emisiones asociadas al uso del suelo, ocupa conocer los tipos de usos de suelo que tiene cada región geográfica, actualmente en el proyecto LOCOMOTION tiene 9 regiones geo-políticas: EU27, UK, CHINA, INDIA, RUSIA, USMCA (Norte América), LATAM (América latina), EASOC (Este de Asia y Oceanía) y LROW (resto del mundo) pero además de conocer los usos por de suelo por región geográfica, se necesita conocer las características que tiene cada tipo de suelo en cada región, por ejemplo, los tipos de bosques que se encuentran en la India. Estas características se obtienen al mezclar los usos del suelo con regiones bioclimáticas. En WILIAM conocer los valores de superficie para cada uso del suelo a nivel país para el año base del modelo (2005) es relevante para calcular las emisiones, pero la asociación de valores de emisiones es más compleja, ya que estos no solo dependen del uso, sino también de la región biogeográfica que no siempre está directamente relacionada con las regiones geo-políticas definidas en el modelo.

Por ello se ha hecho la clasificación de las regiones climáticas a través de las zonas Köppen, ya que el modelo deriva impactos climáticos considerando variables como la temperatura y la precipitación. Los socios del paquete de trabajo disponen del modelo de GTAP de “densidad de stock del carbono” para el uso de suelo de grassland (pastizales) y tierras forestales para cada intersección entre las regiones geopolíticas del modelo y las zonas climáticas Köppen. Este procesado realizado por los socios CREAM obtuvo las áreas de cada país considerando cada uso, relacionando las regiones LOCOMOTION y cada zona Köppen para para los usos de la tierra y es de esta forma que estudiaremos la evolución del ciclo del carbono en los bosques en este trabajo.

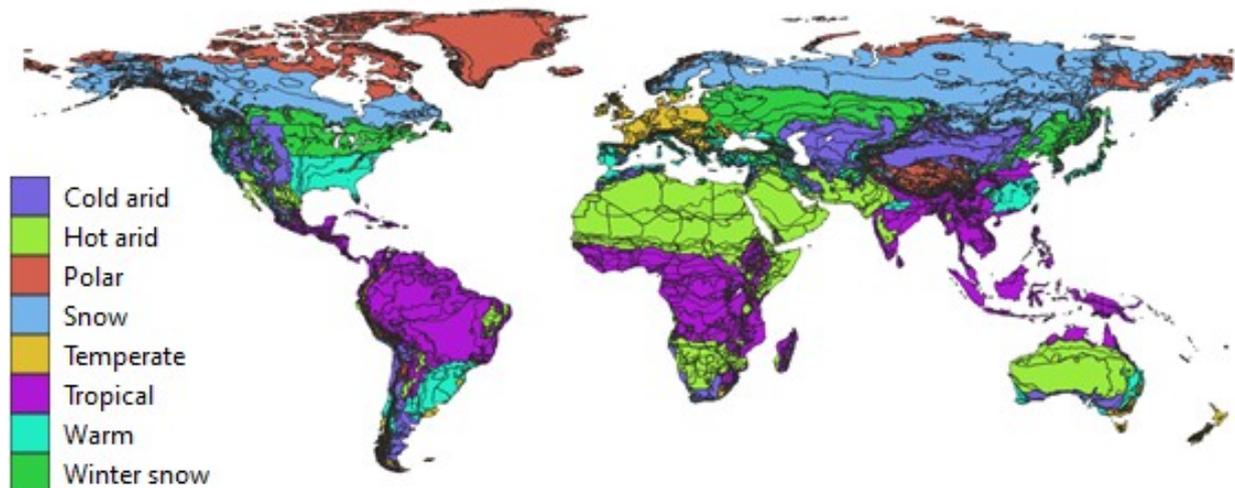


Figura 4: Clasificación climática Köppen utilizada para el módulo ambiental de WILIAM.

### III | HERRAMIENTAS

En este apartado se describe las herramientas que se utilizaron para el modelado del ciclo de carbono en los bosques. Se describe que es la Dinámica de Sistemas y como bajo esta metodología por medio del programa Vensim se ejecuta el modelado.

#### 1 | Dinámica de Sistemas

La dinámica de sistemas es una herramienta que facilita la construcción de modelos de simulación de una forma diferente a otras técnicas aplicadas al estudio de sistemas socioeconómicos. Nació en el MIT Sloan (Management Sloan School) en la década de 1950 desarrollado por el profesor Jay W. Forrester. En su origen se creó para mejorar la comprensión de los procesos industriales. La Dinámica de Sistemas permite la construcción del modelo tras una análisis cuidadoso de cada uno de los elementos que conforman el sistema, permitiendo extraer la lógica interna del modelo y con ello conocer la evolución a largo plazo del sistema que se esté modelando, ya que el objetivo de la dinámica de sistemas es “llegar a comprender las causas estructurales que provocan el comportamiento del sistema”(García 2003).

El termino dinámica aquí se emplea a lo que es la oposición a lo estático, con lo cual se quiere expresar el carácter cambiante del sistema, por ejemplo, la trayectoria de una magnitud en un tiempo transcurrido, entonces al hablar de Dinámica de Sistemas, nos referimos a las distintas variables que se pueden asociar a las partes que sufren cambios a lo largo del tiempo, ósea las interacciones que se producen entre ellas.

La dinámica de sistemas es una herramienta ideada para resolver problemas concretos, aplicada a campos muy variados, utilizada para construir modelos de simulación en casi todas las ciencias, donde la podemos dividir en diferentes ámbitos de aplicación: empresarial, social y medio ambiental. Construyendo modelos de gestión en el cual se pueden analizar y diseñar políticas, en los cuales se analiza que alternativa es mejor, sin tener la necesidad de tener una alta precisión, ya que su fin es mostrar una comparación, a diferencia de los modelos predictivos (Ferreras 2017). El uso de esta metodología permite: identificar el problema, desarrollar hipótesis de comportamiento dinámico que puedan explicar las causas de ese problema, analizando de raíz, logrando verificar si el modelo reproduce o no

de forma satisfactoria el comportamiento de la realidad, facilitando la prueba de diferentes políticas que solucionan el problema y analizar cuál es mejor, ofreciendo un panorama sistémico que muchos IAMs no incluyen.



Figura 5: Representación de la polaridad de las relaciones entre las variables dependientes e independientes.

### | Estructura básica de la Dinámica de Sistemas

Al construir un modelo de simulación para resolver el problema planteado, después de comprobar que es necesario recurrir a una simulación para poder realizar su estudio, tenemos que identificar los aspectos o elementos relacionados con el problema de forma directa o indirecta y como estos se relacionan entre sí, estos forman los “elementos del sistema”. Un sistema es un conjunto de “elementos relacionados entre sí, de forma tal que un cambio en un elemento afecta al conjunto de todos ellos”(Garcia 2003). A continuación, se describe como se hace en el lenguaje de Dinámicas de Sistemas esta representación.

### | Diagrama causal

“Un diagrama causal es un diagrama que recoge los elementos claves del sistema y las relaciones entre ellos” (Garcia 2003). Es la forma en la cual representamos el sistema que estamos estudiando, la cual está compuesta de los elementos y las relaciones que permitan reproducir la referencia histórica que tengamos del sistema, plasmadas de forma gráfica, estas relaciones están representadas por medios de flechas entre las variables que están relacionadas entre ellas.

### | Diagramas de flujo

El Diagrama de Flujos, también denominado Diagrama de Forrester, es el diagrama característico de la Dinámica de Sistemas. “Es una traducción del Diagrama Causal a una terminología que permite la escritura de las ecuaciones en el ordenador para así poder validar el modelo, observar la evolución temporal de las variables y hacer análisis de sensibilidad” (Garcia 2003). Está compuesto por variables llamados “Niveles o stocks” que son los elementos que nos muestran en cada instante de tiempo del modelo, su representación integral es la ecuación 1:

$$stocks = \int_{t_i}^{t_f} Flujo(t)dt + stock(t = t_i) \tag{1}$$

varían en función de los “flujos” que son funciones temporales, estas recogen las acciones resultantes de las decisiones del sistema. También están las “variables auxiliares” y las “constantes” que son parámetros que permiten una visualización mejor de los factores que

condicionan los flujos. Por último, están las variables llamadas “retardos o delays”, que son funciones que simulan los retrasos que se producen en la transmisión de materiales o informaciones. Siendo el tiempo de demora que entre una acción y el efecto que provocan.

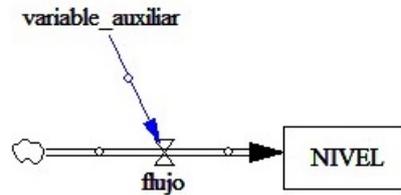


Figura 6: Diagrama causal en Dinámica de Sistemas.

## 2 | Vensim

El software que nos permite la creación de nuestro modelo es la herramienta de modelado “Vensim”, la cual permite conceptualizar, documentar, simular, analizar y optimizar modelos de Dinámica de Sistemas. De la misma forma que en la sección anterior explicamos las relaciones causales, permite mediante la conexión de palabras (variables) con flechas, las relaciones entre las variables del sistema son ingresadas y registradas por el programa como conexiones, siendo esta la información que el “Editor de Ecuaciones” usa para completar el modelo de simulación, resolviendo el gran número de ecuaciones que tienen los sistemas dinámicos de una forma sencilla.

Usa una interfaz (ver figura 18) que puede pensarse como un “Banco de Trabajo” y un juego de herramientas, las cuales facilitan la construcción, ejecución y análisis de los modelos (Vensim 2002). La ventana principal de Vensim es el Banco de Trabajo que siempre incluye la Barra de Títulos, el Menú, la Barra de Herramientas y las Herramientas del Análisis que nos ayudan a crear y analizar los diagramas causales e incluir las ecuaciones del modelo. Permite resolver problemas matemáticos que presentan una alta complejidad para ser resueltos sin la ayuda de la simulación (Ferreras 2017).

El formato de trabajo funciona integrando los stocks de la forma que se explicó en la ecuación 1. Contando con diferentes métodos de integración: Euler que es la más sencilla y rápida, el cual se usa para este TFM. En el editor de ecuaciones (ver figura 19) se definen el conjunto de ecuaciones que describen el comportamiento de las variables del banco de trabajo, que nos ayudan a definir el modelo. En esta ventana se puede especificar las unidades, acceder a las funciones con las cuales cuenta el programa, los valores máximos y mínimos, las variables con la cual se relaciona, se le puede asociar subscripts, y escribir comentarios que describen la ecuación. Es importante porque nos muestra también si tenemos errores, al chequear la síntesis y el modelo.

Los subscripts es una herramienta que solo está disponible en Vensim Profesional y DSS, nos permite añadir el carácter vectorial a una variable, de tal forma que a la hora de escribir la ecuación podamos acceder directamente al elemento específico que se desee manipular, esencial en nuestro modelo el cual esta regionalizado por zonas climáticas, y nos interesa ver el comportamiento de cada una de ellas para cada variable.

Las herramientas de análisis con las que cuenta Vensim, muestran la información almacenada sobre la variable seleccionada en el banco de trabajo, mostrando su valor en el modelo y cuál es su comportamiento dinámico una vez ya construido y corrido la simulación, en donde se puede ver tanto de forma gráfica como tabulación la comparación de varias variables del modelo simultáneamente, incluso permite representar más de una simulación a la vez para facilitar la comparación y el análisis

#### | Datos externos

Vensim permite la importación de datos externos, tanto de archivos de textos, que pueden ser adaptados por medio del mismo a la forma en la que llama internamente el programa, o bien desde una hoja de cálculo de Excel, que es la forma con la cual usaremos en este trabajo. Esto es posible por medio de las funciones GET DIRECT CONSTANTS la cual nos permite llamar los valores constantes de la variable seleccionada para la cual se necesitan los datos externos. Y la función GET DIRECT DATA, la cual nos permite importar datos que tienen un carácter temporal. Para ambas funciones tenemos que decirle cual es el archivo (que tiene que estar en el mismo directorio en el cual tenemos guardado nuestro modelo) de donde se extraerán los datos, el nombre de la hoja de Excel donde se encuentra guardada el valor, y el valor de la fila y columna donde aparece el dato, la única diferencia con la función GET DIRECT DATA es que se tiene que ingresar la secuencia temporal de los datos también guardado como una variable en el archivo.

## IV | DESCRIPCIÓN DEL MODELO

El modelo climático implementado en el proyecto LOCOMOTION, es una adaptación e integración del modelo C-ROADS (Climate Rapid Overview And Decision-support Simulator) (Fiddaman et al. 2021), desarrollado en el lenguaje de dinámica de sistémicas. C-ROADS fue creado por Climate Interactive, MIT Sloan Sloan Sustainability Initiative y Ventana Systems y se enfoca en el efecto de las emisiones nacionales y regionales de carbono en la concentración y los resultados climáticos globales.

Tanto el modelo climático como el ciclo del carbono se basan en el modelo FREE desarrollado en la tesis del Doctor Tom Fiddaman en 1997 (Fiddaman 1997). Este ciclo del carbono es un modelo de difusión turbulenta, el cual tiene reservas de carbono en la atmósfera, biosfera, capa oceánica de mezcla y tres capas oceánicas más profundas. El modelo relaciona las interacciones atmósfera-capas oceánicas de mezcla y la producción primaria neta (NPP) de los modelos de Goudriaan y Kettner e IMAGE 1.0 (J. Goudriaan 1984) con la difusión turbulenta entre las capas del océanos y la biosfera que tiene dos variables stocks.

En el modelo FREE todas las emisiones se acumulan inicialmente en la atmósfera, y a medida que las concentraciones atmosféricas de carbono van en aumento, también lo hace la absorción de carbono por el océano y la biosfera, donde el carbono se almacena gradualmente. En el modelo se incluyen los impactos del ser humano en la biosfera, representando cuatro almacenes principales: atmósfera, océano, biosfera terrestre y reservorio de carbono fósil (J. Goudriaan 1984) y en C-ROADS, la estructura del flujo del carbono en la biosfera terrestre se distingue los diferentes ecosistemas en la biosfera lo cual las separan en hojas, ramas, tallos, raíces, hojarasca, humus y carbón vegetal, en el cual el insumo propulsor del ecosistema viene dado por la producción primaria neta (NPP), compuesto por la diferencia anual bruta de carbono a un lado y la pérdida respiratoria por el otro lado, el cual se divide en cuatro componentes (Figura 7): hojas, ramas tallos y raíces (J. Goudriaan 1984).

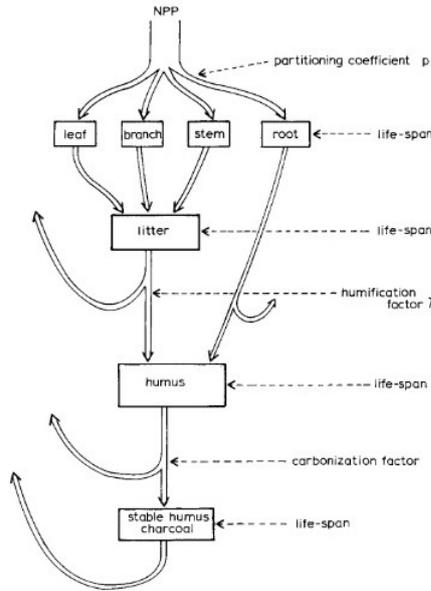


Figura 7: Estructura general del flujo del carbono a través de los ecosistemas terrestres (Fuente: (J. Goudriaan 1984)).

El stock del carbono en los bosques sigue la misma estructura del flujo general del carbono en los ecosistemas terrestres. Se ha simplificado el modelo de (J. Goudriaan 1984), separando la parte superior (hojas, ramas, tallos) y la parte inferior (hojarasca, humus) de los ecosistemas forestales. Hemos considerado las interacciones que existen entre la atmósfera y la biomasa que intervienen de forma natural en el stock así como las perturbaciones que sufre por la intervención humana se ven en la 8. Estos flujos Atmósfera - Biomasa, Biomasa-Atmósfera y Biomasa-Humus más la extracción de madera, son los flujos que se tienen en cuenta en el ciclo de carbono en bosques, las interacciones entre la atmósfera-biomasa-océanos son modelados en el ciclo global del carbono.

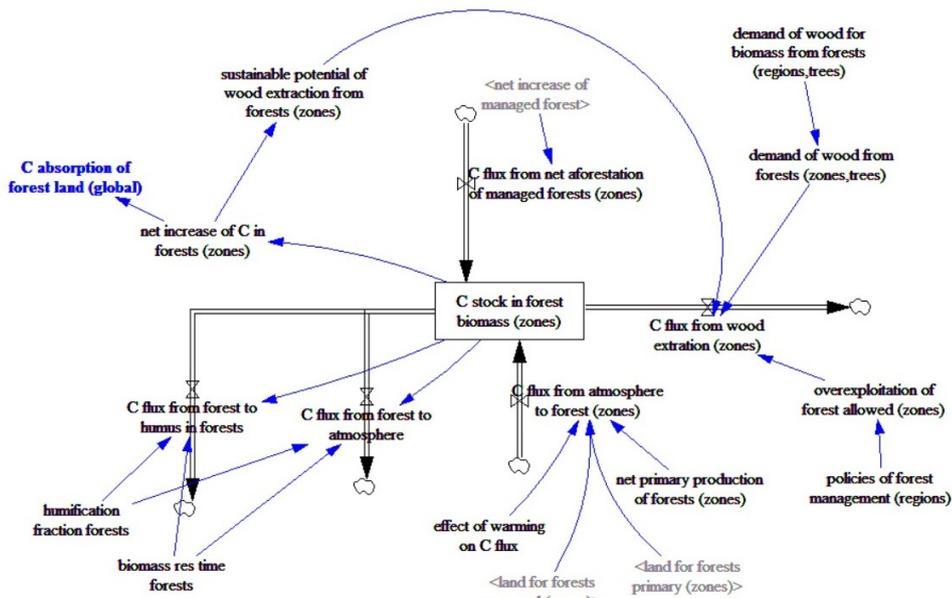


Figura 8: Estructura simplificada del modelo del ciclo de carbono en bosques.

## 1 | Flujo de carbono de la atmósfera a los bosques

Uno de los principales depósitos de carbono en el ciclo activo del mismo es el carbono depositado en la atmósfera. El flujo atmosférico a la biosfera consiste en la evolución de la producción primaria neta (NPP), esta es la diferencia entre la producción primaria bruta (fotosíntesis total) y la respiración total de las plantas en un ecosistema (Roxburgh et al. 2005) o sea es la nueva materia orgánica total producida en un intervalo de tiempo, siendo entonces todo el carbono asimilado en un periodo de tiempo dado. Se suele considerar que que el NPP aumenta cuando sube la concentración de carbono en la atmósfera por ello "Wullschlger" (Woodwell 1995) considera que esta es una relación logarítmica como la de la ecuación 2:

$$NPP = NPP_0 \left[ 1 + \beta_b \ln \left( \frac{C_a}{C_{a,0}} \right) \right] \quad (2)$$

El problema que presenta esta formulación es que si la concentración atmosférica de C se aproximara a cero, la producción primaria neta se aproximaría a menos infinito, esto imposible dado el stock positivo finito de biomasa. Por otro lado, a medida que la concentración de C se vuelve muy alta, la producción primaria neta puede crecer arbitrariamente, lo que tampoco es posible en la realidad. También esta producción es afectada por la participación del CO<sub>2</sub> en el crecimiento de las plantas, la saturación debido a posibles valores altos de CO<sub>2</sub>, y el efecto del incremento de la temperatura ya que la biomasa disminuye con el aumento de esta (Fiddaman et al. 2017), este efecto de calentamiento en el flujo de carbono (WE) es la retroalimentación que tiene la temperatura sobre el flujo del carbono hacia la biomasa, depende de la influencia que tiene la temperatura y el cambio de ella en el flujo de carbono a la tierra. Es por eso que se usa la ecuación 3 la cual cubre todos los factores antes mencionados:

$$NPP = \left[ NPP_0 \left( 1 - \beta_b + \beta_b \frac{C_a^{CO_{2sat}}}{C_{a,0}^{CO_{2sat}}} \right)^{\frac{1}{CO_{2sat}}} \right] * WE \quad (3)$$

Donde NPP<sub>0</sub> es el valor de referencia inicial para NPP específicamente de los bosques adaptados de (Janzen 2004).  $\beta_b$  es el coeficiente de bioestimulación que determina la razón de saturación de CO<sub>2</sub>,  $c_a$  el valor de carbono en la atmósfera tomados de la base de datos de NOAA (NOAA ESRL, sin fecha),  $c_{a,0}$ , el valor de referencia de carbono en la atmósfera.

El flujo de carbono proveniente de la atmósfera a los bosques depende de cómo evoluciona el NPP con respecto a cómo está cambiando el área de cobertura forestal en el tiempo, siguiendo la ecuación 4

$$C \text{ flux}_{\text{from atm to forest}} = NPP \left( \frac{\text{Land forest}}{\text{Land forest}_{\text{initial}}} \right) \quad (4)$$

## 2 | Flujo de carbono del bosque a la atmósfera y humus

Aproximadamente un tercio del carbono orgánico terrestre se encuentra en los bosques (Janzen 2004), los árboles absorben CO<sub>2</sub> a través de la fotosíntesis y lo liberan por medio de la respiración vegetal, dejando como consecuencia una diferencia, que es la nueva biomasa, parte de esta se deja caer al suelo del bosque como basura (litter en la figura 7): follaje, madera muerta etc. Esta tiene un tiempo de renovación, cuando se descompone se libera por

respiración a la atmósfera pero también cuando este decae una pequeña fracción también es capturada por el suelo. C-ROADS divide estos dos procesos para obtener el cálculo de los flujos de carbono que van de los bosques tanto a la atmósfera y el humus, modelando la expresión que domina el carbono que se almacena en la biomasa siguiendo la ecuación 5:

$$C = \int NPP(t) - \frac{C(t)_b}{\tau_b} dt \quad (5)$$

$c_b$  es el carbono almacenado en la biomasa,  $\tau_b$  es el tiempo de residencia del carbono en la biomasa. Estos flujos son afectados por el proceso de humificación de la biomasa (descomposición del carbono derivado de las plantas). Adaptando la expresión anterior el flujo de carbono que entra en la biomasa procedente del bosque esta dado por la ecuación 6:

$$\text{C flux}_{\text{from forest to humus}} = HF \left( \frac{\text{C in forest}}{\text{Biomass Res time}} \right) \quad (6)$$

y la fracción de carbono que se libera a la atmósfera esta dada por la ecuación

$$\text{C flux}_{\text{from forest to atmosphere}} = (1 - HF) \left( \frac{\text{C in forest}}{\text{Biomass Res time}} \right) \quad (7)$$

en donde HF es la fracción de carbono que sale de la biomasa y que se queda en el humus, *C in forest* es el carbono almacenado en los bosques y *Biomass Res Time* es el tiempo medio de residencia del carbono en la biomasa (ver tabla 8).

### 3 | Flujo de carbono proveniente de la extracción de madera

La destrucción del bosque, es un tema que tiene la atención mundial, por el papel fundamental que desempeñan en términos tanto ecológicos y sobre todo en las emisiones netas de carbono, derivadas de la deforestación y degradación del mismo (Retana 2017). Con el propósito tener una contabilización de cuanto carbono se pierde en los bosques, se analizan las variaciones que este sufre siguiendo la metodología del capítulo 3 en la Orientación del IPCC sobre las buenas prácticas para UTCUTS (Penman et al. 2003) que indica como cambia la reserva de carbono para tierras forestales que siguen siendo tierras forestales.

La estimación de la perdida de carbono debido a talas comerciales se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$\text{C flux}_{\text{from wood extraction}} = H \cdot D \cdot FEB_2 \cdot (1 - f_{bl}) \cdot CF \quad (8)$$

En donde H es el volumen de madera extraído anualmente adaptado a zonas climáticas por tipo de árbol por las matrices de transición (tabla 5), D es la densidad básica de madera por tipo de bosque,  $FEB_2$  es el factor de expansión de la biomasa,  $f_{BL}$  es la fracción de biomasa que se deja descomponer en el bosque y CF es la fracción de carbono en materia seca, este ya es un valor por defecto (estas constantes son valores tomados de la metodología del IPCC (Penman et al. 2003)).

#### 4 | Flujo de carbono de la forestación neta del bosque gestionado

Los deforestación emite CO<sub>2</sub> a la atmósfera pero cuando ocurre la forestación, que es la creación deliberada de nuevos bosques según definición del IPCC (Sabine et al. 2013) el CO<sub>2</sub> es absorbido de la atmósfera, convirtiendo el proceso en un método biológico eliminador de dióxido de carbono. Los factores que interviene en este cambio son el tiempo desde que ocurre la creación de la nueva cobertura forestal, el sitio donde ocurre el establecimiento forestal. Este puede estar sometido a perturbaciones mecánicas que aceleran la descomposición del suelo produciendo perdidas de carbono, ejemplo de ello son la erosión producida por el viento y el agua, también afecta el uso anterior al que el sitio fue sometido, en donde el carbono del suelo puede tender a disminuir o aumentar después de producirse la forestación (Paul et al. 2002). Otro factor importante es el clima, según la región climática, la capacidad de generar carbono por este proceso aumentara o se reduce. En C-ROADS este tipo de secuestro se calcula con la ecuación siguiente:

$$C \text{ flux}_{\text{from net afforestation}} = (\text{Max C density}) \cdot \text{DELAY3} \left( \text{Land}_{\text{afforestation}}, \text{Forest}_{\text{maturation time}} \right) \quad (9)$$

En donde *Max C density* es la densidad máxima de carbono en los bosques calculada con datos externos de FRA (FRA 2020), DELAY3 es una función de Vemsin que devuelve un retardo exponencial de tercer orden de la entrada, conservando la entrada si cambia el tiempo de retardo. *Land Afforestation* es la cantidad neta de área que ha sido forestada adaptada por zona climática a través de las matrices de transición (ver tabla 4) y *Forest maturation time* es el tiempo que tarda el bosque en madurar, este es distinto para cada tipo de bosque siendo para el tropical 34 años, 60 años para el bosque templado y 90 años para el boreal (Pastor et al. 2020).

#### 5 | Carbono de las plantaciones forestales

En muchas regiones la pérdida de cubierta forestal ha sido compensada con el aumento de las plantaciones forestales de forma que el 15% de la producción de madera proviene de ellas (Paquette, Alain M. 2010). Las industrias forestales han implementado monocultivos intensivos a gran escala de especies como eucalipto, acacia y pinos, representando las plantaciones como uno de los suministros de madera más importante debido a la alta productividad que estas han demostrado tener, otorgando menos presión a los bosques manejados. Pero el tiempo de maduración de estos bosques es relativamente corto en comparación a el tiempo de maduración de los bosques primarios y manejados (Parmar 2004), además su producción se quema y el carbono es liberado en pocos años por lo que no se puede considerar un almacén de carbonos. Por ello en el modelos se considera que las emisiones y absorciones netas provenientes de las plantaciones son igual a cero.

En el modelo el carbono proveniente de las plantaciones, no se incluye en el stock, pero se realiza la corrección en el flujo del carbono proveniente de la extracción de madera, en el cual se resta el volumen de madera proveniente de esta categoría forestal. Primero siguiendo la misma línea de CROADs, se calcula el carbono el cual depende de la productividad de las plantaciones (adaptado de los resultados obtenidos en el modelado de las plantaciones forestales para la absorción del carbono con el modelo de vegetación global LPJmL (Braakhekke et al. 2019)), la cantidad de cubierta forestal que tienen las plantaciones y su tiempo de maduración (Parmar 2004). Estos resultados se adaptan a los tipos de bosque y por medio de las matrices que relacionan el porcentaje de tipo de bosque hay por zona

climática Köppen se calcula la madera extraída siguiendo la relación del IPCC:

$$\text{wood extraction of plantation} = \left( \underset{\text{from plantations}}{\text{C}} \right) / D \cdot FEB_2 \cdot (1 - f_{bl}) \cdot CF \quad (10)$$

En donde  $C_{from\ plantations}$  es el carbono almacenado en las plantaciones y  $FEB_2$ ,  $f_{bl}$  y  $CF$ , son los mismo factores del IPPC usados en la ecuación 8.

## 6 | Incremento neto del bosque

Los bosques y el cambio climático están ligados, como mostramos en las secciones anteriores, es necesario saber como esta cambiando el stock de carbono en el mismo, pasa saber si se extrae un potencial sostenible. El incremento neto del carbono en las tierras forestales se puede conocer por medio de las interacciones entre los flujos que intervienen en el stock mediante la ecuación 11.

$$\text{Potential} = \underset{\text{in forest}}{\text{C}}(t) - \underset{\text{in forest}}{\text{C}}(t-1) \quad (11)$$

Donde estamos calculando la razón de cambio que sufre el stock, si esta es positiva se pueden establecer limites de tal forma que la extracción de biomasa sea sostenible.

## 7 | Datos

El modelo es alimentado con datos externos para las variables que muestran un carácter temporal. La evolución de los datos históricos para las tierras forestales y la extracción de madera es obtenida de la base de datos estadísticos FAOSTAT (FAO 2021) de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) y de la Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales (FRA 2020). Los datos climáticos son obtenidos del departamento del Laboratorio de monitoreo Global de la Oficina Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, ) y de la base de datos de RCP (*RCP Database* 2009). Las constantes usadas en el modelo son adaptadas de la literatura Janzen 2004. del modelo CROADS (Fiddaman et al. 2017 y Fiddaman et al. 2021) y de las directrices del IPCC (Penman et al. 2003).

La regionalización en el modelo se hace a partir de las zonas Köppen, mientras que los datos que se necesitan para alimentar el modelo están por zonas geopolíticas, lo que implica tener que adaptarlos a las zonas climáticas. Esta adaptación se realiza por medio de las matrices de transición (ver tablas 4, 5 y 6). En el modelo se hacen uso de tres tipos de matriz de transición. la primera transforma las regiones geopolíticas a zonas climáticas, esta se obtiene a través del porcentaje de área que hay de bosque por cada zona climática en cada región geopolítica del modelo (esta información la tenemos por medio de los socios del paquete de trabajo del modulo climático del proyecto por medio de GTAP, como se explico en la sección de regionalización en WILIAM). La segunda matriz relaciona el tipo de árbol y bosque extraído por zona geopolítica en cada zona climática, esta se obtiene a través del porcentaje de volumen extraído en cada región geográfica dado por tipo de bosque (tropical, templado y boreal) y tipo de árbol (conífero y no conífero) en cada zona climática. Y por ultimo la matriz que relaciona el tipo de bosque a zona climática, esta es calculada a partir del porcentaje de área de tipo de bosque que existe en cada región locomoción y el área de bosque que hay en cada zona climática (cada una de las matrices se calcularon con el año base de 2005).

## V | RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Este apartado muestra los resultados obtenidos del modelo del stock del carbono en bosques. Los primeros tres apartados muestran el comportamiento entre las interacciones atmósfera-biomasa. En el apartado 4 mostramos la contribución que tiene la forestación neta en el stock y cuanto carbono se esta extrayendo del stock por la extracción de madera. El en apartado 5 colocamos la evolución del stock del carbono en los bosques y cual es el potencial que tiene este para la extracción sostenible. Por ultimo presentamos la comparación de los datos históricos de la evolución del carbono en el bosque (*FRA*, ) con nuestros resultados producto del modelado.

### 1 | Interacciones de los flujos del stock de carbono en los bosques

#### 1.1 | Flujo de carbono de la atmósfera al bosque

Este flujo es gobernado por la producción primaria neta, el análisis muestra de forma general que está evolucionando con una tasa de cambio positiva (ver figura 9), las zonas más productivas son la TROPICAL, SNOW, WINTER SNOW Y TEMPERATE. El flujo de carbono de la atmósfera al bosque, tiene un comportamiento similar, ingresando en promedio aproximadamente 26 GtC/year al bosque, sin embargo, presenta una reducción significativa para algunas zonas climáticas especialmente la TROPICAL (ver figura 10), en donde la tasa de cambio es negativa, la reducción de área forestal de los últimos años de estudio se ve directamente reflejado en estos resultados ya que aunque el NPP tiene una taza de cambio positiva pero el ratio de la evolución del bosque con respecto a la cobertura inicial cada vez esta disminuyendo. Mientras que las zonas WARM, TEMPERATE, WINTER SNOW, y SNOW presentan un ligero incremento. Sin embargo. la zona TROPICAL es la que mas carbono introduce al bosque, aproximadamente es 3 veces más que la zona SNOW que es la segunda que introduce mas carbono y 6 veces más que la región SNOW y si comparamos con la TEMPERATE y WARM que también mostraron un incremento, la zona TROPICAL ingresa con respecto a cada una de ellas 5 veces mas que estas, esto recalca la importancia de esta zona en el proceso de absorción de carbono.

Zona Climática	NPP promedio (GtC/year)	Tasa de Cambio (GtC/year)
TROPICAL	13.78 ± 0.16	0.024
WARM	2.33 ± 0.01	0.02
ARID_HOT	0.583 ± 0.006	0.0009
ARID_COLD	0.145 ± 0.0001	0.0002
TEMPERATE	1.94 ± 0.02	0.003
WINTER_SNOW	2.52 ± 0.02	0.0034
SNOW	4.68 ± 0.01	0.05
POLAR	0.222 ± 0.002	0.0003

Tabla 1: Valores de NPP promedio en el bosque por zona climática.

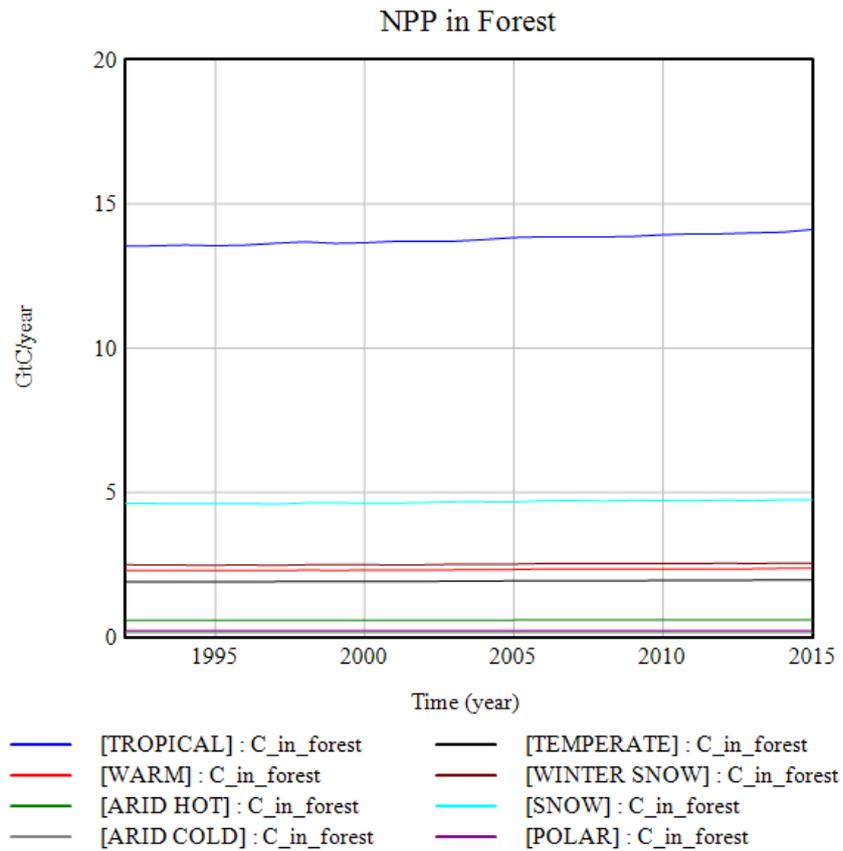


Figura 9: Evolución temporal del NPP en bosques por zona climática.

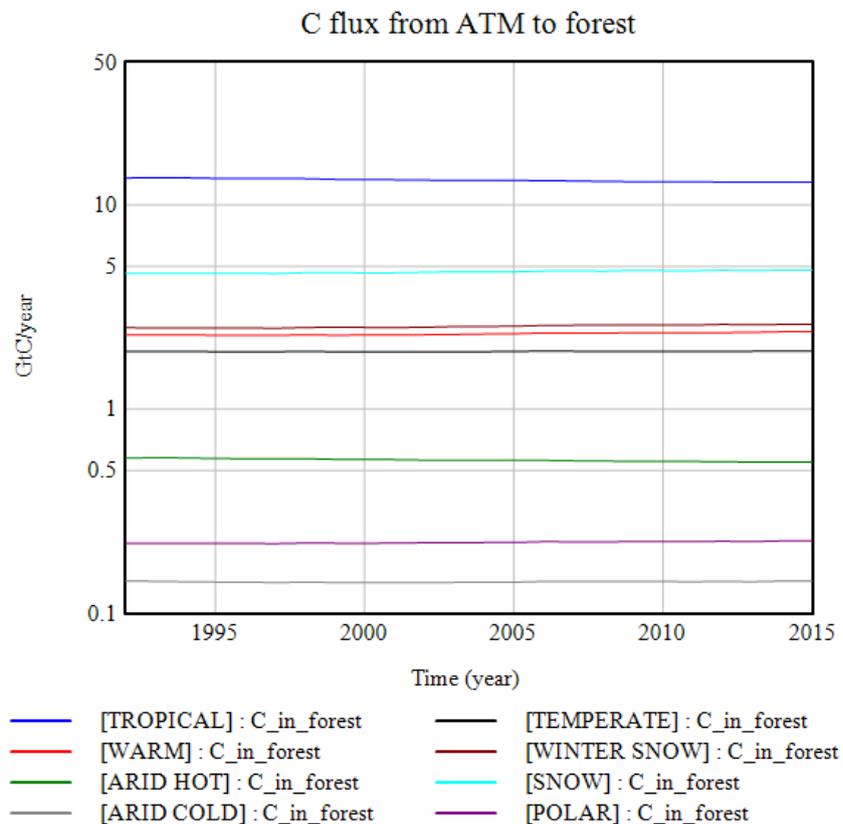


Figura 10: Flujo de carbono de la atmósfera al bosque.

**1.2 | Flujo de carbono del bosque a la atmósfera y al humus**

El análisis muestra que la mayoría de las zonas están liberando mas carbono a la atmósfera excepto por la zona TROPICAL. Las zonas que liberaron menos carbono a la atmósfera son la TROPICAL ARID HOT, ARID COLD y la POLAR teniendo una tasa de cambio negativa en comparación con las otras zonas que presentan una tasa de cambio positiva (ver figura 11). El modelo indica que se están sacando del stock del carbono en promedio 13.2 GtC/year, esto es aproximadamente la mitad del carbono que ingresa de la atmósfera.

El flujo del carbono del bosque que se queda en el humus tiene un comportamiento similar al flujo anterior (ver figura 12), del cual en promedio el modelo indica que se pierden aproximadamente 12 GtC/year del stock del carbono en los bosques.

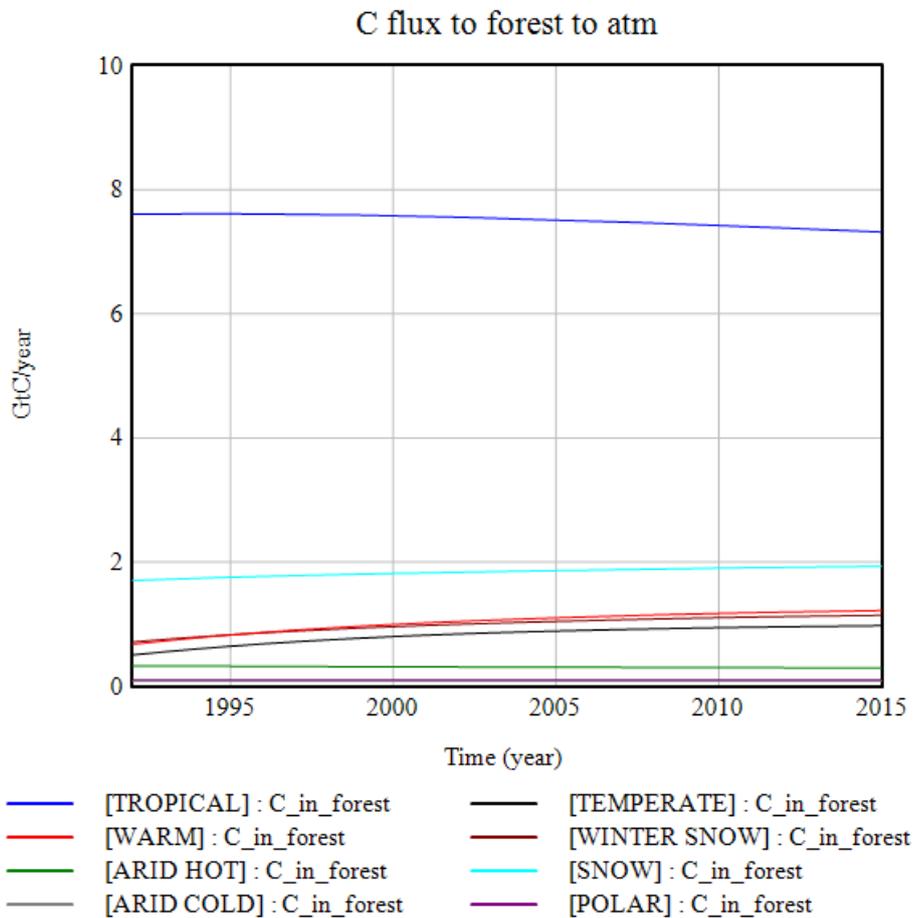


Figura 11: Flujo de carbono del bosque a la atmósfera.

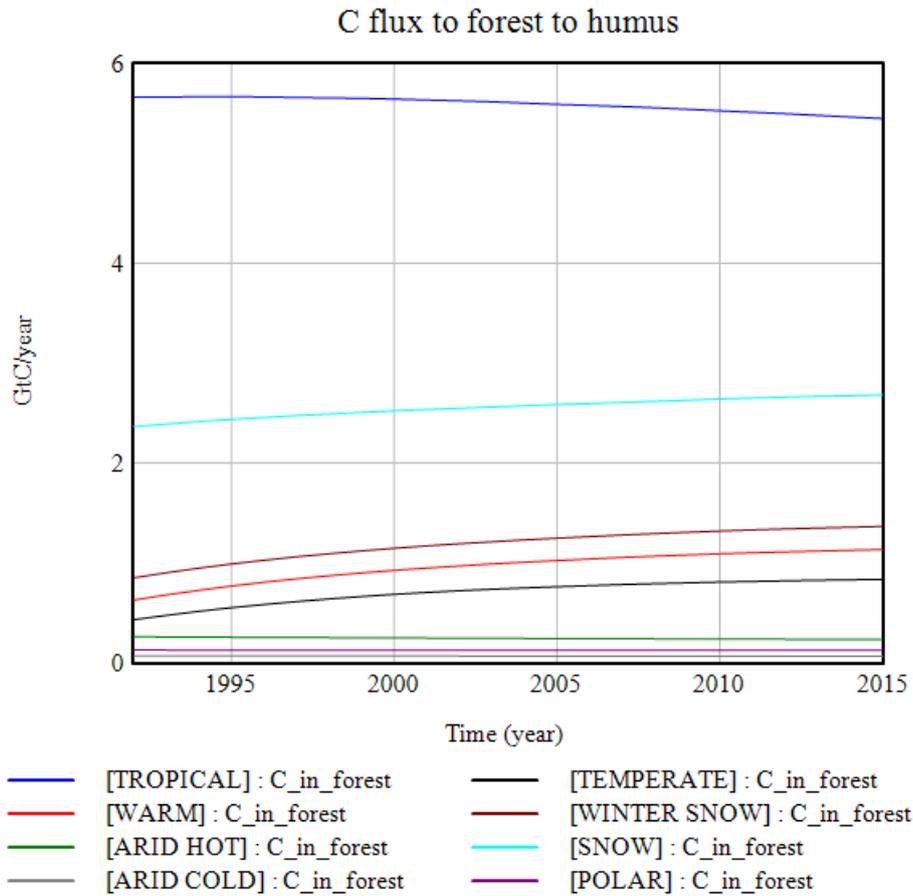


Figura 12: Flujo de carbono del bosque al humus.

Zona Climática	Flujo de carbono de la atmósfera al bosque (GtC/year)	Flujo de carbono del bosque a atmósfera (GtC/year)	Flujo de carbono del bosque al humus (GtC/year)
TROPICAL	13.21 ± 0.04	7.48 ± 0.02	5.57 ± 0.01
WARM	2.34 ± 0.01	1.23 ± 0.01	1.14 ± 0.01
ARID_HOT	0.563 ± 0.002	0.295 ± 0.002	0.234 ± 0.002
ARID_COLD	0.1423 ± 0.0002	0.069 ± 0.0007	0.0598 ± 0.0006
TEMPERATE	1.915 ± 0.001	0.999 ± 0.007	0.857 ± 0.006
WINTER_SNOW	2.54 ± 0.01	1.14 ± 0.01	1.37 ± 0.01
SNOW	4.7 ± 0.01	1.9 ± 0.01	2.64 ± 0.01
POLAR	0.2222 ± 0.0004	0.0995 ± 0.0001	0.1248 ± 0.0001

Tabla 2: Valores promedio de los flujos del stock de carbono en bosques.

### 1.3 | Flujos de carbono debido a la forestación de los bosques manejados y extracción de madera

El modelo indican que en promedio se están ingresando en el stock de carbono por medio a la forestación neta aproximadamente 1.8 GtC/year. En las zonas TEMPERATE, ARID COLD y ARID HOT se tiene una tasa de cambio negativa, indicando que la cantidad

de área de forestación neta esta disminuyendo, pese a ello es positiva para el resto de las regiones climáticas. Un aspecto interesante que muestra el modelo es que las zonas que están ingresando mas carbono al stock son la TROPICAL Y WARM seguida de WINTER SNOW (ver figura 13) pero estos valores no superan la giga-tonelada de carbono por año (ver tabla 3).

En cambio, el carbono que se pierde por medio de la extracción de madera del bosque en promedio es de 2 GtC/year con una tasa de cambio positiva para todas las zonas excepto la región SNOW (ver figura 14), el modelo evidencia el gran impacto de extracción que están teniendo la zona TROPICAL superando aproximadamente la gigatonelada de carbono al año. También las regiones como ARID\_HOT y SNOW están perdiendo mas carbono que lo que generan con el proceso de la forestación. De forma general el modelo muestra esta que se esta perdiendo mas carbono del bosques, que lo que se está ganando con la forestación. En el análisis se observa la tendencia de aumento mucho mayor en la generación de carbono por la extracción de madera del bosque (ver figura 14) en contraste con la tasa de cambio del flujo de forestación (figura 13).

Zona Climática	Flujo de carbono proveniente de la forestación (GtC/Year)	Flujo de carbono proveniente de extracción de madera (GtC/Year)
TROPICAL	0.8947 ± 0.0001	1.26 ± 0.01
WARM	0.2845 ± 0.0001	0.17 ± 0.01
ARID_HOT	0.0295 ± 0.0001	0.066 ± 0.001
ARID_COLD	0.0187 ± 0.0001	0.0181 ± 0.0001
TEMPERATE	0.1149 ± 0.0001	0.117 ± 0.004
WINTER_SNOW	0.2084 ± 0.0002	0.16 ± 0.001
SNOW	0.1848 ± 0.0005	0.249 ± 0.01
POLAR	0.0162 ± 0.0001	0.0151 ± 0.0001

Tabla 3: Valores promedio de los flujos de carbono provenientes de la forestación neta y extracción de madera del bosque.

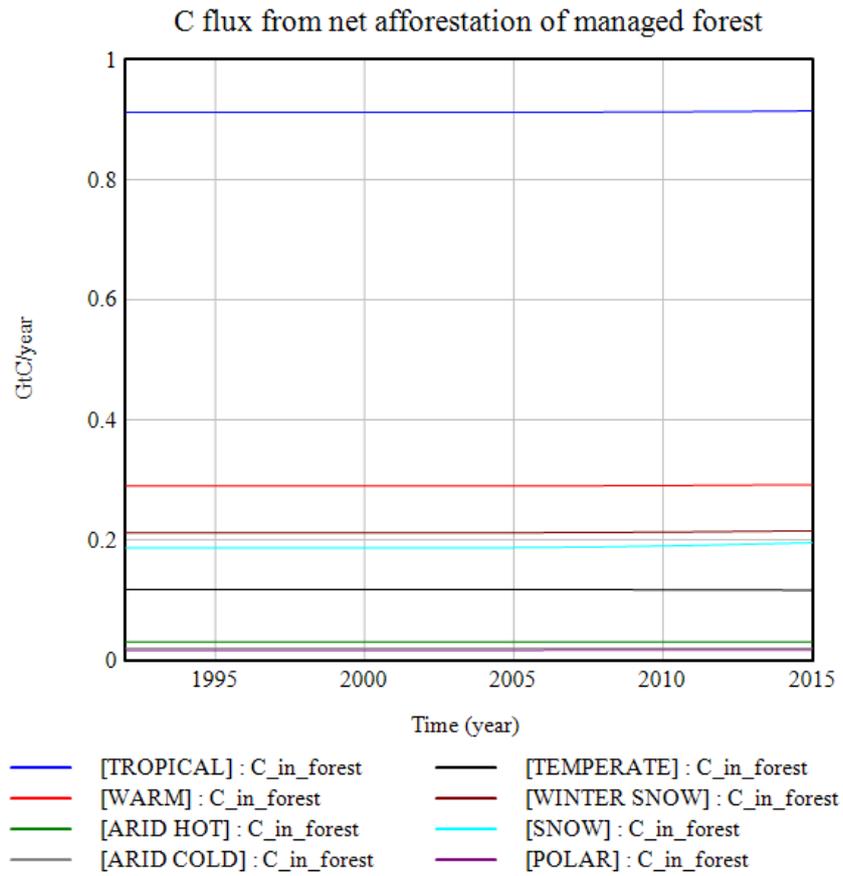


Figura 13: Flujo de carbono debido a la forestación neta de bosque.

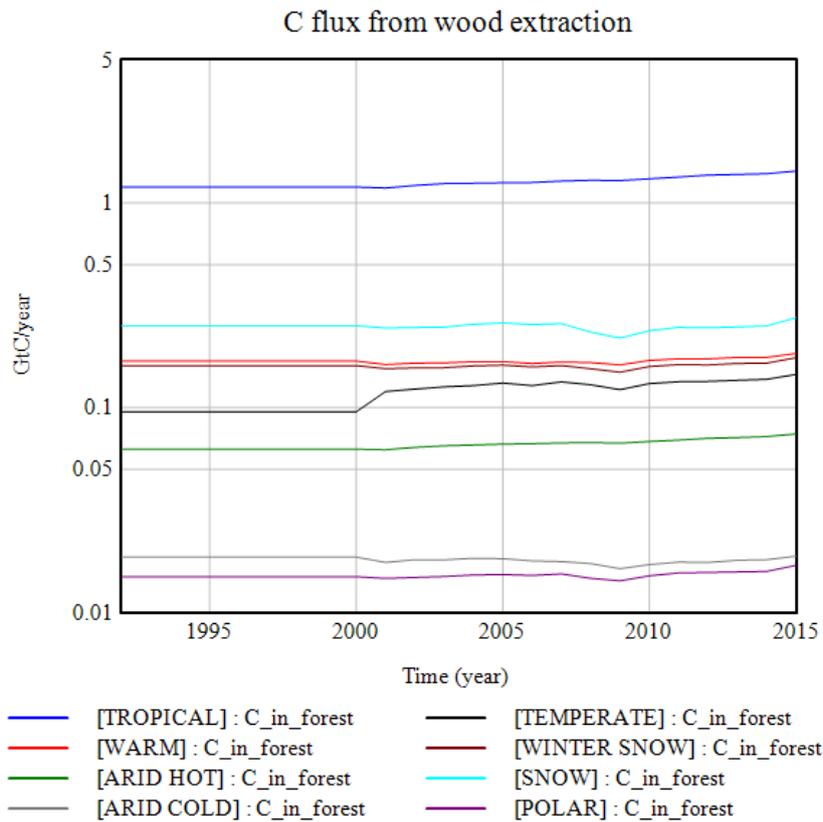


Figura 14: Flujo de carbono proveniente de la extracción de madera.

#### 1.4 | Stock del carbono y potencial de extracción de madera del bosque

A pesar de la poca cantidad carbono que queda en el bosque debido a todas las pérdidas naturales y artificiales al que esta sometido el stock, el modelo indica que se almacena en promedio aproximadamente 236 GtC solamente en la superficie forestal (recordemos que este modelo no incluye el carbono almacenado en la parte inferior del bosque así mismo como la madera muerta y el suelo). Presentando una tasa de cambio positiva para la mayoría de las zonas.

La región TROPICAL almacena la mayor cantidad de carbono del bosque con un promedio de 138 GtC, aportando el triple con respecto a la zona WINTER SNOW que es la segunda zona con mayor acumulación (ver figura 15), pero el modelo revela que sus reservas de carbono están disminuyendo. En las regiones POLAR, ARID\_COLD y HOT, el modelo también muestra que se están enfrentando al mismo problema teniendo una tasa de cambio negativa.

Las integración de todos estos flujos nos da como resultado el stock del carbono en los bosques, la derivada de estos nos facilita el incremento neto que tiene el bosque año a año. De forma general el modelo indica que el potencial del bosque se encuentra disminuyendo para cada una de las zonas climáticas. El incremento neto de carbono en los bosques al año para las zonas donde es positivo no supera la 0.5 GtC/year y la zona TROPICAL el potencial neto es negativo, presentando la mayor caída con respecto a las demás regiones climáticas (ver figura 16).

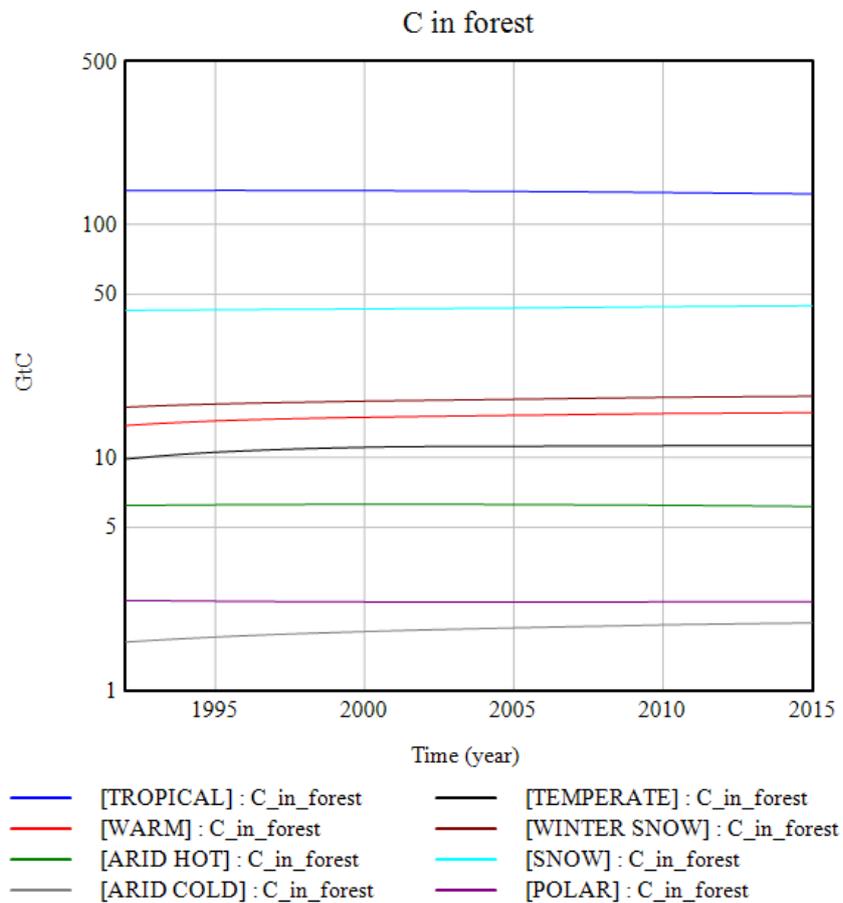


Figura 15: Stock del carbono en los bosques.

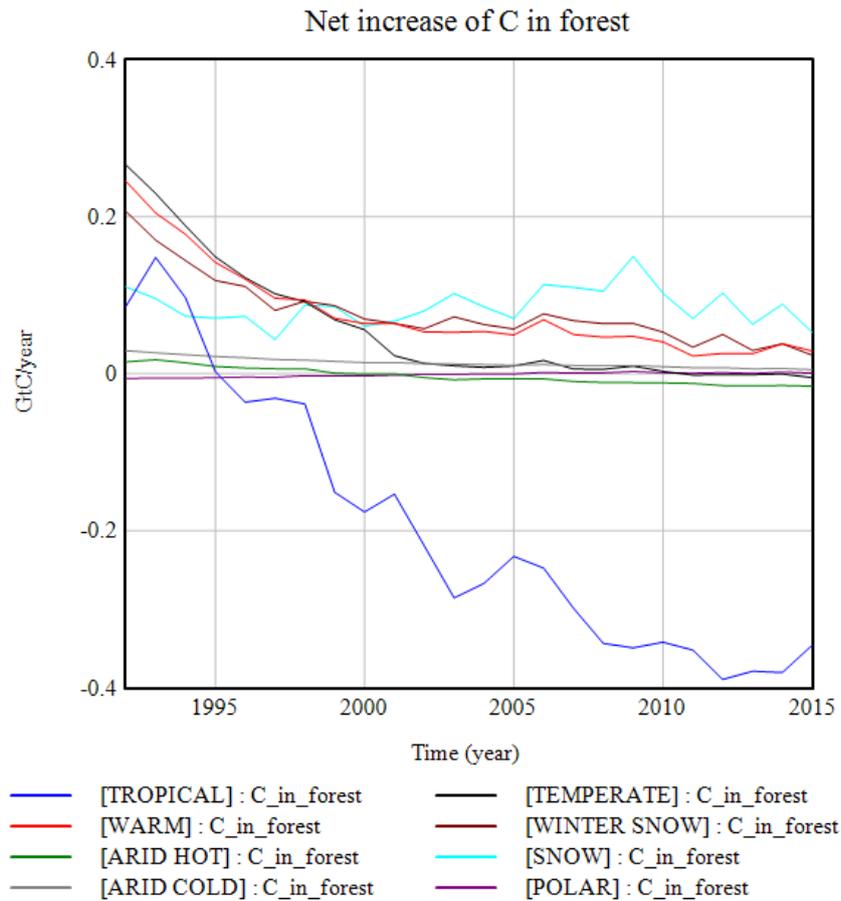
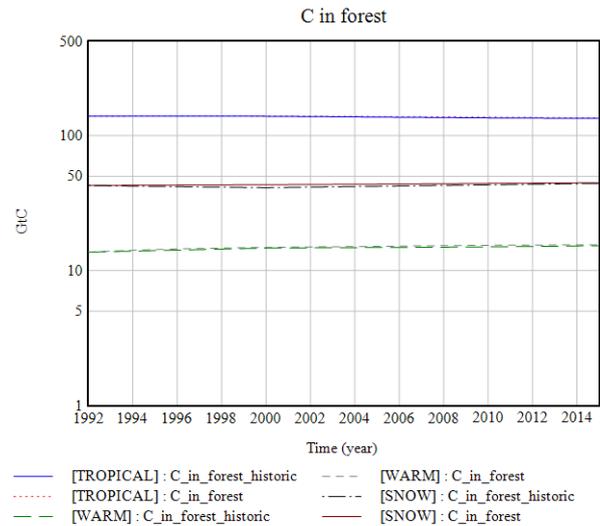


Figura 16: Potencial del stock de carbono en bosques.

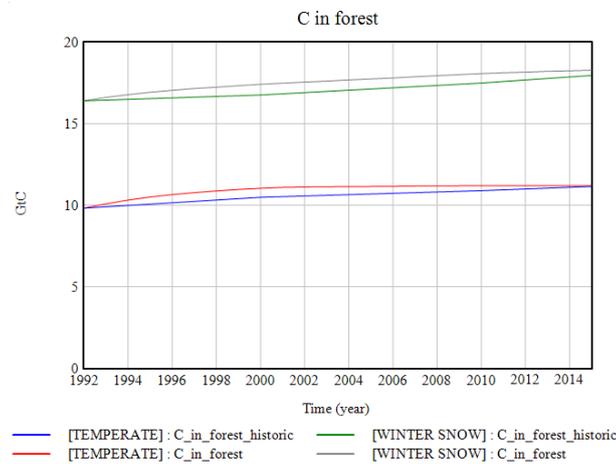
## 2 | Comparación del stock del carbono con datos históricos

El propósito del modelo es la visualización del comportamiento del stock del carbono para la evaluación de políticas. Para ver si este modela el stock del carbono en el bosque se realizó la comparación con los los datos históricos (NOAA ESRL, sin fecha) transformados por medio de las matrices de transición (ver tabla 4) que relacionan el porcentaje de zona Köppen que se encuentra en cada región geopolítica del proyecto. Los resultados muestran que el modelo sigue el comportamiento de la evolución histórica del carbono en los bosques (ver figura 17).

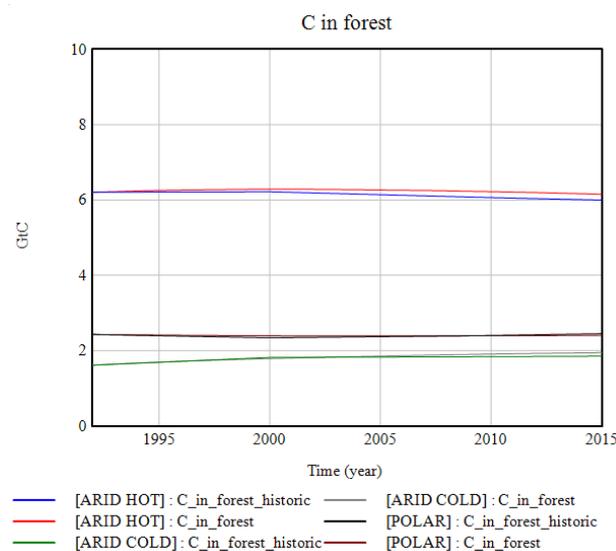
Para la zona POLAR y TROPICAL el modelo se ajusta bastante bien a los históricos (ver figura 17a y 17c), en cambio para el resto de las zonas climáticas los valores del modelo están por encima de los datos históricos (ver figura 17), siendo las zonas TEMPERATE y WINTER SNOW (ver figura 17b) las que tienen una diferencia mucho mas marcada.



(a) Stock histórico del carbono en bosques en las zonas TROPICAL, WARM y SNOW vs. modelo



(b) Stock histórico del carbono en bosques en las zonas TEMPERATE y WINTER SNOW vs. modelo



(c) Stock histórico del carbono en bosques en las zonas ARID\_HOT, ARID\_COLD y POLAR vs. modelo

Figura 17: Comportamiento de los datos históricos del carbono en bosques en comparación con el modelo por zonas climáticas.

### 3 | Discusión

Un aspecto importante que pone en evidencia los resultados obtenidos del modelado del stock del carbono en los bosques es el potencial negativo que ya tiene la zona TROPICAL y ARID\_HOT, lo preocupante que es que el resto de las zonas climáticas están siguiendo la misma tendencia, demostrando que la extracción de biomasa es insostenible.

Pese que los resultados modelados siguen el comportamiento de los datos históricos y en algunas zonas cuadran muy bien (ver figura 17), para la mayoría de las zonas los valores obtenidos están por encima de los datos históricos. Pensamos que esto es debido a que no está contabilizado la pérdida de carbono debido a la biomasa tradicional ni tampoco los incendios forestales. Otro aspecto que está afectando los resultados es la constantes de residencia del carbono en la biomasa, creemos que introduce mucho error al considerarla como un parámetro global, todo esto indica que el modelo tiene que seguir refinándose. Los futuros trabajos que se harán será calcular mejor los parámetros como la fracción de humificación y el tiempo de residencia mas la inclusión de las pérdidas no contabilizadas en esta versión. Pese a todas estas fallas contamos con una herramienta que nos permite trabajar con la gestión de la biomasa forestal.

## VI | CONCLUSIONES

Se ha construido un modelo en Dinámica de Sistemas del ciclo de carbono en bosques que nos permite visualizar los flujos que intervienen en el mismo. El modelo del ciclo de carbono en los bosques pone en muestra de forma satisfactoria lo que ocurre actualmente con el carbono en el bosque y el aumento de emisiones del principal gas de efecto invernadero CO<sub>2</sub>. Muestra las interacciones presentes en el ciclo y como cada una de ellas afecta al stock. También nos indica no solo el efecto directo de reducir la cobertura forestal sobre el stock del carbono, sino que también el aumento de la temperatura están teniendo en la disminución del flujo de carbono que ingresa al stock.

La zona TROPICAL es donde mas se hace evidente las consecuencias de los cambios en el ciclo del carbono en el bosque, esta zona tiene la mayor productividad primaria neta en comparación que las otras zonas climáticas. Sin embargo su contenido neto en carbono esta disminuyendo. El análisis confirma que no se puede seguir extrayendo biomasa de esa zona de forma que sea sostenible y pone en evidencia la necesidad de proteger con mayor rigidez la superficie forestal de esta zona que es tan importante en la captación de carbono en la atmósfera.

El modelo debe continuar refinándose para mejorar el ajuste histórico, pese a ello muestra la tendencia de descenso que tiene el incremento neto del bosque. El análisis indica que el resto de las regiones están siguiendo el mismo camino que la zona TROPICAL (ver figura 16), el incremento neto no supera las 0.5 GtC/year (esto sin incluir en el modelo las pérdidas debido a la biomasa tradicional y las pérdidas generadas por los incendios forestales). En otras palabras el bosque no tiene la capacidad para extraer la madera que se esta extrayendo en estos momentos de forma sostenible, pese a las políticas que se han realizado con respecto a la forestación. El carbono ingresado por la forestación neta al stock en el bosque todavía no compensa la pérdida que se tiene debido a la deforestación reflejada en la pérdida de cobertura forestal y la extracción de biomasa. Si seguimos con este comportamiento, el bosque que es uno de los principales reservorios de carbono, perderá la facultad de ser un agente mitigador de los efectos del cambio climático.

## REFERENCIAS

- J. Goudriaan, P. Ketner. 1984. «A simulation study for the global carbon cycle , including man's impact on the biosphere.» 6:167-192.
- Parson, E.A., y K. Fisher-Vanden. 1995. *Searching for Integrated Assessment: A Preliminary Investigation of Methods, Models, and Projects in the Integrated Assessment of Global Climatic Change*. Visitado 28 de junio de 2021. <https://sedac.ciesin.columbia.edu/mva/iamcc.tg/insearchof.html>.
- Woodwell, George M. 1995. *Biotic feedbacks in the global climatic system : will the warming feed the warming?* 1995.<sup>a</sup> edición. 432. New York, United States: Oxford University Press. ISBN: 9780195086409, 9780195086409.
- Fiddaman, Thomas S. 1997. *Feedback Complexity in Integrated Climate-Economy Models*. Informe técnico.
- Paul, K I, P J Polglase, J G Nyakuengama y P K Khanna. 2002. «Change in soil carbon following afforestation». *Forest Ecology and Management* 168 (August 2001): 241-257.
- Vensim. 2002. *Vensim* ® *Ambiente de simulación Ventana* ®. Informe técnico.
- García, Juan Martín. 2003. *Teoría y ejercicios prácticos de dinámica de sistemas*. 287. ISBN: 9788460793045. <http://dinamica-de-sistemas.com/libros/sistemas.htm>.
- Penman, Jim, Michael Gytarsky, Taka Hiraishi, Thelma Krug, Dina Kruger, Riitta Pipatti, Leandro Buendia et al. 2003. *Intergovernmental Panel on Climate Change Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme Published by the Institute for Global Environmental Strategies (IGES) for the IPCC*. Informe técnico. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp>.
- Janzen, H. H. 2004. *Carbon cycling in earth systems - A soil science perspective*, 3. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2004.01.040>.
- Parmar, Y.S. 2004. *FAST-GROWING SPECIES PLANTATIONS — Myths & Realities AND THEIR EFFECT ON SPECIES DIVERSITY*. Informe técnico.
- Roxburgh, S H, S L Berry, T N Buckley, B Barnes y M L Roderick. 2005. *What is NPP? Inconsistent accounting of respiratory fluxes in the definition of net primary production*. Informe técnico.
- Peel, M. C., B. L. Finlayson y T. A. McMahon. 2007. «Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification». *Hydrology and Earth System Sciences* 11 (5): 1633-1644. ISSN: 16077938. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>.
- Bonan, Grodon B. 2008. «Forests and Climate Change: Forcings, Feedbacks, and the Climate Benefits of Forests». *SCIENCE* 320 (5882): 1444-1449. <https://doi.org/DOI:%2010.1126/science.1155121>.
- RCP Database*. 2009. Visitado 30 de junio de 2021. <https://tntcat.iiasa.ac.at/RcpDb/dsd?Action=htmlpage&page=welcme>.
- Paquette, Alain M., Christian. 2010. «The role of plantations in managing the world's forests in the Anthropocene». *The Ecological Society of America* 8(1):27-34. <https://doi.org/10.1890/080116>. [www.projettriede.ca](http://www.projettriede.ca).
- Sabine, C, G Bala, L Bopp, V Brovkin, J Canadell, A Chhabra, R DeFries et al. 2013. *Carbon and Other Biogeochemical Cycles. In: Cli-mate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Coordinating Lead Authors: Contributing Authors*. Informe técnico.
- Ferreras, Noelia. 2017. «Análisis comparativo de modelos de cambio climático desarrollados en Dinámica de Sistemas», 106.
- Fiddaman, Tom, Lori S Siegel, Elizabeth Sawin, Andrew P Jones y John Sterman. 2017. «C-ROADS SIMULATOR REFERENCE GUIDE March 2017 Ventana Systems Climate Interactive Massachusetts Institute of Technology C-ROADS simulator Model Reference Guide Table of Contents 4 . Contributions to Climate Change», número March.
- Retana, Dolors Armenteras & Josep María Espelta & Nelly Rodríguez & Javier. 2017. «Forests and Climate Change: Forcings, Feedbacks, and the Climate Benefits of Forests». *Global Environmental Change*, 139-147. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.09.002>.
- IPCC. 2018. «Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change.», <https://doi.org/10.4060/ca8753en>.
- Braakhekke, Maarten C., Jonathan C. Doelman, Peter Baas, Christoph Müller, Sibyll Schaphoff, Elke Stehfest y Detlef P. van Vuuren. 2019. «Modeling forest plantations for carbon uptake with the LPJmL dynamic global vegetation model». *Earth System Dynamics* 10 (4): 617-630. ISSN: 2190-4987. <https://doi.org/10.5194/esd-10-617-2019>. <https://esd.copernicus.org/articles/10/617/2019/>.

Masson-Delmotte, Valérie, Panmao Zhai, Hans-Otto Pörtner, Debra Roberts, Jim Skea, Priyadarshi R Shukla, Anna Pirani et al. 2019. *Global warming of 1.5°C An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* Edited by Science Officer Science Assistant Graphics Officer Working Group I Technical Support Unit. Informe técnico. [www.environmentalgraphiti.org](http://www.environmentalgraphiti.org).

NOAA ESRL. 2019. «Carbon Cycle». Visitado 13 de julio de 2021. <https://gml.noaa.gov/ccgg/gallery/figures/index.html>.

Capellán-Pérez, Iñigo, Ignacio de Blas, Jaime Nieto, Carlos de Castro, Luis Javier Miguel, Scar Carpintero, Margarita Mediavilla et al. 2020. «MEDEAS: a new modeling framework integrating global biophysical and socioeconomic constraint», <https://doi.org/10.1039/c9ee02627d>. [www.medeas.eu/model/medeas-model](http://www.medeas.eu/model/medeas-model).

FAO. 2020. «Global Forest Resources Assessment 2020 Key findings.» <https://doi.org/10.4060/ca8753en>.

FRA. 2020. *Global Forest Resources Assessment*. Visitado 11 de julio de 2021. <https://fra-data.fao.org/WO/fra2020/home/>.

Pastor, Amandine V, Margarita Mediavilla, Gonzalo Parrado-hernando y Luis J Miguel. 2020. «Land use module», número August, <https://www.researchgate.net/publication/344442409>.

FAO. 2021. *FAOSTAT*. Visitado 30 de junio de 2021. <http://www.fao.org/faostat/es/#home>.

Fiddaman, Tom, Lori S Siegel, Elizabeth Sawin, Andrew P Jones y John Sterman. 2021. *C-ROADS SIMULATOR REFERENCE GUIDE*. Informe técnico.

FRA. Visitado 17 de mayo de 2021. <https://fra-data.fao.org/AF/fra2020/forestCharacteristics/>.

LOCOMOTION / H2020. Visitado 28 de junio de 2021. <https://www.locomotion-h2020.eu/>.

NOAA. *ESRL Global Monitoring Laboratory*. Visitado 30 de junio de 2021. <https://gml.noaa.gov/>.

NOAA ESRL, Global Monitoring Laboratory. Sin fecha. «NOAA ESRL Global Monitoring Laboratory. The Global Monitoring Laboratory conducts research on greenhouse gas and carbon cycle feedbacks, changes in clouds, aerosols, and surface radiation, and recovery of stratospheric ozone.», visitado 30 de junio de 2021. <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>.

# Appendices

## A | MATRICES DE TRANSICIÓN

RtoZ FOREST (primary+managed+plantations)								
REGIONS\ZONES→	TROPICAL	WARM	ARID_HOT	ARID_COLD	TEMPERATE	WINTER_SNOW	SNOW	POLAR
EU27	0.000	0.114	0.000	0.002	0.400	0.160	0.317	0.007
UK	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000
CHINA	0.337	0.272	0.000	0.008	0.005	0.222	0.138	0.018
EASOC	0.631	0.129	0.027	0.034	0.097	0.075	0.006	0.000
INDIA	0.858	0.044	0.047	0.002	0.020	0.014	0.010	0.005
LATAM	0.884	0.045	0.016	0.001	0.045	0.000	0.000	0.008
RUSSIA	0.000	0.001	0.000	0.001	0.001	0.166	0.797	0.033
USMCA	0.054	0.177	0.014	0.026	0.028	0.215	0.468	0.019
LROW	0.855	0.019	0.055	0.002	0.027	0.023	0.018	0.002

Tabla 4: Matriz de transición de región locomotion a zona Köppen

TREE MATRIX(primary+managed+plantations)								
TREE_TYPE_↓   ZONE→	TROPICAL	WARM	ARID_HOT	ARID_COLD	TEMPERATE	WINTER_SNOW	SNOW	POLAR
Tropical coniferous	0.461	0.132	0.02	0.014	0.05	0.124	0.187	0.011
Tropical forest non coniferous	0.757	0.061	0.04	0.008	0.043	0.045	0.043	0.005
Temperate coniferous	0.124	0.143	0.008	0.012	0.159	0.177	0.355	0.014
Temperate non coniferous	0.19	0.155	0.009	0.01	0.133	0.177	0.312	0.014
Boreal coniferous	0.049	0.112	0.007	0.012	0.127	0.182	0.492	0.018
Boreal non coniferous	0.054	0.096	0.007	0.013	0.059	0.183	0.566	0.023

Tabla 5: Matriz de transición de tipo de árbol a zona Köppen.

TREE MATRIX(primary+managed+plantations)								
FOREST_TYPE ↓   ZONE→	TROPICAL	WARM	ARID_HOT	ARID_COLD	TEMPERATE	WINTER_SNOW	SNOW	POLAR
TROPICAL	0.823	0.566	0.798	0.562	0.544	0.332	0.178	0.284
TEMPERATE	0.137	0.307	0.16	0.252	0.35	0.361	0.371	0.331
BOREAL	0.026	0.119	0.047	0.148	0.057	0.325	0.48	0.407

Tabla 6: Matriz de transición de tipo de bosque a zona Köppen.

## B | DATOS HISTÓRICOS DEL STOCK DEL CARBONO EN LOS BOSQUES

Carbono en los bosques (GtC)				
ZONES_I ↓   YEAR_I →	1990	2000	2010	2015
TROPICAL	139.42	139.17	135.18	134.05
WARM	13.7	14.68	14.97	15.29
ARID_HOT	6.21	6.22	6.07	6
ARID_COLD	1.61	1.82	1.84	1.85
TEMPERATE	9.82	10.49	10.9	11.16
WINTER_SNOW	16.41	16.77	17.5	17.96
SNOW	42.7	41.1	43.2	44.3
POLAR	2.43	2.34	2.4	2.45
TOTAL	232.3	232.59	232.06	233.06

Tabla 7: Evolución histórica del carbono en los bosques.

C | CONSTANTES DEL MODELO

Constante	Unidad	Valor	Fuente
Basic wood density coniferous	t m.s./m <sup>3</sup>	0.5	(Penman et al. 2003)
Basic wood density non coniferous	t m.s./m <sup>3</sup>	0.7	
FEB temperate coniferous	Dmnl	1.3	
FEB boreal coniferous	Dmnl	1.4	
FEB tropical coniferous	Dmnl	1.3	
FEB temperate non coniferous	Dmnl	1.4	
FEB boreal non coniferous	Dmnl	1.3	
FEB tropical non coniferous	Dmnl	3.4	
$f_{bl}$ temperate	Dmnl	0.1	
$f_{bl}$ boreal	Dmnl	0.1	
$f_{bl}$ left tropical	Dmnl	0.3	
CF	tC	0.5	
CO2 sat coeff	Dmnl	-0.8	(Fiddaman et al. 2021)
$\beta_b$	Dmnl	0.4	
Biomass Res time	year	10.6	
$HF_{tropical}$	Dmnl	0.4	(J. Goudriaan 1984)
$HF_{temperatel}$	Dmnl	0.6	
$HF_{boreal}$	Dmnl	0.6	

Tabla 8: Valores de las constantes del modelo del ciclo de carbono en los bosques.

## D | ENTORNO DE TRABAJO DE VENSIM

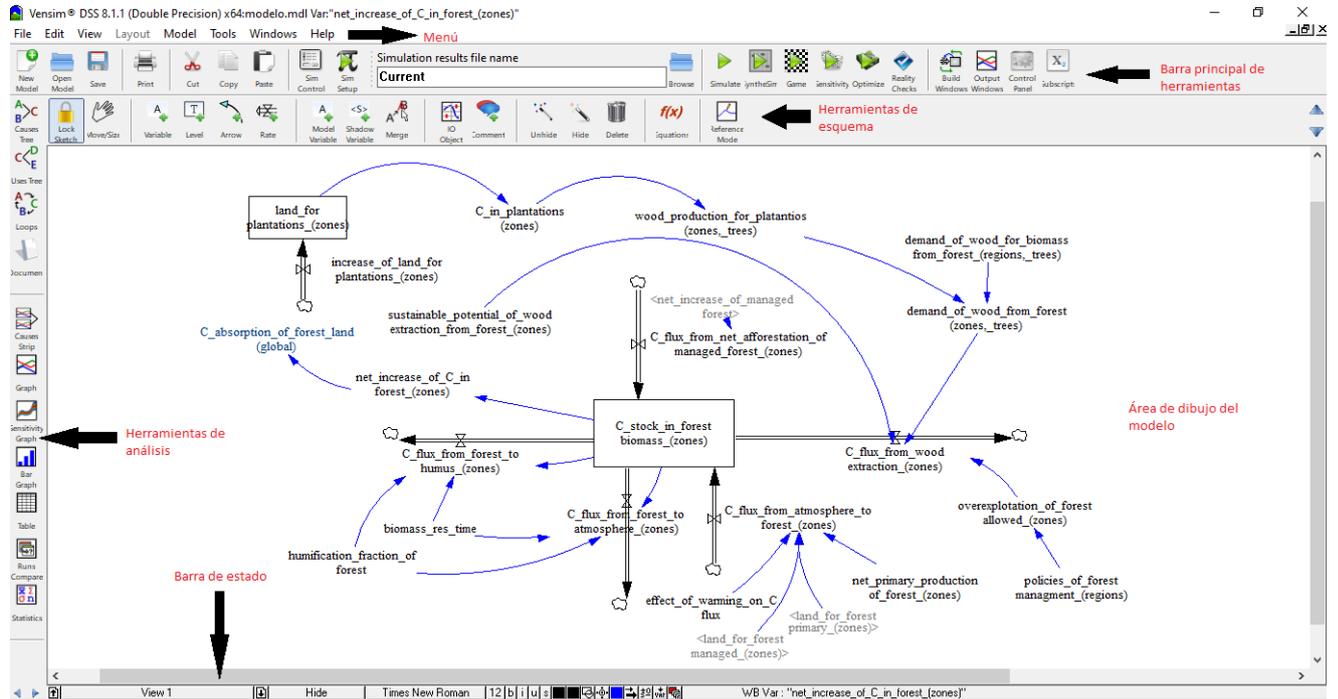


Figura 18: Interfaz del usuario en Vensim.

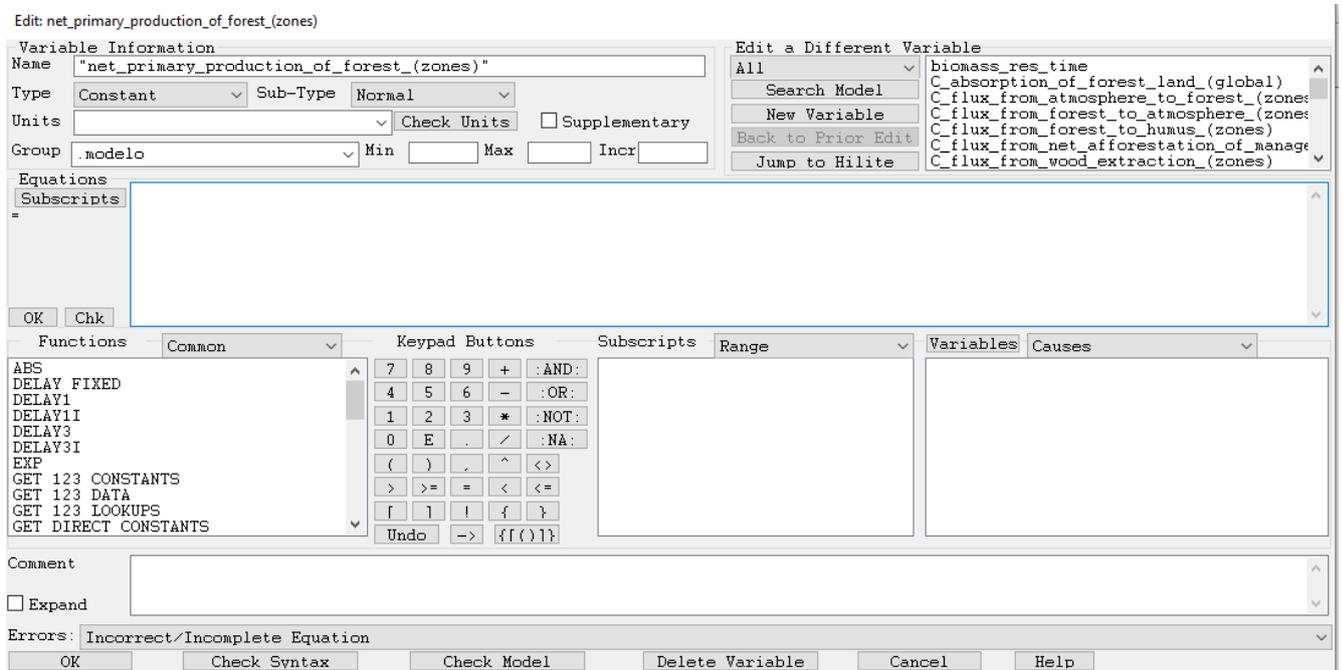


Figura 19: Editor de ecuaciones en Vensim.