



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería en Electrónica Industrial y Automática

**MODELADO DEL POTENCIAL SOSTENIBLE DE
LOS BOSQUES ESPAÑOLES MEDIANTE
DINÁMICA DE SISTEMAS**

Autora:

Mónica Aparicio Montila

Tutora:

**Margarita Mediavilla Pascual
Dpto. Ingeniería de Sistemas y
Automática**

Valladolid, julio 2023

RESUMEN:

El presente Trabajo Fin de Grado (TFG) tiene como objetivo el estudio mediante dinámica de sistemas de la evolución de los bosques en España, así como el desarrollo de un modelo de simulación que permita observar los futuros cambios que se pueden dar sobre el volumen de masa forestal existente en España. Además, se pretende simular distintos escenarios futuros para evaluar los usos energéticos sostenibles que los ecosistemas forestales españoles pueden albergar.

El trabajo se enmarca en el proyecto MODESLOW desarrollado por el Grupo de Energía, Economía y Dinámica de Sistemas (GEEDS) de la Universidad de Valladolid cuyo objetivo es el de evaluar escenarios de transición energética hacia una economía baja en carbono dentro de nuestro país.

Palabras clave: modelo, Dinámica de Sistemas, MODESLOW, bosques, biomasa.

ABSTRACT:

The objective of the present End-Degree-Project is to study the evolution of forests in Spain through System Dynamics, as well as the development of a simulation model that allows observing future changes in the volume of forest mass in Spain. In addition, it tends to simulate different future scenarios to evaluate the sustainable energy uses that Spanish forest ecosystems can accommodate.

This work is part of the MODESLOW project developed by the Energy, Economic and System Dynamics Group (GEEDS) at the University of Valladolid, which aims to assess scenarios for energy transition towards a low-carbon economy within our country.

Key words: model, System Dynamics, MODESLOW, forests, biomass.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	ANTECEDENTES Y CONTEXTO	1
1.2	MOTIVACIÓN	4
1.3	OBJETIVOS	5
1.4	CONTENIDO DE LA MEMORIA	5
2.	MODELOS PARA EL ESTUDIO DE LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA	8
2.1	INTRODUCCIÓN	8
2.2	MODELOS DE EVALUACIÓN INTEGRADA (IAM).....	8
2.2.1.	Clasificación de los IAMs.....	8
2.3	MODESLOW	9
2.3.1	Introducción	9
2.3.2	Descripción	11
3.	DINÁMICA DE SISTEMAS	13
3.1.	INTRODUCCIÓN	13
3.2.	ELEMENTOS PRINCIPALES.....	13
3.2.1.	Diagrama causal.....	13
3.2.2.	Diagrama de flujo o de Forrester.....	15
3.3.	EL PROCESO DE MODELADO	17
3.4.	PROGRAMA EMPLEADO.....	18
3.4.1.	Características principales.....	18
4.	RECURSOS RENOVABLES EN ESPAÑA.....	22
4.1	GENERACIÓN RENOVABLE EN ESPAÑA.....	22
4.2	BIOMASA.....	23
4.2.1	Usos energéticos de la biomasa.....	24
4.3	ESTADO DE LOS BOSQUES ESPAÑOLES	28
5.	METODOLOGÍA.....	31
5.1	OBTENCIÓN DE DATOS	31
5.2	DESARROLLO DEL MODELO.....	33
5.2.1	Estructura general	33
5.2.2	Escenarios.....	45
6.	RESULTADOS Y CONCLUSIONES	53

6.1	RESULTADOS.....	53
6.1.1	Resultados escenario base (SC0)	53
6.1.2	Resultados escenario SC1, tendencias de futuro.....	55
6.1.3	Resultados escenario SC2, consumos calefactorios.....	61
6.2	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	67
6.3	CONCLUSIONES DEL TRABAJO.....	69
6.4	LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO.....	72
7.	REFERENCIAS	73
8.	ANEXOS	76

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Estado actual de las variables de control para siete de los nueve límites planetarios.	1
Figura 1.2. Evolución histórica (1960-2021) de la producción de madera en rollo. .	3
Figura 2.1. Representación gráfica de los módulos que forman en proyecto	11
Figura 3.1. Relación positiva.	14
Figura 3.2. Relación negativa.	14
Figura 3.3. Bucle de realimentación causal.	14
Figura 3.4. Comportamiento del sistema a lo largo del tiempo.	15
Figura 3.5. Elementos principales en el diagrama de flujo o de Forrester.	16
Figura 3.6. Interfaz de usuario Vensim DSS.	18
Figura 3.7. Editor de ecuaciones de Vensim.	19
Figura 4.1. Estructura de la generación por tecnologías en 2022.	22
Figura 4.2. Clasificación de los tipos de biomasa.	23
Figura 4.3. Generación de energía eléctrica a partir de biomasa, biogás, hidráulica marina y otras renovables.	25
Figura 4.4. Consumo de biomasa en España.	26
Figura 4.5. Estructura del consumo de energía en calefacción por fuentes.	26
Figura 4.6. Consumo de biomasa en el sector industrial español.	27
Figura 4.7. Mapa forestal español de los usos del suelo.	28
Figura 4.8. Mapa forestal español, distribución por tipo de bosque.	29
Figura 5.1. Esquema modelo crecimiento de stock forestal.	34
Figura 5.2. Modelo inicial de stocks de madera.	36
Figura 5.3. Evolución del stock forestal hasta 2020, primera aproximación del modelo.	37
Figura 5.4. Evolución del stock forestal hasta 2100, primera aproximación del modelo.	37
Figura 5.5. Evolución del volumen de madera por unidad de área en España.	39
Figura 5.6. Modelado del módulo stock de forestal.	41
Figura 5.7. Modelado del módulo stock de carbono y biomasa.	42
Figura 5.8. Absorciones de CO ₂ , comparación datos originales y datos simulados.	43
Figura 5.9. Evolución histórica de las extracciones, importaciones, exportaciones y consumo de madera.	46
Figura 5.10. Modelado escenario SC1: TENDENCIAS DE FUTURO.	47
Figura 5.11. Evolución de la extracción de madera bajo el escenario SC1 (2000-2080).	48
Figura 5.12. Implementación escenario SC2 CONSUMOS CALEFACTORIOS.	50
Figura 5.13. Modelado escenario SC2 CONSUMO CALEFACTORIO.	51
Figura 5.14. Evolución de la extracción de madera bajo el escenario SC2 (2000-2080).	52
Figura 6.1. Evolución volumen forestal total, escenario SC0, 2000-2080.	53
Figura 6.2. Evolución incremento del stock anual, escenario SC0, 2000-2080.	53

Figura 6.3. Evolución madera total disponible, escenario SC0, 2000-2080.....	54
Figura 6.4. Evolución stock carbono forestal total, escenario SC0, 2000-2080.	54
Figura 6.5. Evolución absorciones de CO ₂ , escenario SC0, 2000-2080.	54
Figura 6.6. Evolución stock forestal total, escenario SC1, 2000-2080.	56
Figura 6.7. Evolución incremento del stock anual, escenario SC1, 2000-2080.....	57
Figura 6.8. Evolución madera total disponible, escenario SC1, 2000-2080.....	57
Figura 6.9. Evolución stock carbono forestal total, escenario SC1, 2000-2080.	57
Figura 6.10. Evolución absorciones de CO ₂ , escenario SC1, 2000-2080.	58
Figura 6.11. Evolución stock forestal total, escenario SC1, 2000-2080.....	58
Figura 6.12. Evolución incremento del stock anual, escenario SC1, 2000-2080. ..	59
Figura 6.13. Evolución stock carbono forestal total, escenario SC1, 2000-2080...	59
Figura 6.14. Evolución madera total disponible, escenario SC1, 2000-2080.	59
Figura 6.15. Evolución absorciones de CO ₂ , escenario SC1, 2000-2080.	60
Figura 6.16. Evolución de la extracción fijada (2000-2080).	61
Figura 6.17. Evolución de la extracción bajo las condiciones contempladas en el escenario SC2 (2000-2080).....	61
Figura 6.18. Evolución stock forestal total, escenario SC2, 2000-2080.....	62
Figura 6.19. Evolución incremento del stock anual, escenario SC2, 2000-2080. ..	63
Figura 6.20. Evolución madera total disponible, escenario SC2, 2000-2080.	63
Figura 6.21. Evolución stock carbono forestal total, escenario SC2, 2000-2080...	63
Figura 6.22. Evolución absorciones de CO ₂ , escenario SC2, 2000-2080.	64
Figura 6.23. Evolución stock forestal total, escenario SC2, 2000-2080.....	64
Figura 6.24. Evolución incremento del stock anual, escenario SC2, 2000-2080. ..	65
Figura 6.25. Evolución madera total disponible, escenario SC2, 2000-2080.	65
Figura 6.26. Evolución stock carbono forestal total, escenario SC2, 2000-2080...	65
Figura 6.27. Evolución absorciones de CO ₂ , escenario SC2, 2000-2080.	66

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1. Ejemplos de plantas de biomasa en España.	24
Tabla 5.1. Ajuste calibración del stock, comparación de ecuación histórica y simulada.....	36
Tabla 5.2. Casos de estudio sobre el escenario base, SC0	45
Tabla 5.3. Casos escenario SC1, evaluación tendencias futuras.....	47
Tabla 5.4 Casos escenario SC2, evaluación consumos calefactorios	51
Tabla 6.1. Resumen escenario de evaluación tendencias futuras (SC1)	56
Tabla 6.2. Resumen condiciones a simular en el escenario SC2, consumos calefactorios.....	62

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 3.1. Fórmula matemática del stock.....	16
Ecuación 3.2. Fórmula matemática de la salida del modelo representado	16
Ecuación 3.3. Importación de datos procedentes de Excel	20
Ecuación 5.1. Tasa de crecimiento anual de los stocks forestales.....	35
Ecuación 5.2. Incremento anual de los stocks forestales.....	35
Ecuación 5.3. Tasa de crecimiento anual de bosques	38
Ecuación 5.4. Fórmula cambios de stock forestal	40
Ecuación 5.5. Cálculo de la absorciones/emisiones de CO2.....	42

GLOSARIO DE TÉRMINOS Y ABREVIATURAS

AEMA – Agencia Europea del Medioambiente

BEF – Factor de expansión de la biomasa

CDB – Convenio sobre la Diversidad Biológica

CMNUCC – Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático

COP – Conferencia de las partes

DS – Dinámica de Sistemas

EROI – Tasa de Retorno Energético (Energy Return on Investment)

FAO – Organización para de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura

GEI – Gases de Efecto Invernadero

IAM – Modelos de Evaluación Integrada (Integrated Assessment Models)

IDAE – Instituto para la Diversificación y ahorro energético

IFN – Informe Forestal Nacional

IEA – Agencia Internacional de la Energía

IOA – Análisis de entradas y salidas (Input-Output analysis)

IPCC – Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático

MITECO – Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico

MODESLOW – Modelización y simulación de escenarios de transición energética hacia una economía baja en carbono.

PNIEC – Plan Nacional Integrado de Energía y Clima

1. INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES Y CONTEXTO

En 2009, fue publicado un estudio científico liderado por el sueco Johan Rockström del Centro de Resiliencia de Estocolmo donde se definieron nueve límites determinantes para mantener la estabilidad de la tierra. Conforman estos límites: la destrucción de la capa de ozono, el cambio climático, la destrucción de la biosfera, la contaminación química, la acidificación de los océanos, los ciclos del fósforo y nitrógeno, el consumo de agua dulce, los cambios en el uso del suelo y los aerosoles atmosféricos. (Rockström, Noone, Steffen, & Persson, 2009)

Además de estos nueve límites planetarios, incluyeron también una serie de medidas específicas para siete de ellos que delimitan una zona segura de actuación y una zona de riesgo, siendo esta última cada vez más peligrosa. Según informan, en el caso de que no sobrepasar el umbral de una de estas fronteras, la humanidad podrá evolucionar y prosperar en futuras generaciones. En caso contrario, podríamos sufrir un colapso como consecuencia de haber provocado situaciones ambientales irreversibles en el planeta Tierra. (Matteucci, 2018)

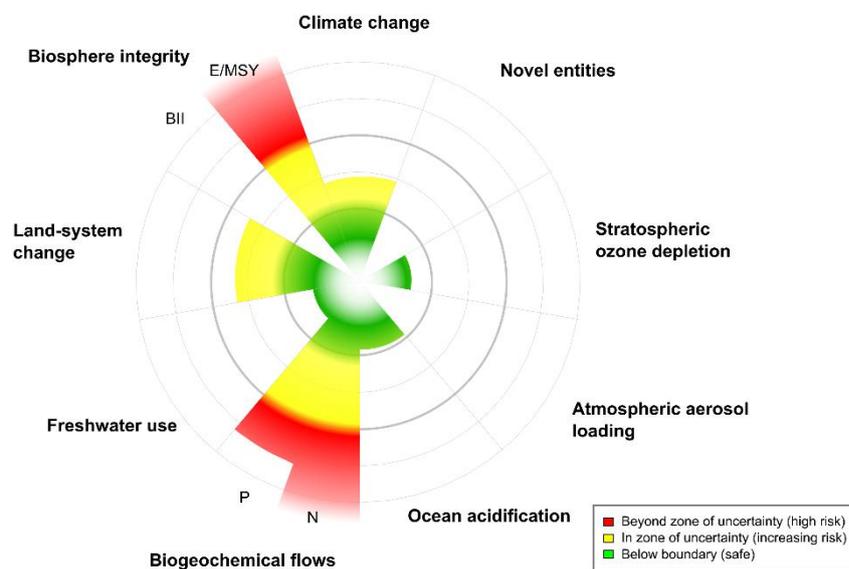


Figura 1.1. Estado actual de las variables de control para siete de los nueve límites planetarios.
Fuente: (Steffen, 2015)

Los autores alertan de que tres de estos indicadores ya han sido traspasados ya que se encuentran en zonas con un riesgo importante. Sin embargo, estos tres umbrales no forman parte de procesos aislados, sino que, su comportamiento depende las interacciones que se dan a lo largo del desarrollo del sistema terrestre. Uno de estos límites es la pérdida de biodiversidad base en el desarrollo de la vida de numerosas especies y potencial fundamental en la lucha contra el cambio climático.

El Convenio sobre la Diversidad Biológica (CDB) define la biodiversidad como la variabilidad de organismos vivos de los ecosistemas de cualquier fuente (terrestres, marinos o acuáticos).

Una de las causas más importantes en la pérdida de biodiversidad se debe a la deforestación de los bosques. La deforestación consiste en la conversión de los bosques en otro tipo de uso de la tierra que puede ser provocado o no por la actividad humana. Los bosques albergan alrededor del 80% de la biodiversidad terrestre mundial lo que provoca la consecuente pérdida de las especies que participan en las funciones biológicas y ecológicas del bosque. (FAO, Evaluación de los recursos forestales mundiales. Informe principal, 2020)

Los ecosistemas forestales constituyen un papel muy importante en la mitigación del cambio climático gracias al proceso fotosintético por el cual capturan el CO₂ que absorben de la atmósfera liberando oxígeno necesario para las necesidades biológicas de todos los seres vivos. Detener la deforestación y conservar los bosques podría evitar la emisión de 3,6 +/- 2 gigatoneladas de equivalente de dióxido de carbono (GtCO₂e) en los próximos 30 años con el fin de mantener la temperatura del planeta por debajo de 1,5°C. (FAO, El estado de los bosques del mundo, 2022)

Además, su importancia va más allá puesto que muchas sociedades dependen de sus productos tanto maderables como no maderables para su desarrollo.

Según (FAO, El estado de los bosques del mundo, 2022) una tercera parte de la población mundial depende la madera para cocinar y entre 3500 millones y 7600 millones de personas recurren a los productos forestales no maderables como vía de subsistencia. En muchas economías de países desarrollados los servicios forestales representan un porcentaje importante en el PIB.

Sin embargo, a pesar del conocimiento sobre la importancia de las masas forestales en el desarrollo sostenible, las estadísticas a nivel mundial reflejan una tendencia creciente hacia la producción de madera como medio para satisfacer la demanda energética.

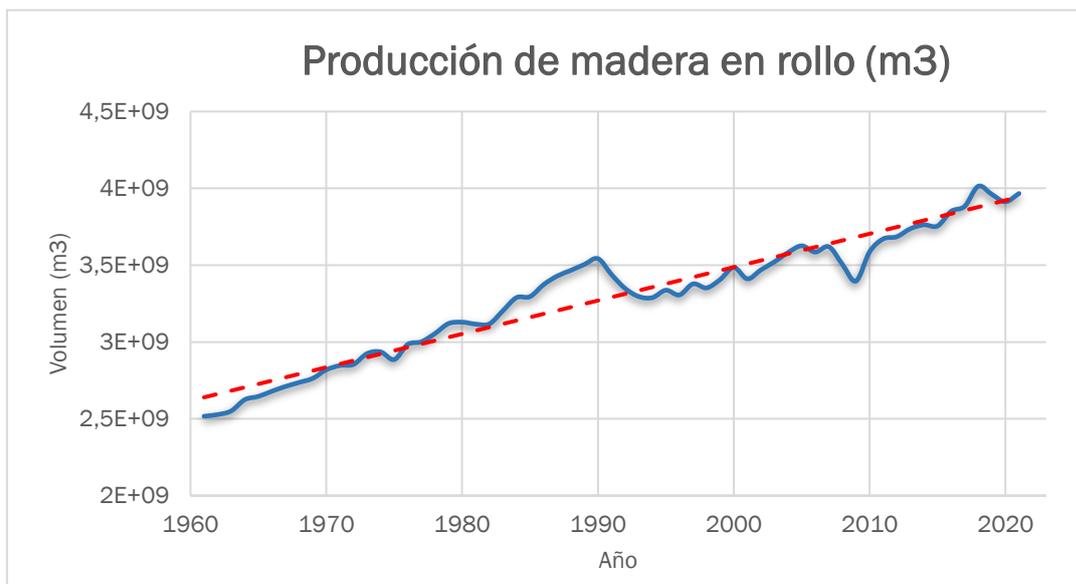


Figura 1.2. Evolución histórica (1960-2021) de la producción de madera en rollo.

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de FAO.

Esta tendencia creciente en el tiempo supone una amenaza sobre los sistemas forestales a pesar de ser un componente principal de los recursos naturales renovables.

En este contexto, son muchas las instituciones y organizaciones mundiales que en las últimas décadas han llevado a cabo una serie de medidas con el fin de revertir esta situación. Una de estas medidas fue tomada en el Pacto de Glasgow por el Clima celebrado en la COP26 de Glasgow en 2021 donde 141 países firmaron *la Glasgow Leaders Declaration on Forest and Land Use*, con el compromiso de trabajar juntos para cumplir unos objetivos en materia de deforestación y cambios en el uso de la tierra. Posteriormente, también en la COP27 de Egipto se promovieron estos objetivos destinando para ello financiación económica. (United nations & UK Government, 2021)

1.2. MOTIVACIÓN

El presente trabajo surge tras una propuesta dentro del GEEDS, con el fin de poder cuantificar los cambios que se pueden dar sobre el ecosistema forestal de nuestro país. De esta manera podremos evaluar distintos escenarios y políticas que permiten actuar sobre posibles problemas que se pueden dar en los próximos años en materia de biomasa y recursos forestales como fuente de energía.

La biomasa y el contenido de carbono son indicadores esenciales para el seguimiento de los ecosistemas forestales y su papel dentro del cambio climático. De esta forma, las estimaciones sobre el contenido de biomasa son esenciales para evaluar el balance de carbono y resultan ser un indicador a tener en cuenta por los países que llevan a cabo políticas de mitigación en materia de actuación climática.

España, forma parte de acuerdos internacionales como la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) y políticas nacionales como el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) por lo que está obligada a realizar estimaciones periódicas de las emisiones y absorciones de CO₂ para evaluar el comportamiento de los bosques españoles dentro del ciclo forestal.

Su importancia va más allá, ya que en los últimos años la biomasa ha adquirido una relevancia mayor como consecuencia de su capacidad energética como fuente renovable. A diferencia de otros recursos renovables como la energía eólica o solar, la biomasa no depende de las condiciones climáticas del momento y su disponibilidad no está sujeta a variaciones estacionales o diarias.

Además, presenta una ventaja muy destacada frente al resto de energías renovables y es su capacidad de almacenamiento y flexibilidad. Estas propiedades resultan muy interesantes en periodos de alta demanda energética o cuando las condiciones meteorológicas no son favorables para la producción de energía renovable a partir del viento y el sol.

Son estos los motivos principales que me llevan a realizar este trabajo, además de la posibilidad de poder adaptar mis conocimientos en modelado para intentar estimar la evolución de los recursos de mi país en un futuro.

1.3. OBJETIVOS

En primer lugar, es importante mencionar los objetivos asociados a este TFG que se han perseguido durante el tiempo en que se ha llevado a cabo este trabajo. Algunos de estos objetivos son resultado del proyecto de investigación al cual se vincula.

A continuación, se detallan los principales objetivos:

- Realizar una investigación en fuentes bibliográficas para obtener información sobre la situación forestal en el mundo y a nivel nacional. El objetivo principal se basa en recopilar datos sobre las tendencias históricas y los posibles cambios que se estén dando en los últimos años y que marcarán una posible evolución en el futuro.
- Obtención de datos que permitan cuantificar los cambios e identificación de variables exógenas y endógenas que afectan al crecimiento de la biomasa en los bosques españoles.
- Desarrollo de un modelo de simulación en Vensim mediante dinámica de sistemas para estudiar la gestión de los bosques y para su posterior integración dentro del proyecto MODESLOW.
- Análisis de los resultados y desarrollo de posibles escenarios que permitan estudiar políticas de uso de la biomasa forestal como fuente de energía.

1.4. CONTENIDO DE LA MEMORIA

La memoria se estructura en los siguientes capítulos.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se describe en líneas generales el contexto y la motivación para la realización de este trabajo, así como los objetivos que se pretenden lograr.

CAPÍTULO 2: MODELOS PARA EL ESTUDIO DE LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA

En este capítulo se introducen los modelos que se emplean para estudiar los cambios vinculados a la transición energética. El capítulo se centra en los Modelos de Evaluación Integrados (IAM) por su metodología científica y propiedades. También

se realiza una pequeña introducción a la metodología de 'MODESLOW', proyecto base en el cual se enmarca este trabajo.

CAPÍTULO 3: DINÁMICA DE SISTEMAS

En este capítulo, se explican los conceptos teóricos principales de la dinámica de sistemas, así como el software de trabajo empleado en el proyecto, Vensim.

CAPÍTULO 4: DESARROLLO RENOVABLE EN ESPAÑA

En este capítulo, se realiza un pequeño análisis de la situación renovable en España, centrando el estudio en la biomasa. Se recogen los usos energéticos de este recurso renovable dentro de nuestro país.

CAPÍTULO 5: METODOLOGÍA

En este capítulo, se detalla la obtención de datos e informes para realizar el trabajo. Además, se desarrolla el modelo realizado en Vensim DSS, explicando las variables incluidas más importantes. Por último, se detallan los escenarios incluidos para evaluar el modelo.

CAPÍTULO 6: RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos en las distintas simulaciones. Se exponen las principales ideas y conclusiones técnicas derivadas del trabajo realizado, así como comentarios personales y posibles líneas futuras de trabajo.

CAPÍTULO 7: REFERENCIAS

Se detalla una lista con los trabajos citados y las referencias bibliográficas empleadas en este trabajo.

CAPÍTULO 8: ANEXOS

Se incluye una breve descripción del contenido de la carpeta de anexos donde se incluye el documento Excel con los datos del modelo y el propio modelo en formato con extensión *.mdl*.

2. MODELOS PARA EL ESTUDIO DE LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA

2.1 INTRODUCCIÓN

La preocupación actual por el cambio climático y su vínculo con la necesidad de llevar a cabo una transición energética está cada vez más presente en nuestra sociedad. Por ello, científicos, líderes políticos y gubernamentales están centrando sus esfuerzos en intentar abordar este gran desafío mundial. En esta línea y para ayudar en la toma de decisiones, expertos de diversas disciplinas, desde física y química hasta economía, ingeniería o sociología, colaboran para desarrollar Modelos de Evaluación Integrada (IAM).

2.2 MODELOS DE EVALUACIÓN INTEGRADA (IAM)

Un IAM es una herramienta de simulación numérica diseñada para comprender las interrelaciones entre una amplia gama de variables tecnológicas, económicas, ambientales y sociales que caracterizan el desarrollo de nuestra sociedad. Estos modelos, basados en datos históricos, permiten simular escenarios futuros con diferentes opciones de acción para guiar la toma de decisiones.

En los últimos años, se han aplicado especialmente en la búsqueda de soluciones alternativas al cambio climático y a la transición energética. Para abordar estos problemas complejos, un IAM requiere la integración de conocimientos de diversas áreas, como climatología, economía, ingeniería, sociología y política, con el objetivo de representar las interacciones entre los seres humanos y el medio ambiente. (de Blas, Miguel González, & de Castro Carranza, 2021)

2.2.1. Clasificación de los IAMs

La complejidad de representar las relaciones entre la energía, la economía y el medio ambiente, junto con la incertidumbre en las suposiciones realizadas en los modelos, conduce a la existencia de enfoques muy diferentes en el desarrollo y la estructura de los IAM.

De esta forma existen diversas clasificaciones de los IAM atendiendo a la diversidad de enfoques.

Una de las clasificaciones más extendidas en la literatura es la que realiza Weyant en su contribución al estado de los IAM (Weyant, 2017). En primer lugar, define un tipo de modelo centrado en el análisis de los costes y beneficios (**benefit-cost analysis, BCA IAMs**). Este tipo de modelos simples, proporcionan una representación muy agregada de los costes de mitigación del cambio climático. Generalmente utilizan ecuaciones simplificadas y se han utilizado para calcular la trayectoria óptima de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI) y los precios correspondientes a cobrar por estas emisiones. Sin embargo, estos modelos no muestran las relaciones detalladas entre la energía, la economía y el medio ambiente.

Por otro lado, Weyant define otro tipo de modelos, conocidos como modelos de procesos detallados (**detailed process, DP IAMs**). Este tipo de modelos son más complejos y buscan proporcionar proyecciones más detalladas de los efectos del cambio climático utilizando cuestiones económicas y proyecciones de efectos físicos, como la reducción de los recursos energéticos, las tierras inundadas por el aumento del nivel del mar, etc. Esta visión de los IAMs como modelos más complejos es la que mejor se adapta a una visión multidisciplinaria de las relaciones entre el comportamiento humano y sus efectos en el medio ambiente.

Es importante mencionar que cada uno de los criterios de modelización adoptados tienen sus propias fortalezas y debilidades, por lo que es difícil encontrar un modelo integrado capaz de buscar la mejor solución para todos los problemas. En esta línea, resulta interesante el estudio hecho por (Capellán-Pérez, 2016) quien propuso los siguientes criterios: el método de implementación de políticas, el nivel de complejidad de los sistemas, el nivel de integración entre subsistemas (retroalimentaciones), el tratamiento de la incertidumbre, el equilibrio económico y el tratamiento de la energía en la economía.

2.3 MODESLOW

El presente TFG está desarrollado dentro del marco de un proyecto que se basa en la modelización y simulación de escenarios de transición energética hacia una economía baja en carbono conocido como 'MODESLOW'.

2.3.1 Introducción

Impulsados como consecuencia de los informes realizados por el IPCC, muchos organismos internacionales han hecho un llamamiento a los países para que lleven a cabo una transición energética hacia 2050 basada en una economía con bajas emisiones de carbono.

En 2011, la Unión Europea se comprometió a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) entre un 80 y 95 por ciento los niveles de la década de 1990 hacia el 2050. Según el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, las emisiones de GEI nacionales en 2015 fueron de 335,6 millones de toneladas de CO₂ equivalente. En 2019, las emisiones de GEI alcanzaron valores alrededor de 324 millones de toneladas de CO₂ equivalente. Estos datos reflejan la disminución gradual de las emisiones que, entre 2005 y 2019, se han visto reducidas en un 19%. Además, según las estimaciones de la Agencia Europea del Medio Ambiente (AEMA), las emisiones de GEI de los países miembros de la UE (UE-27) fueron un 31% inferiores a las de 1990.

Sin embargo, muchos estos objetivos en materia de transición energética promovidos por diversos organismos sugieren ser demasiado ambicioso ya que, si se aplica la reducción media de la UE, España debería emitir entre 14 y 57,2 millones de toneladas de CO₂ equivalente en 2050. Se trata por tanto de una reducción bastante importante y que plantea importantes desafíos tanto tecnológicos como socioeconómicos.

En esta línea y como medio para afrontar estos desafíos se inicia el proyecto MODESLOW. Este proyecto se basa en el desarrollo de un modelo de simulación y evaluación integrada (energía-economía-cambio climático) que permita valorar la transición energética de España hacia una economía baja en carbono. Este modelo integra dos técnicas que son la dinámica de sistemas (DS) y el análisis económico con la metodología input-output (IOA) y parte de las situaciones derivadas del contexto internacional y europeo respecto a las restricciones físicas a la disponibilidad de recursos energéticos no renovables, las limitaciones a las emisiones de GEI, el potencial técnico y sostenible de las energías renovables, o la demanda de energía por parte de los diferentes sectores.

2.3.2 Descripción

El modelo MODESLOW es una herramienta de simulación y evaluación basada en dinámica de sistemas que combina distintos conceptos. Se estructura en diferentes módulos, cada uno de ellos interrelacionado con el resto y formado conjuntamente un sistema integrado. De esta manera, se puede tener en cuenta las realimentaciones que se producen en más de un ámbito y que impulsan cambios en otras variables. Los módulos considerados son los siguientes: módulo económico, módulo energético, módulo de materiales, módulo de usos del suelo, módulo de infraestructuras, módulo climático y módulo social.

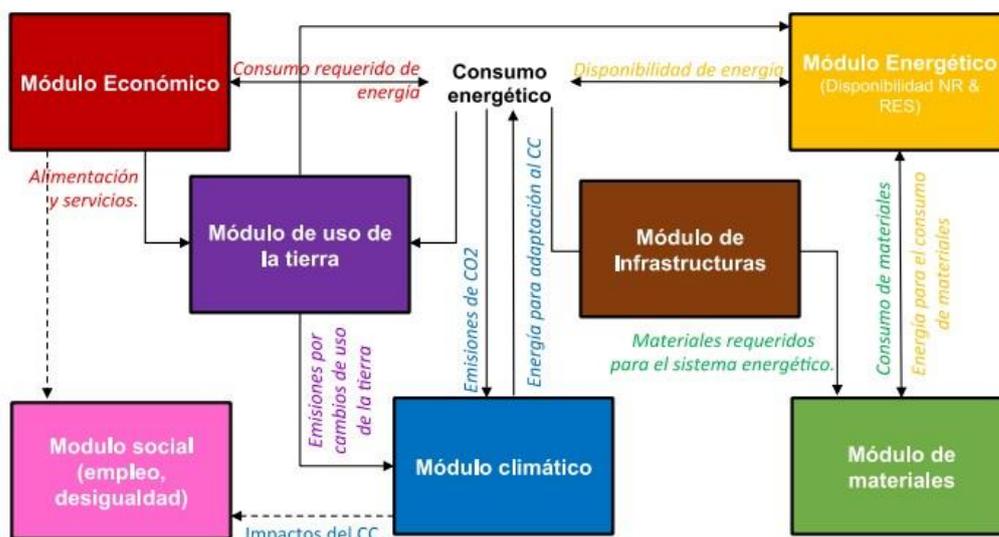


Figura 2.1. Representación gráfica de los módulos que forman en proyecto

El desarrollo de este modelo debe contribuir mediante las técnicas de simulación y análisis estudiadas a evaluar los escenarios futuros en materia de reducción de emisiones. De esta manera se recogen tres objetivos principales del proyecto:

- i. Desde el punto de vista analítico-metodológico, el objetivo es el diseño de un modelo de evaluación integrada energía-economía-cambio climático acoplando dos potentes metodologías (DS e IOA). Todo ello con el fin de evaluar en qué condiciones sería posible para España transitar energéticamente hacia una economía baja en carbono en el horizonte 2050.
- ii. Desde el ángulo de las políticas públicas, el objetivo es doble y consiste en: identificar las principales barreras (tecnológicas y sociales) que impiden avanzar en la transición energética en España y cuantificar los efectos y costes económicos y energéticos de las diferentes escenarios y políticas públicas destinadas a la reducción del consumo de combustibles fósiles.

- iii. Desde el plano comparativo, comparar los resultados obtenidos por MODESLOW con aquellos alcanzados por otros modelos de evaluación integrada tanto a escala nacional como europea.

El presente trabajo se encuentra dentro del módulo de usos de la Tierra. Hasta ahora, MODESLOW recoge el modelado que el impacto de las renovables tiene en los usos de la Tierra. La idea es completar este módulo, incluyendo el estudio sobre los límites de la extracción de biomasa forestal con fines energéticos.

3. DINÁMICA DE SISTEMAS

3.1. INTRODUCCIÓN

Se conoce como dinámica de sistemas a la metodología utilizada para analizar y modelar el comportamiento temporal de entornos complejos. Se basa en el análisis de los elementos y lazos de realimentación entre las variables, flujos y elementos a través de modelos matemáticos que permiten estudiar el comportamiento de estos sistemas. (Wikipedia, 2023)

En la dinámica de sistemas, los sistemas se modelan como redes de elementos interconectados que interactúan y cambian con el tiempo. Estos modelos pueden ser representados gráficamente como diagramas de flujo o ecuaciones matemáticas, y se utilizan para simular y predecir el comportamiento de los sistemas en diferentes condiciones.

Sus orígenes se remontan a la década de los 50 cuando el profesor Jay Forrester desarrolla en el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) en Estados Unidos los principios básicos de esta herramienta como medio para entender y modelar el comportamiento de sistemas complejos en el ámbito de la ingeniería industrial y la gestión empresarial. (GEEDS, 2023)

Precisamente el término “Dinámica de Sistemas” fue el acuñado por el propio Forrester en su libro “Industrial Dynamics” publicado en 1961, el que introdujo la idea de utilizar modelos matemáticos y computacionales para estudiar la dinámica de los sistemas empresariales y económicos. Desde entonces, la dinámica de sistemas es utilizada en numerosas disciplinas como la economía, gestión empresarial, política, salud, ingeniería o ecología entre otras. (Wikipedia, 2023)

La dinámica de sistemas ha evolucionado a lo largo de los años como consecuencia del desarrollo de nuevas herramientas, metodologías y aplicaciones que permiten abordar esta disciplina.

3.2. ELEMENTOS PRINCIPALES

Para poder estudiar el sistema definido es necesario conocer los elementos y relaciones que lo conforman.

3.2.1. Diagrama causal

Un diagrama causal es un diagrama que recoge los elementos clave del sistema y las relaciones entre ellos.

A través de estos diagramas se pueden representar gráficamente mediante flechas relaciones positivas y negativas acompañadas de un signo (+ / -) que indica la influencia de la primera variable sobre la segunda.

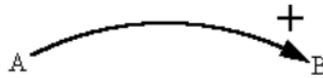


Figura 3.1. Relación positiva.
Fuente: (Martín García, 2012)

Un incremento de A produce un incremento de B, asimismo una disminución de A provoca una disminución en B (relación positiva).



Figura 3.2. Relación negativa.
Fuente: (Martín García, 2012)

Un incremento de A produce una disminución de B, asimismo una disminución de A provoca un aumento de B (relación negativa).

De esta manera se pueden generar bucles de realimentación. Un bucle consiste en una cadena de relaciones causales.

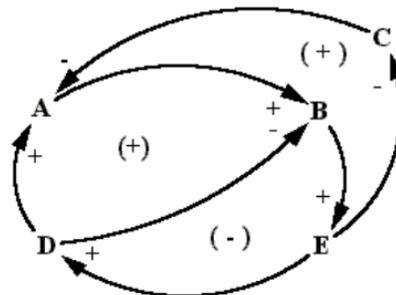


Figura 3.3. Bucle de realimentación causal.
Fuente: (Martín García, 2012)

Los bucles de realimentación pueden ser positivos o negativos.

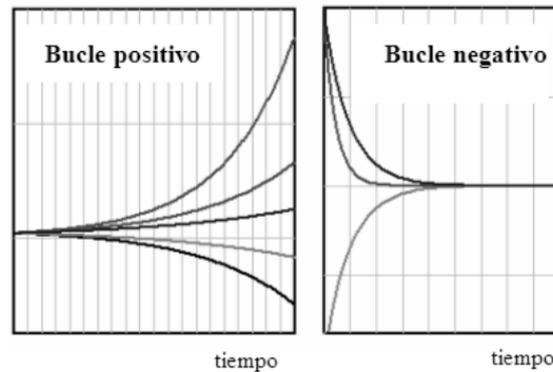


Figura 3.4. Comportamiento del sistema a lo largo del tiempo.
Fuente: (Martín García, 2012)

Un bucle positivo (o reforzante) se da cuando el número de relaciones “causa-efecto” negativas es par, mientras que un bucle negativo (o estabilizante) se da cuando el número de relaciones “causa-efecto” es impar. De esta forma, los bucles positivos llevan al sistema hacia una situación inestable mientras que los bucles negativos llevan al modelo hacia una situación estable independientemente de la situación de partida. (Martín García, 2012)

En los sistemas complejos es común encontrarse con varios bucles de realimentación positivos y negativos por lo que el comportamiento final del sistema dependerá de aquel de ellos que sea el dominante.

3.2.2. Diagrama de flujo o de Forrester

El diagrama de flujo, también conocido como diagrama de Forrester es el diagrama utilizado en dinámica de sistemas que permite representar mediante ecuaciones las relaciones que se dan en el modelo. Un diagrama de flujo es una traducción del diagrama causal a una terminología que permite escribir ecuaciones en el ordenador y así construir el modelo y observar la evolución de sus variables a lo largo del tiempo. (Martín García, 2012)

De esta forma, se puede hacer una transformación incluyendo todos los elementos que forman parte del modelo.

- **Niveles o stocks:** Son aquellos elementos que muestran la situación del modelo en cada instante. Son variables dinámicas por lo que presentan acumulaciones y su variación depende de otro elemento: flujos.
- **Flujos:** Son aquellos elementos que causan la variación de los stocks. Recogen los cambios “flujos” de materia, energía o información. Estos cambios pueden ser:

- Desde una fuente hacia el stock (positivo e incrementa el stock).
- Desde el stock hacia un sumidero (negativo y disminuye el stock).
- Desde un stock a otro stock (la cantidad que se incrementa en un stock se reduce en el otro stock).

Una fuente o un sumidero genérico se representa como una nube. (Mediavilla & Miguel)

- **Variables auxiliares:** Son todas aquellas variables o constantes que forman parte del modelo. Se relacionan entre ellas y con las variables de flujo y stocks. Estas variables permiten visualizar mejor los aspectos que condicionan el comportamiento de los flujos.
- **Retardos:** Permiten simular retrasos en la transmisión de información o materiales. En los sistemas sociales y económicos es frecuente la aparición de estas variables que se pueden simular con funciones concretas como SMOOTH y DELAY. (Martín García, 2012)

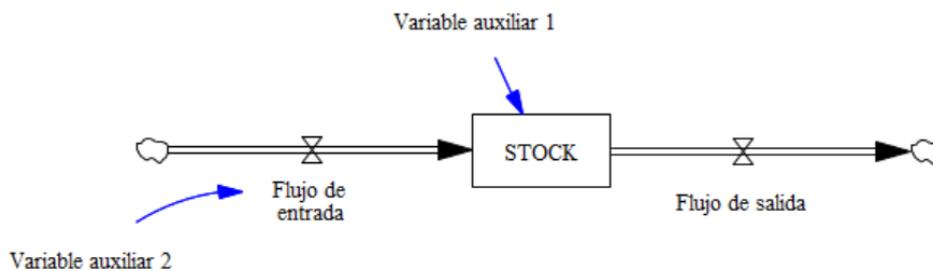


Figura 3.5. Elementos principales en el diagrama de flujo o de Forrester.
Fuente: Elaboración propia

Estos elementos se representan de forma matemática de la siguiente manera:

$$Stock(t) = \int_0^t [Flujo\ entrada(s) - Flujo\ de\ salida(s)] ds + Stock(t_0)$$

Ecuación 3.1. Fórmula matemática del stock

Si hubiese un retardo entre la salida y la entrada, su representación matemática sería la siguiente:

$Salida(t) = Entrada(t - T)$ donde T representa el retardo o demora.

Ecuación 3.2. Fórmula matemática de la salida del modelo representado

3.3. EL PROCESO DE MODELADO

Un modelo es una representación simplificada, abstracta o conceptual de un objeto, sistema o proceso. Se trata de una representación simplificada de una realidad que se utiliza para analizar, evaluar y poder predecir el comportamiento de algo que se quiera estudiar.

Dentro del proceso de elaboración de un modelo se incluyen varias etapas.

1) Articulación del problema:

En primer lugar, es necesario seleccionar el problema y definir sus fronteras. Dentro de este paso es necesario definir las variables clave a considerar para formular el modelo. También es importante definir un horizonte temporal para tener en cuenta las posibles tendencias de las variables estudiadas a lo largo del tiempo.

2) Formulación de hipótesis:

Una hipótesis es una afirmación o suposición que se formula para ser aprobada o investigada. Son una parte fundamental dentro del método científico, ya que permiten plantear predicciones sobre cómo funciona un elemento.

La generación de hipótesis dentro de la dinámica de sistemas resulta importante ya que permite implementar un enfoque endógeno que explique la estructuras y relaciones de realimentación que se dan dentro del modelo. Resulta pues en esta etapa la construcción de un diagrama causal.

3) Formulación del modelo dinámico

En esta parte del proceso se establecen los parámetros y condiciones iniciales con el fin de validar las hipótesis formuladas en la etapa anterior. Además, se realiza una primera aproximación del modelo de simulación

4) Pruebas

Una vez realizado el modelo, se le somete a distintas pruebas para evaluar su comportamiento. La idea es perfeccionarlo por lo que se evalúa su comportamiento en las condiciones más extremas y con posibles cambios o incertidumbres.

5) Diseño de políticas y evaluación

Tras haber evaluado el modelo es preciso diseñar escenarios y políticas aplicables a él. De esta manera se pueden comprobar los efectos e interacciones que pueden tener dentro de él.

Es importante tener en cuenta que el proceso de modelado es un enfoque iterativo y flexible, lo que implica que las etapas pueden solaparse o modificarse en función de los resultados y las necesidades específicas del estudio. Además, la complejidad y detalles del proceso de modelado puede variar dependiendo del tipo de modelo y del campo de estudio.

3.4. PROGRAMA EMPLEADO

El programa utilizado para el desarrollo y simulación del modelo realizado es Vensim en su versión más completa DSS (Decision Support System) y actualizada 9.3.5.

Vensim es un software de propósito general desarrollado por Ventana System para la dinámica de sistemas y la simulación tanto continua como discreta.

3.4.1. Características principales

1) INTERFAZ

Vensim es una herramienta que permite construir, analizar y simular modelos avanzados mediante una interfaz muy intuitiva.

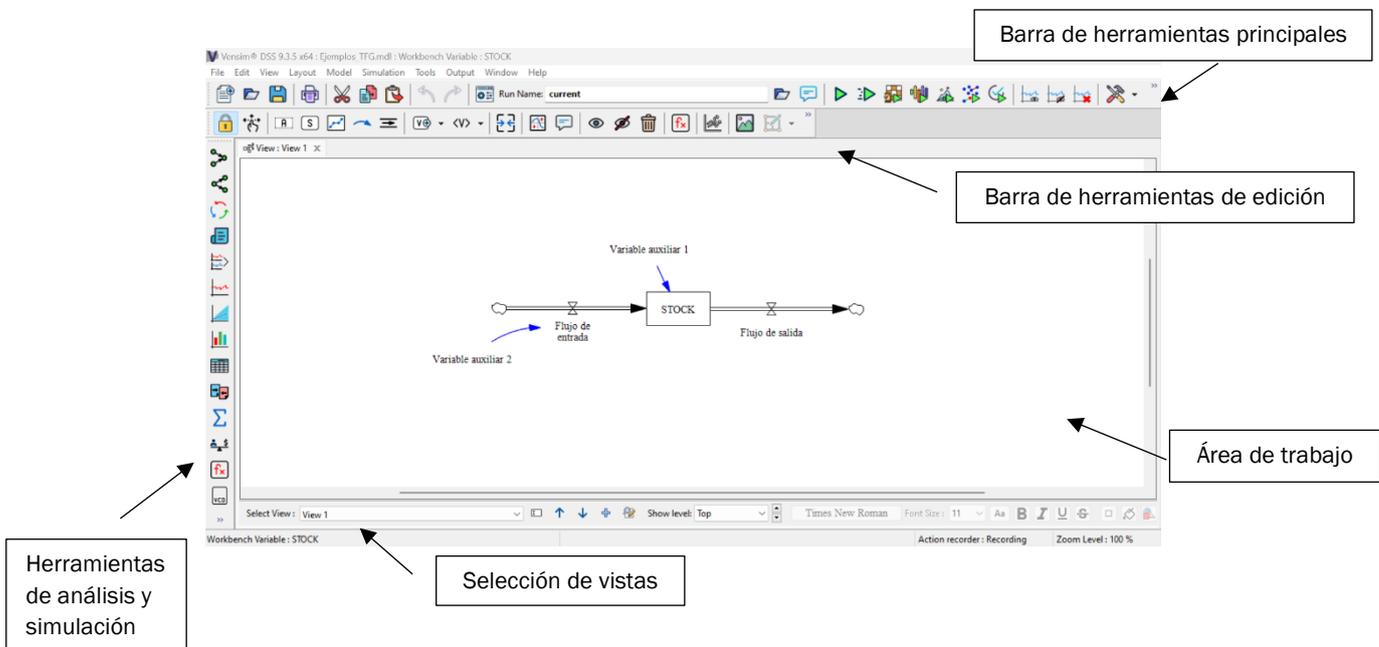


Figura 3.6. Interfaz de usuario Vensim DSS.
Fuente: Elaboración propia

La vista principal del software (Figura 3.6) permite ver el banco de trabajo o 'workbench' donde se elabora el modelo. Además, se pueden incluir varias vistas de forma que se puede dividir el modelo en varios submodelos que detallen de forma separada distintos ámbitos de estudio.

Más allá del área de trabajo se encuentran las herramientas que permiten la simulación y visualización gráfica de los resultados. En cuanto a la simulación, se pueden realizar varias sobre un mismo modelo además de obtener resultados instantáneos mediante SyntheSim.

2) ECUACIONES

Desde Vensim se pueden definir las funciones de cada variable escribiendo dentro del editor correspondiente la expresión matemática. Desde el propio editor se especifican las variables dependientes.

También se incluye un campo para detallar las unidades de medida de la variable estudiada y otro para incluir algún comentario.

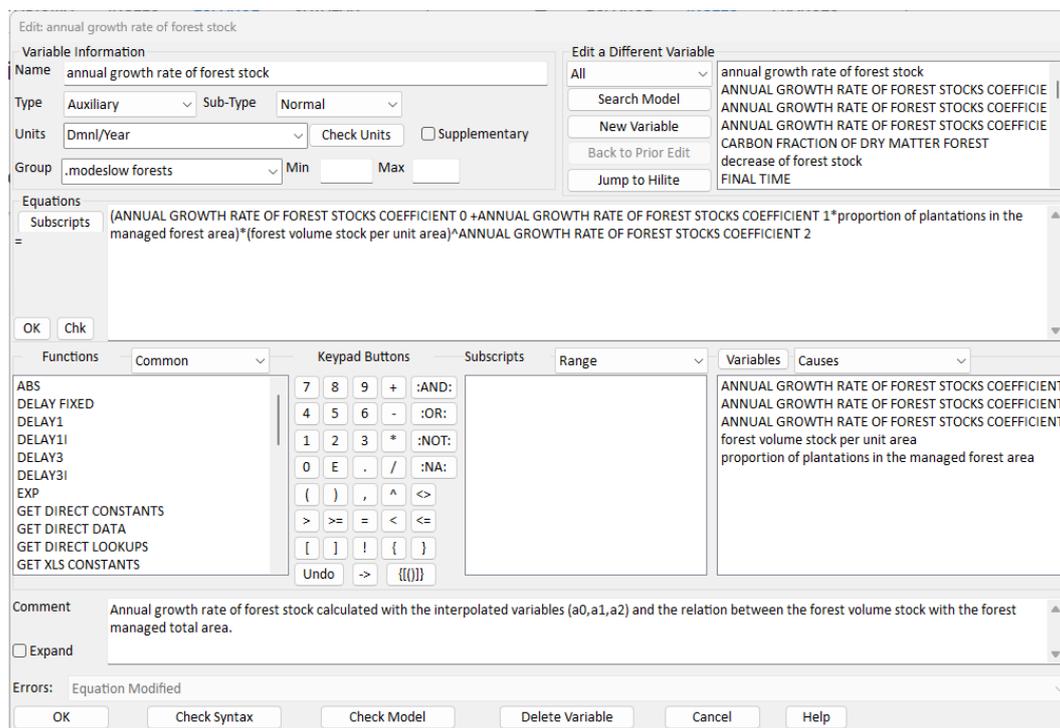


Figura 3.7. Editor de ecuaciones de Vensim.
Fuente: Elaboración propia

3) IMPORTACIÓN DE DATOS

Dentro de este TFG, una parte muy importante de su contenido proviene del estudio de los datos recogidos por distintas organizaciones a lo largo del tiempo por lo que se ha llevado a cabo un análisis de muchos datos recogidos en un Excel. A la hora de incorporar estos datos a Vensim, esto se hace mediante distintas funciones. Dentro del propio editor de ecuaciones se recogen varias funciones que permiten incluir datos, constantes o gráficos.

A continuación, se muestra un ejemplo:

```
GET DIRECT DATA ('Forests/forests_Spain.xlsx', 'land_uses',  
'HISTORICAL_YEARS', 'TOTAL_FOREST_AREA').
```

Ecuación 3.3. Importación de datos procedentes de Excel

Mediante esta ecuación accedemos al documento Excel llamado 'forests_Spain.xlsx' que se encuentra dentro de la carpeta Forests y en la hoja 'land_uses' se recogen los valores etiquetados con la celda llamada 'TOTAL_FOREST_AREA' dentro del tiempo especificado en 'HISTORICAL_YEARS'.

4) SECUENCIA COMPUTACIONAL

Para llevar a cabo la simulación de un modelo, Vensim lleva a cabo los siguientes pasos (Vensim, 2023):

1. Preparación: Se procede a la lectura de los datos, carga de valores y cálculo de ecuaciones. Se calcula también el valor del tiempo inicial y actualizan los valores iniciales de cada variable
2. Inicialización: Para cada stock, Vensim determina el valor inicial o bien partiendo de su ecuación o realizando una acción recursiva.
3. Cálculo de variables auxiliares: Para cada variable auxiliar en el modelo, se calcula su valor mediante su ecuación. De nuevo se lleva a cabo un proceso recursivo hasta que se completen todos los valores de las variables.
4. Almacenamiento de los resultados: Llegados a este punto, se almacenan los resultados de todos los cálculos correspondientes a los stocks y a las variables auxiliares resultantes de esos stocks.
5. Cálculo de tasas netas: Basándose en las variables auxiliares se calcula la tasa neta de cambio para cada nivel en el modelo.
6. Integración: El método de integración más común utilizado es el de Euler. Para la integración mediante este método, los resultados del paso 6 se multiplican por el "TIME STEP" (tiempo de paso) y se suman a los valores de los stocks.

Al final de este paso, el tiempo ha avanzado un 'TIME STEP' y se han calculado los valores de los stocks en el nuevo tiempo.

7. Continuación: Llegados a este punto los pasos 3, 4, 5, 6 y 7 se repiten hasta que el tiempo alcance el "FINAL TIME" (tiempo final).

4. RECURSOS RENOVABLES EN ESPAÑA

4.1 GENERACIÓN RENOVABLE EN ESPAÑA

La generación de energías renovables en España ha experimentado un crecimiento significativo en las últimas décadas, convirtiéndose en un pilar fundamental dentro del mix energético. Con el objetivo de reducir la dependencia de los combustibles fósiles y mitigar los impactos ambientales asociados, España ha apostado por el desarrollo y la promoción de fuentes de energía limpia y sostenible.

La energía eólica ha sido una de las tecnologías renovables más destacadas. España cuenta con una amplia capacidad instalada de aerogeneradores, aprovechando su privilegiada ubicación geográfica y la presencia de vientos favorables en diversas regiones. La energía solar también ha experimentado un rápido crecimiento, tanto en la generación fotovoltaica como en la solar térmica, aprovechando el abundante recurso solar disponible en gran parte del territorio español.

Además, la generación hidroeléctrica sigue siendo una fuente relevante de energía renovable en España, especialmente en áreas montañosas y con ríos caudalosos. Por otro lado, la biomasa y los residuos también han ganado protagonismo como fuentes de energía renovable contribuyendo así al aprovechamiento de los recursos orgánicos disponibles. (Red Eléctrica Española, 2022)

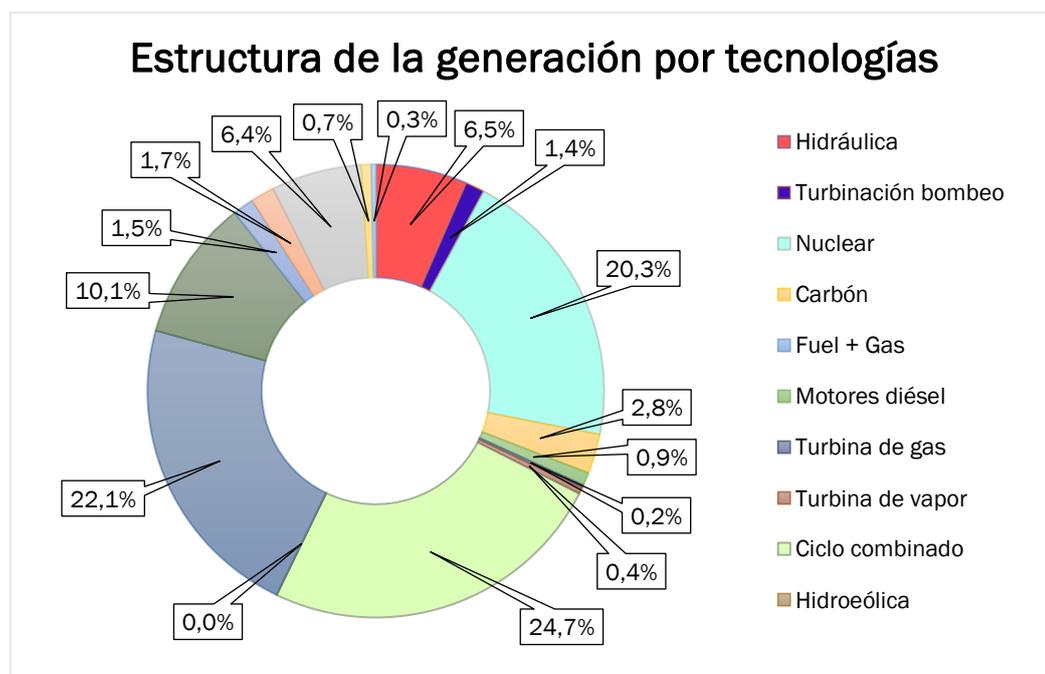


Figura 4.1. Estructura de la generación por tecnologías en 2022.
Fuente: Elaboración propia; datos REE

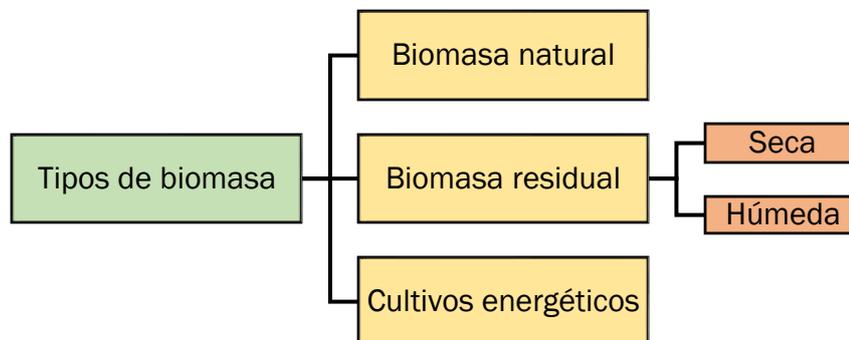
En cuanto a la distribución de la producción de energía, según los datos de la Red Eléctrica Española, en todo el año 2022, la producción renovable supuso el 42,2% del mix nacional. La contribución de las distintas tecnologías renovables dentro de este porcentaje es muy desigual siendo la eólica y solar muy superiores al resto de tecnologías.

4.2 BIOMASA

En el presente trabajo centraremos el estudio en un tipo de recurso renovable, la biomasa.

Según la Especificación Técnica Europea CEN/TS 14588, se define como biomasa al conjunto de materia orgánica originada utilizable como fuente de energía. Se incluye por tanto toda sustancia de origen vegetal y animal de tipo renovable que se origina a partir de materia orgánica excluyendo los combustibles fósiles o sus productos orgánicos derivados de ellos, a pesar de que en épocas pasadas tuvieron un origen biológico.

Como recurso energético existen varias clasificaciones atendiendo a las siguientes categorías en función de su origen:



*Figura 4.2. Clasificación de los tipos de biomasa.
Fuente: Especificación Técnica Europea CEN/TS*

- i. **Biomasa natural:** Es aquella que se produce sin la intervención humana. Se incluyen aquí todos los residuos que se generan de un bosque a partir de las masas forestales existentes.
- ii. **Biomasa residual:** Es aquella que proviene de los residuos generados por procesos derivados de alguna actividad humana o industrial. Estos residuos pueden ser secos o húmedos.

- iii. **Biomasa producida:** Es aquella producida a partir de cultivos energéticos donde hay una gran producción de materia con el fin de ser aprovechada con fines energéticos.

4.2.1 Usos energéticos de la biomasa

En España, la biomasa se utiliza ampliamente con fines energéticos siendo algunos de ellos los siguientes:

Generación eléctrica

La biomasa se utiliza para producir electricidad a través de plantas de biomasa o plantas de cogeneración. Estas instalaciones utilizan principalmente residuos forestales, agrícolas y de la industria de la madera como combustible. La biomasa se quema en calderas para generar vapor, que impulsa una turbina y genera electricidad. España cuenta con varias plantas de biomasa y cogeneración distribuidas por todo el país.

PLANTAS DE BIOMASA MÁS IMPORTANTES EN ESPAÑA	CAPACIDAD DE GENERACIÓN
Planta de Biomasa de Curtis-Teixeiro (A Coruña)	50 WM
Planta de Biomasa de Cofrentes (Valencia)	50 WM
Planta de Biomasa de El Ejido (Almería)	30 MW
Planta de Biomasa de Sangüesa	25 MW

Tabla 4.1. Ejemplos de plantas de biomasa en España.

Fuente: IDAE

Andalucía se sitúa a la cabeza en la obtención de energía eléctrica a partir de la biomasa donde se encuentra casi el 40% de toda la potencia de biomasa instalada a nivel nacional. Esta región cuenta con 18 plantas de generación eléctrica que alcanzan una potencia total instalada de más de 200MW.

En los últimos años, se ha producido un incremento en la potencia eléctrica generada a partir de este recurso renovable, aunque si enmarcamos estos datos a nivel global, España se encuentra en puestos más bajos que otros países europeos. A pesar de disponer de abundantes recursos primarios, España se sitúa en el décimo lugar dentro de la UE en cuanto a la producción de electricidad a partir de biomasa sólida. (Twenergy, 2019)

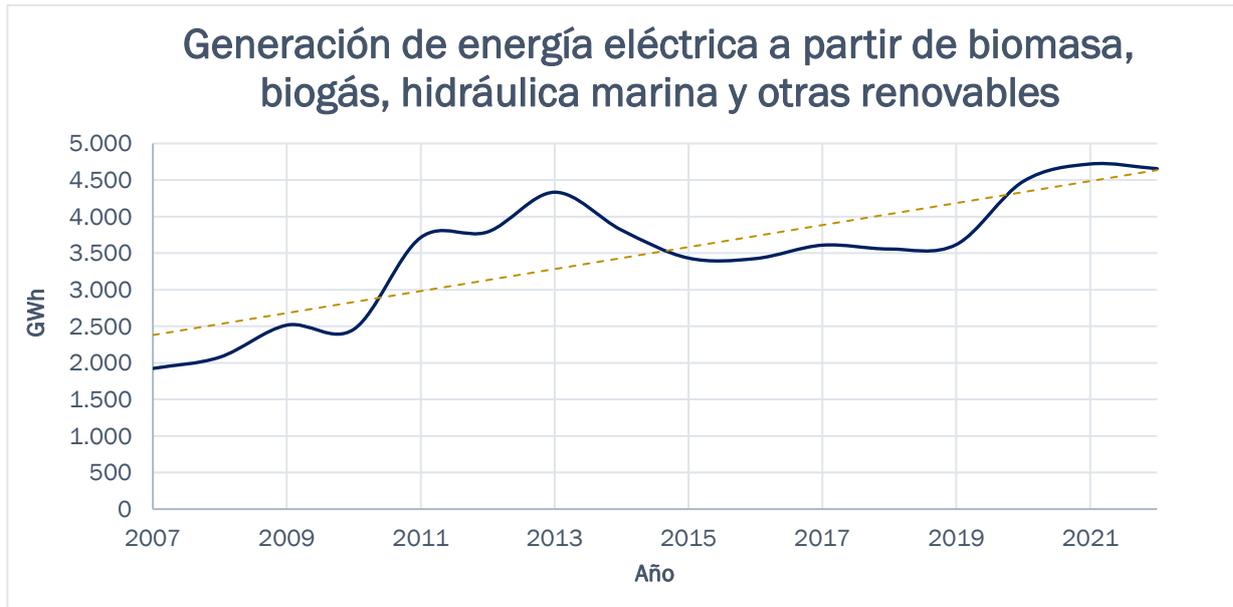


Figura 4.3. Generación de energía eléctrica a partir de biomasa, biogás, hidráulica marina y otras renovables.

Fuente: Elaboración propia; datos REE

Dentro de la Red Eléctrica Española la generación de este tipo de energía está recogida dentro del conjunto “otras renovables” junto con el biogás, la hidráulica marina y la geotérmica. La producción de este grupo en 2021 alcanzó los 4.720 GWh, el mayor valor de su producción en los últimos años. A pesar de representar un porcentaje pequeño su potencial es muy importante.

Calefacción y agua caliente

La biomasa también se utiliza para la calefacción y el suministro de agua caliente en edificios residenciales, comerciales e industriales. Las calderas de biomasa son capaces de quemar pellets, astillas de madera, huesos de aceituna y otros tipos de biomasa sólida para generar calor. Este calor también se utiliza para calentar agua que se distribuye a través de sistemas de radiadores, suelos radiantes o agua caliente sanitaria.

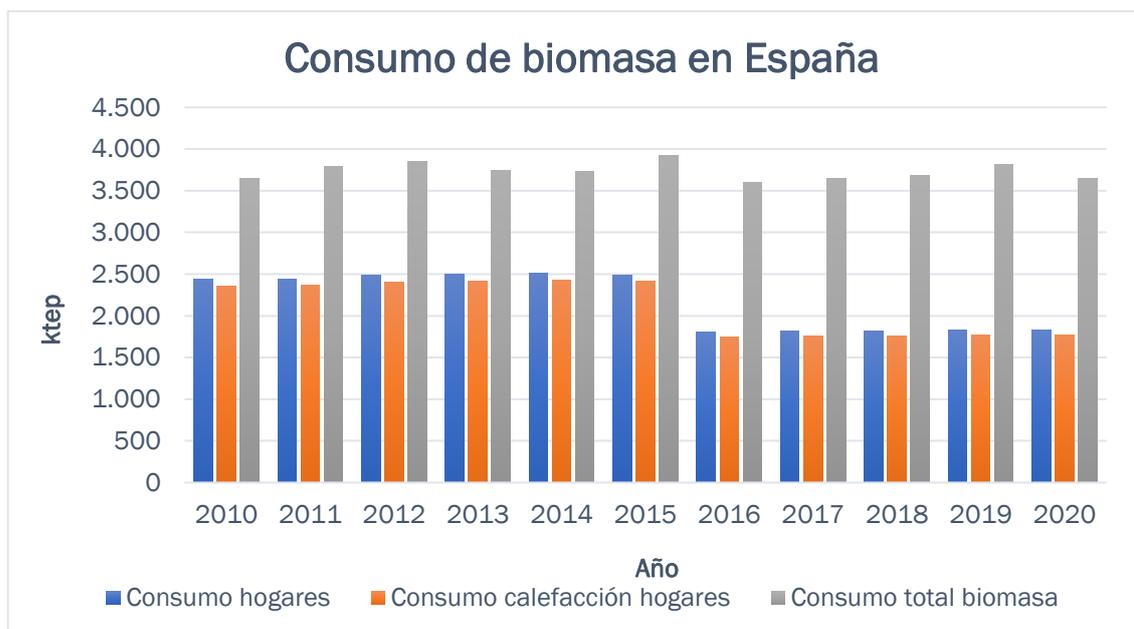


Figura 4.4. Consumo de biomasa en España.
Fuente: Elaboración propia; datos de EUROSTAT y IDAE

Según los datos proporcionados por (EUROSTAT, 2021) el porcentaje de consumo de biomasa en los hogares representan más del 50% del consumo de biomasa con fines energéticos. Este porcentaje además está compuesto principalmente por el uso de la calefacción, un valor muy importante que refleja la importancia que la biomasa tiene en el sector residencial.

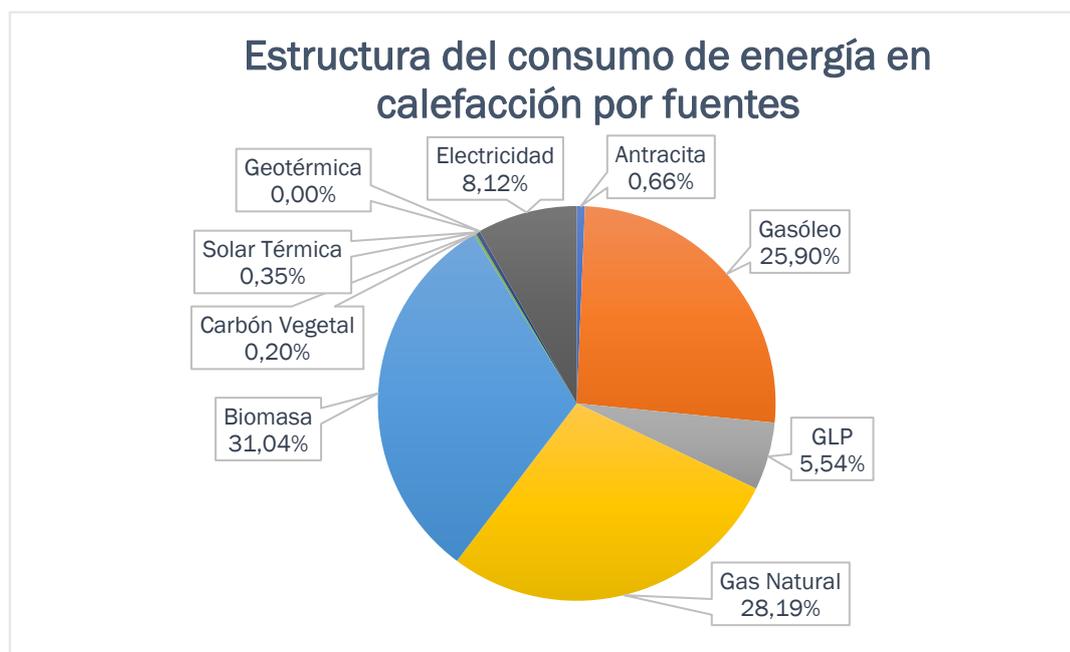


Figura 4.5. Estructura del consumo de energía en calefacción por fuentes.
Fuente: Elaboración propia, datos IDAE

Si tenemos en cuenta los datos proporcionados por (IDAE, 2021) en el balance energético nacional, para el año 2020, el consumo de biomasa para usos de calefacción en los hogares españoles representó la mayor tecnología utilizada por encima del gas natural o el gasóleo.

Industria y procesos térmicos

En el sector industrial, la biomasa se utiliza en procesos térmicos para generar calor y vapor necesarios para diversas aplicaciones, como secado de productos agrícolas, producción de alimentos, generación de vapor en la industria papelera, cerámica y otras industrias que requieren calor a alta temperatura.

Este uso energético de la biomasa se ha visto incrementado en los últimos años y constituye una parte importante del consumo final de biomasa con fines energéticos.

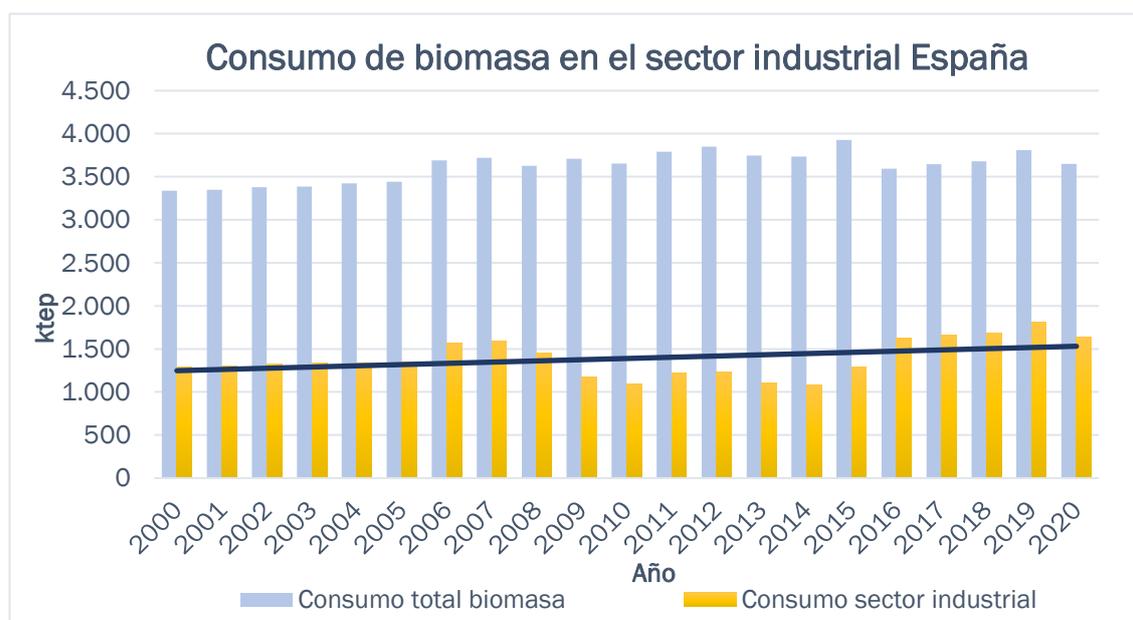


Figura 4.6. Consumo de biomasa en el sector industrial español.
Fuente: Elaboración propia; datos EUROSTAT

Reducción de residuos

El uso de biomasa con fines energéticos en España también contribuye a la reducción de residuos y la gestión sostenible de los recursos naturales. Los residuos agrícolas, forestales y de la industria maderera que de otro modo podrían haber sido desechados se aprovechan como combustible, lo que ayuda a reducir la dependencia de combustibles fósiles y a evitar la acumulación de residuos.

4.3 ESTADO DE LOS BOSQUES ESPAÑOLES

El objetivo de este trabajo se centra en evaluar los recursos disponibles con la idea de plantear escenarios energéticos. De esta manera, para analizar los posibles escenarios futuros es preciso conocer la situación actual. Este trabajo se centra en evaluar el potencial de la biomasa forestal por lo que partimos de evaluar los recursos forestales existentes en España.

Los ecosistemas forestales de España ocupan más de veintiséis millones de hectáreas (26.280.251 ha) de las cuales casi quince millones se encuentran arboladas (14.717.98 ha) y el resto, unas doce, matorral y monte bajo (11.562.382 ha). Esto supone que en total el área forestal ocupe algo más de la mitad del territorio español (aproximadamente el 51%).

Esta extensión de bosques no es uniforme en todo el territorio español, ya que provincias como Cáceres, Badajoz, Huelva y Cuenca se sitúan a la cabeza en cuanto a extensión de monte arbolado mientras que Sevilla, Valladolid, Alicante o Las Palmas son las que menor relación superficie arbolada respecto a superficie total presentan.

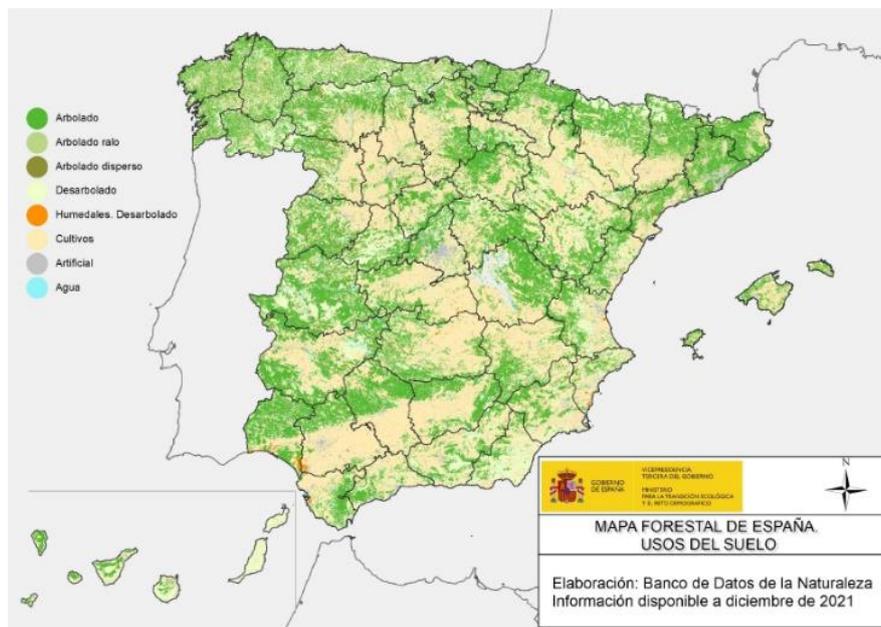


Figura 4.7. Mapa forestal español de los usos del suelo.
Fuente: MITECO

En cuanto a los tipos de bosque, los bosques de coníferas ocupan la mayor extensión con 5,7 millones de hectáreas siendo la especie predominante el pino carrasco (*Pinus halepensis*) seguida de las distintas variedades de pino. Es también la especie que presenta mayor biomasa arbórea. Seguido a las coníferas se encuentran los bosques de frondosas. Estos ocupan en torno a 5,2 millones de hectáreas, siendo la encina, el roble, el eucalipto y el alcornoque las especies más abundantes y que mayor biomasa arbórea contienen. Los bosques mixtos ocupan una extensión territorial en torno a los 4 millones de hectáreas.



Figura 4.8. Mapa forestal español, distribución por tipo de bosque.
Fuente: MITECO

Estos datos están recogidos por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) a través de los diversos Inventarios Forestales que han venido realizando desde 1965.

El Inventario Forestal Nacional (IFN) es un proyecto llevado a cabo por el MITECO, que proporciona información a nivel nacional sobre la situación de los bosques y su evolución. Se trata de un proyecto en el tiempo y que actualmente viene desarrollando la versión IFN4 desde 2008.

A través de estos inventarios se pueden recoger comparaciones interesantes sobre la evolución de los bosques en el sistema nacional a lo largo de los últimos 50 años.

Algunas de estas conclusiones reflejan un aumento de la superficie de monte arbolada en perjuicio de la superficie desarbolada y de cultivo. De esta forma, la biomasa arbórea existente es mayor por unidad de hectárea. Los árboles de grandes dimensiones han aumentado su cantidad, pero no los pequeños que se han visto reducidos.

Sin embargo, el número de cortas y extracción de madera se ha visto incrementado lo que supone un desafío. La mala gestión de las cortas en los bosques dejando materia forestal en el monte junto con otros factores ambientales suponen un riesgo para la propagación de los incendios forestales especialmente en zonas abandonadas. En los últimos años, la pérdida de área forestal como consecuencia de los incendios forestales ha sido muy importante siendo en 2022 una cifra de tres veces la pérdida de 2021.

5. METODOLOGÍA

A continuación, se recogen las tareas llevadas a cabo para la realización del modelo de simulación en dinámica de sistemas. Estas tareas se agrupan en función de los objetivos en dos: Una primera basada en la recopilación de información referente a superficies forestales, stocks de madera y consumos energéticos. La segunda tarea se basa en el diseño del modelo. Esta etapa incluye tanto la fase de diseño en Vensim, como el posterior análisis del funcionamiento bajo los posibles escenarios.

5.1 OBTENCIÓN DE DATOS

Se presenta a continuación el proceso llevado a cabo para obtener los datos necesarios para conocer la situación de los bosques españoles. De esta forma podremos programar las ecuaciones necesarias para realizar el estudio. A continuación, se presenta la base de datos empleada para desarrollar este trabajo.

5.1.1 Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, FAO

Se trata de una agencia especializada de las Naciones Unidas que se dedica a la lucha contra el hambre, la inseguridad alimentaria y la malnutrición en todo el mundo. Fue fundada el 16 de octubre de 1945 y su sede se encuentra en Roma, Italia.

Son varias las áreas de trabajo de FAO, así como sus objetivos entre los que destacan el de lograr la seguridad alimentaria para todos y asegurar que las personas tengan una buena calidad de vida. En esta línea, FAO desempeña un papel importante en la promoción de la gestión sostenible de los bosques a nivel mundial. Además, presenta una base de datos donde almacena información referida a productos forestales de donde hemos obtenido datos para nuestro modelo.

En primer lugar, es necesario conocer la nomenclatura acuñada por FAO para la definición de las variables forestales incorporadas en nuestro modelo.

Clasificación nacional y definiciones

Todos los datos recogidos por FAO, así como las definiciones adoptadas para el estudio español se basan en el Inventario Forestal Nacional IFN2, IFN3 e IFN4 y la cartografía forestal (MFE25).

USO FORESTAL

- **Arbolado:** Superficie con especies forestales arbóreas como manifestación vegetal de estructura vertical dominante con una fracción de cabida cubierta superior o igual al 10%
- **Bosque:** Agrupación de árboles o especies potencialmente arbóreas, en espesura y uso netamente forestal. Su origen es natural o de repoblación integrada.
- **Bosque de plantaciones:** Agrupación de árboles en espesura y uso netamente forestal, cuyo origen es el de plantación. Para considerar que una plantación ha dejado de serlo y ha adquirido naturalidad es necesario que aparezcan diluidos los marcos de plantación y todos los detalles que reflejen un origen artificial.

PRODUCTOS FORESTALES

- **Madera en rollo** (*Roundwood*): Se incluyen todos los productos forestales redondos talados, recolectados y retirados. Incluye toda la madera obtenida de las extracciones, incluyendo la madera recuperada de pérdidas naturales, de tala y de corta durante el período, año calendario o año forestal.
- **Biomasa viva** (*Above-ground biomass and below-ground biomass*): Referida a las especies arbóreas, incluye la cantidad total de materia orgánica presente en los árboles de un determinado ecosistema forestal. Es la masa de tejido vegetal vivo, incluyendo troncos, ramas, hojas y raíces de los árboles.
- **Carbono forestal** (*Forest Carbon*): Se refiere a la cantidad de carbono almacenado en los ecosistemas forestales, principalmente en la biomasa viva de los árboles y en el suelo forestal. Es una medida de la capacidad de los bosques para absorber dióxido de carbono (CO₂) de la atmósfera y almacenarlo a largo plazo.

TRATAMIENTOS FORESTALES

- **Cantidad de producción** (*Production Quantity*): Incluye el volumen de todos los árboles, vivos o muertos, que son talados y retirados del bosque, de otras tierras arboladas o de otros lugares de corta.
- **Importaciones** (*Import Quantity*): Productos importados para consumo interno o procesamiento y enviados a un país. Incluye las importaciones a zonas económicas libres o para reexportación. Se excluyen los envíos "en tránsito".
- **Exportaciones** (*Export Quantity*): Productos de origen o fabricación nacional enviados fuera del país. Incluye las exportaciones desde zonas económicas libres y reexportaciones. Se excluyen los envíos "en tránsito".

5.1.2 International Energy Agency, IEA

La IEA es una organización autónoma con sede en París, Francia, que fue establecida en 1974 en respuesta a la crisis del petróleo de 1973. Su principal objetivo es promover la seguridad energética a nivel global y fomentar la cooperación entre los países miembros en temas relacionados con la energía.

La IEA es reconocida como una autoridad líder en el ámbito energético y actúa como un foro para la discusión y el intercambio de información sobre políticas energéticas, tecnologías y mejores prácticas. Sus actividades incluyen el análisis exhaustivo de datos energéticos, la elaboración de pronósticos y escenarios energéticos, la promoción de la eficiencia energética, el desarrollo de tecnologías limpias y sostenibles, y la respuesta a situaciones de emergencia energética.

En este trabajo, esta base de datos se utiliza para obtener factores de conversión para distintas variables energéticas.

5.1.3 Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, IDAE

El IDAE es una entidad pública de España creada en 1998 con el objetivo de promover la eficiencia energética, el ahorro energético y el uso de fuentes de energía renovables en España. El IDAE trabaja en estrecha colaboración con el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico y tiene como misión impulsar la transición hacia un modelo energético más sostenible y respetuoso con el medio ambiente.

El IDAE dispone de una base de datos donde almacena balances energéticos nacionales (1990-2021) y varias estadísticas de consumos nacionales utilizadas en este trabajo.

5.2 DESARROLLO DEL MODELO

5.2.1 Estructura general

Según se detalla en el capítulo 2, este trabajo se engloba dentro del proyecto MODESLOW por lo que el modelo desarrollado forma parte de un módulo concreto. En la Figura 2.1 se detallaron los módulos que conforman el proyecto. El modelo diseñado forma parte del módulo que hace referencia al uso de la Tierra con las consiguientes retroalimentaciones del resto de módulos que conforman el proyecto.

Es importante mencionar algunas consideraciones asumidas en la elaboración del modelo. Dada la financiación del proyecto, el modelo se ha diseñado en inglés, por lo que las variables citadas se encuentran en este idioma.

5.2.1.1. Modelado del stock de bosques

El estudio (Rockström, Noone, Steffen, & Persson, 2009) se centra en evaluar las condiciones de operación segura de los bosques determinando el conocido como límite planetario de los bosques. Mediante este valor, podemos ver la situación del ecosistema forestal y tomar medidas para realizar una gestión sostenible del mismo.

Este estudio propone una serie de cálculos que permiten determinar estimaciones futuras. Estos cálculos incluyen el procesamiento de datos originales, estimación de coeficientes y tasas de crecimiento de los stocks forestales.

En la siguiente ilustración se refleja el proceso llevado a cabo y las variables definidas.

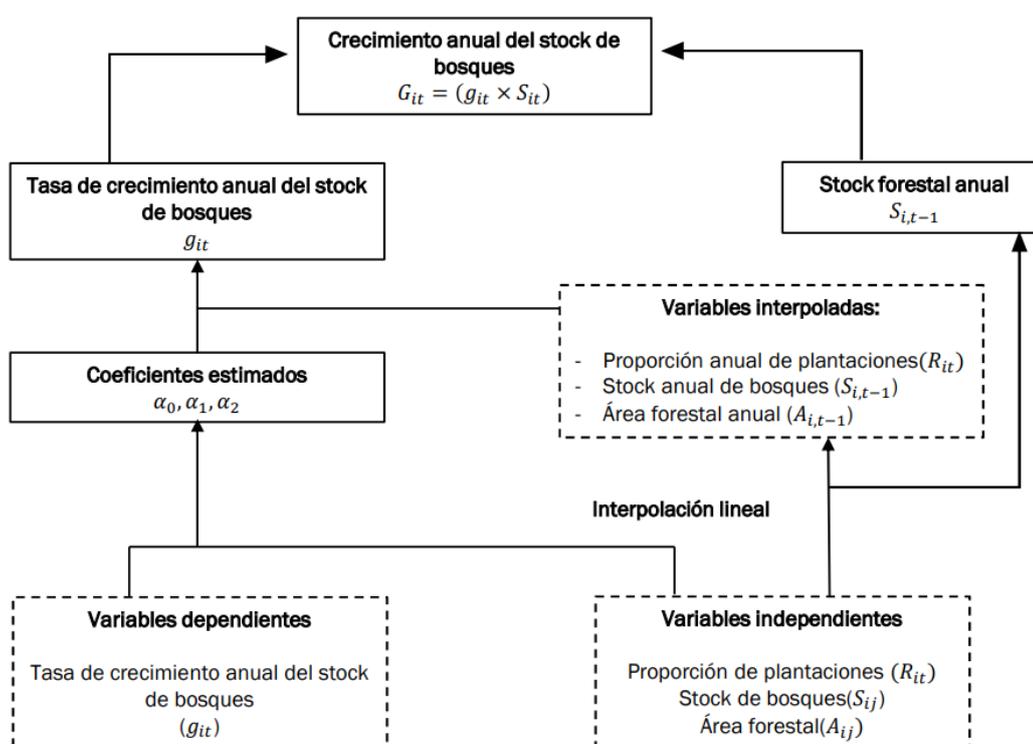


Figura 5.1. Esquema modelo crecimiento de stock forestal.
Fuente: elaboración propia a partir del estudio (Zhang, y otros, 2021)

Se define el crecimiento anual de los stocks forestales (en m³) como el valor del límite planetario de los bosques, dado que la extracción de madera no debe superar el incremento anual del stock de bosques si queremos llevar una gestión sostenible del bosque. Cuanto mayor sea el incremento de los stocks forestales, mayor será el espacio operativo seguro para la extracción de árboles.

Para calcular el incremento de los stocks forestales, se hace uso del modelo (Buongiorno, Turner, & Zhu, 2006) que explica el crecimiento forestal tras evaluar el suministro de recursos forestales a nivel nacional. Este modelo describe las tasas de crecimiento conociendo variables específicas y utilizando el método de mínimos cuadrados no lineal ponderado y generalizado para mejorar las estimaciones. De esta forma, el incremento de los stocks forestales es el resultado de multiplicar la tasa de crecimiento anual por el stock del país.

La Ecuación 5.1 se utiliza para calcular la tasa de crecimiento anual de los stocks forestales. Los parámetros de esta ecuación deben ser estimados por las variables dependientes e independientes. ¹Las variables independientes son R_{it} , que representa la proporción de plantaciones en el total de área forestal y las variables S_{it-1} y A_{it-1} que representan el stock y el área forestales respectivamente. Las variables dependientes son los parámetros definidos como α_0, α_1 y α_2 . α_0 representa la tasa de crecimiento inicial de los bosques naturales, α_1 debe ser un valor positivo, lo que indica que cuanto mayor sea la proporción de plantaciones, mayor será la tasa de crecimiento de los stocks forestales.

Para los bosques maduros con stocks altos por unidad de área, el aumento de los stocks forestales será lento mientras que sucede lo contrario para los bosques jóvenes ya que el aumento de bosque por unidad de área es más rápido. De esta forma, α_2 se trata de un valor negativo. u_{it} indica una tasa de error que podemos despreciar.

Estos tres parámetros independientes son los que los autores calculan mediante la aproximación del método de mínimos cuadrados no lineales a partir de las variables conocidas.

$$g_{it} = (\alpha_0 + \alpha_1 \cdot R_{it}) \cdot \left(\frac{S_{it-1}}{A_{it-1}} \right)^{\alpha_2} + u_{it}$$

Ecuación 5.1. Tasa de crecimiento anual de los stocks forestales

$$G_{it} = g_{it} \cdot S_{it-1}$$

Ecuación 5.2. Incremento anual de los stocks forestales

¹ La notación i , representa un país; t representa los años desde 1990 hasta 2020 (periodo en el que se hacen las estimaciones).

Estas ecuaciones se calculan a partir de los datos históricos conocidos de cada país.

Para el caso español, hemos desarrollado el modelo correspondiente que represente el ecosistema forestal actual partiendo del estudio que hemos mencionado (Zhang, y otros, 2021).

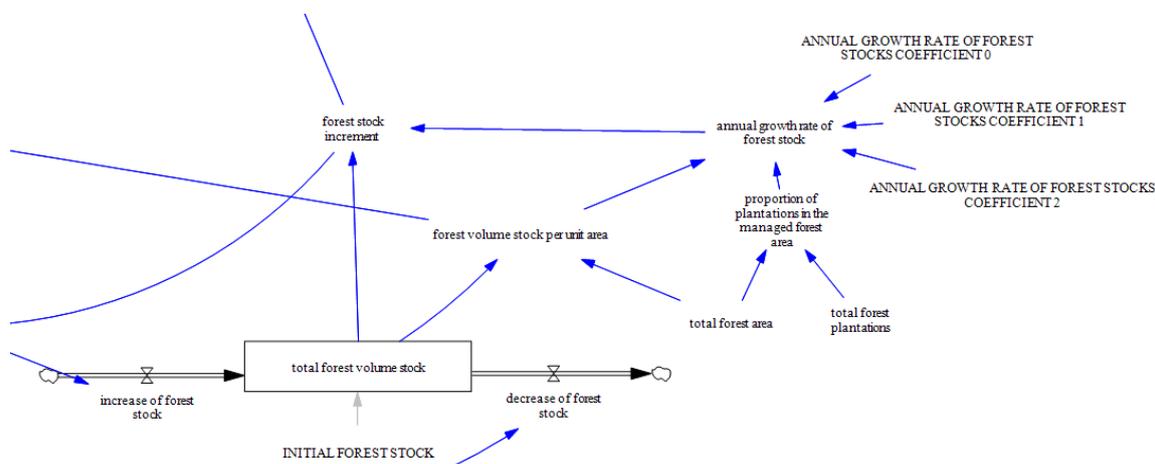


Figura 5.2. Modelo inicial de stocks de madera.
Fuente: elaboración propia

En una primera aproximación se realizó el modelo que se muestra en la Figura 5.2. En la vista se refleja la representación del modelo descrito por (Zhang, y otros, 2021) para el caso español. Las variables parten de datos históricos y a partir de ahí se determinan las ecuaciones que describen el crecimiento de los bosques. Para este modelo se llevó a cabo diversas calibraciones de las variables independientes (α_0 , α_1 y α_2). Estas calibraciones se basan en realizar numerosas simulaciones variando estos tres parámetros hasta encontrar el mejor resultado marcado por el objetivo de aproximar los datos históricos hasta 2020 a nuestro modelo.

Los resultados obtenidos tras realizar numerosas simulaciones y calibraciones se ajustaban de forma correcta a la evolución histórica del stock forestal.

ECUACIÓN DATOS HISTÓRICOS STOCK	ECUACIÓN AJUSTADA STOCK
$y = 9.729.467,53x - 18.538.509.645,02$	$y = 9.623.976,62x - 18.346.620.727,28$

Tabla 5.1. Ajuste calibración del stock, comparación de ecuación histórica y simulada

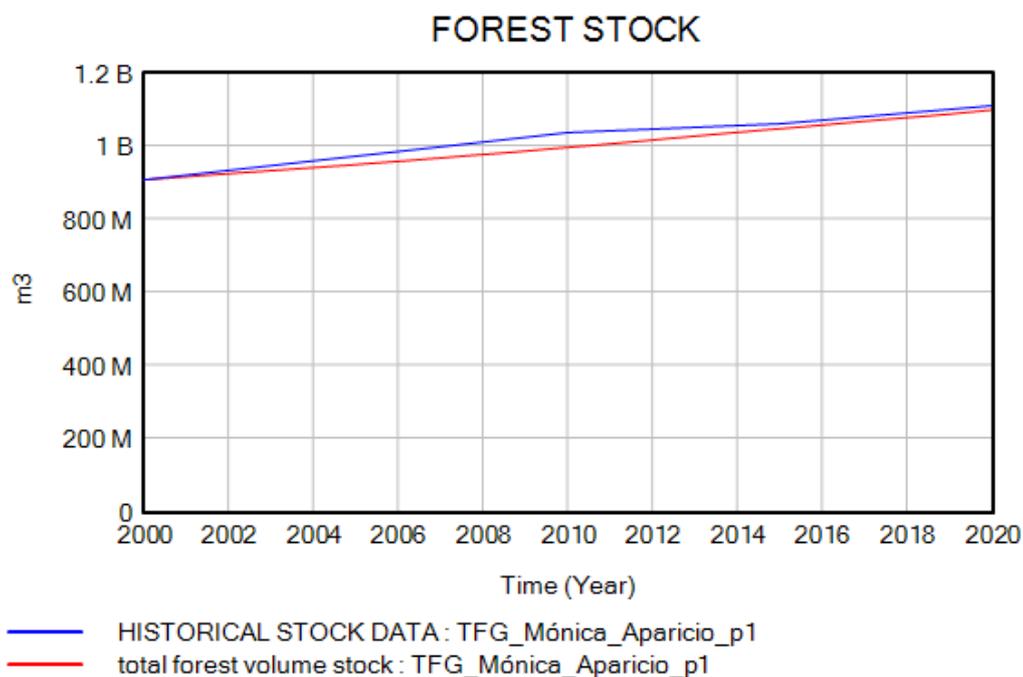


Figura 5.3. Evolución del stock forestal hasta 2020, primera aproximación del modelo.
Fuente: elaboración propia

Sin embargo, si prolongamos la simulación en el tiempo o evaluamos casos extremos, el stock lleva una dinámica creciente que no refleja adecuadamente el comportamiento que el bosque tiene.

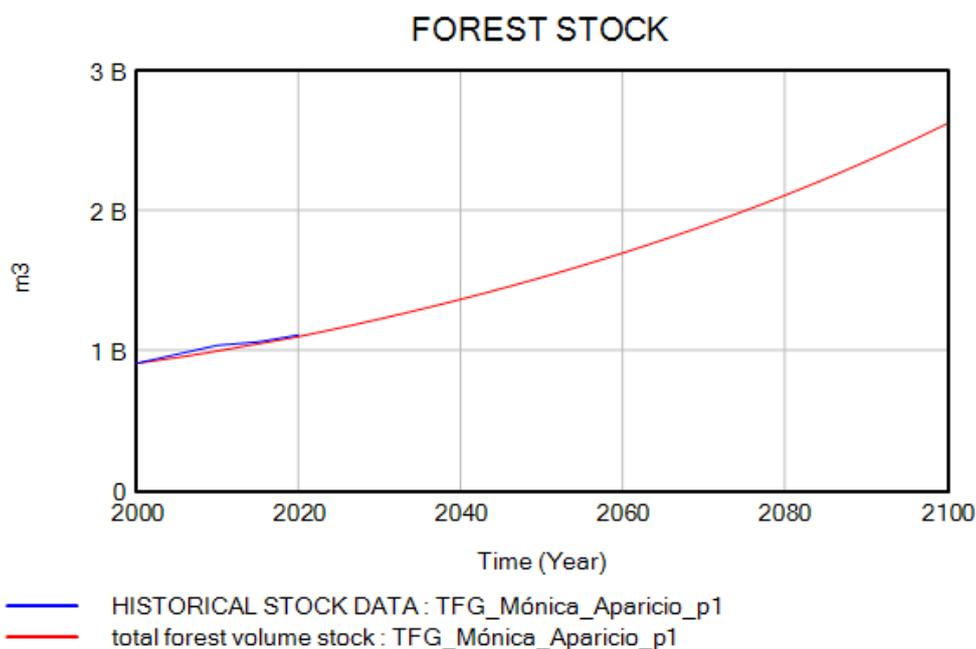


Figura 5.4. Evolución del stock forestal hasta 2100, primera aproximación del modelo.
Fuente: elaboración propia

La tasa de crecimiento anual prolongada para un tiempo de simulación más largo sigue una función exponencial, algo erróneo para describir un sistema forestal ya que este presenta un límite máximo de crecimiento.

Como hemos analizado, este modelo se comporta bien y reproduce adecuadamente los datos históricos y el punto de equilibrio en el cual, la madera extraída es similar a la actual pero no se comporta bien en casos límites. Un modelo, debe ser lo suficientemente robusto como para ser capaz de proporcionar resultados fiables y válidos bajo condiciones de simulación extremas, sobre todo cuando son utilizados para evaluar políticas como sucede en dinámica de sistemas. Este primer modelo no lo es, por lo que vamos a optar por modificarlo y de esta manera mejorarlo.

Tras analizar estos primeros resultados, optamos por modificar el modelo inicial adaptando la Ecuación 5.1 que representa la tasa de crecimiento anual de los bosques hacia una ecuación que presentase una función logística. La función logística, es una función matemática que aparece en diversos modelos de crecimiento y presenta varias propiedades que concuerdan con la dinámica que queremos describir.

Una función logística que modeliza el crecimiento logístico de una magnitud, $M(t)$:

- i. Presenta un crecimiento acotado, para todo t se cumple que $0 < M(t) < K$
- ii. Presenta una aproximación exponencial para valores pequeños de M .
- iii. Para valores de $t \rightarrow \infty$ la ecuación logística presenta unos límites.

De esta manera modificamos la ecuación que representa la tasa de crecimiento anual de los bosques.

$$g_{it} = (k_1 \cdot R_{it}) \cdot \left(1 - \frac{R_{it-1}}{M_{it-1}}\right)$$

Ecuación 5.3. Tasa de crecimiento anual de bosques

Esta nueva ecuación, se compone de dos variables independientes y una variable dependiente. La R_{it} representa el volumen de stock de bosque por unidad de área, y la variable M_t representa el máximo stock de bosque por unidad de área que pueden albergar los bosques españoles. Por otro lado, la variable k_1 , se trata de una constante que determinaremos calibrando el modelo.

En un principio, hemos incorporado una nueva variable de la cual no conocemos su valor. Esta variable se trata del stock máximo de volumen de madera por unidad de área que puede haber en los bosques españoles. Se trata de un dato que desconocemos su valor máximo, aunque si sus valores históricos y actuales.

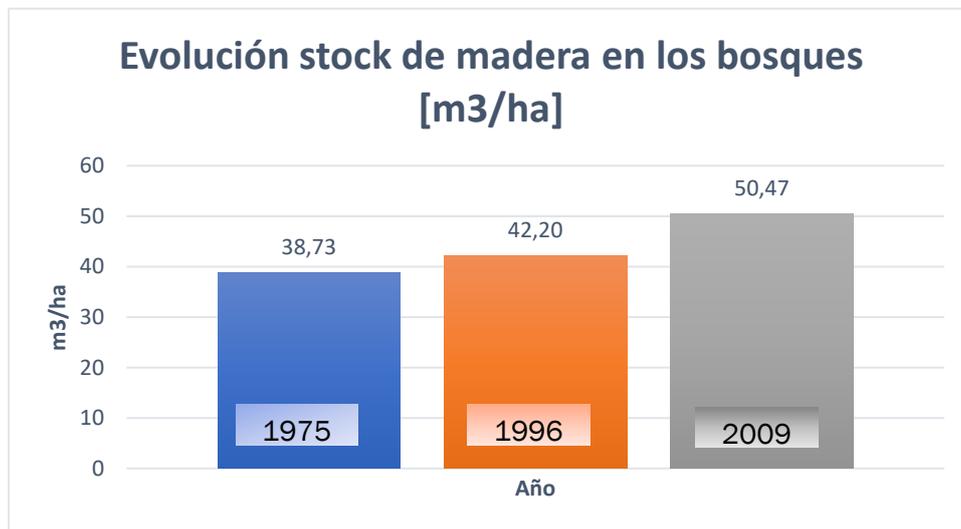


Figura 5.5. Evolución del volumen de madera por unidad de área en España.
Fuente: elaboración propia; datos Inventario Forestal Nacional (IFN3)

Además, diversos estudios científicos han elaborado predicciones y modelos donde recogen información muy útil que hemos aplicado en nuestro modelo. En esta línea (Roebroek, Cescatti, Duveiller, Seneviratne, & Davin, 2023) llevan a cabo un estudio donde investigan a cerca de cuanto carbono pueden conservar los bosques.

El artículo muestra un estudio sobre la capacidad de carga de la biomasa (BCC, de sus siglas en inglés). La BCC se refiere a la cantidad máxima de biomasa o materia orgánica viva que puede mantenerse en un ecosistema o hábitat determinado sin causar impactos negativos o exceder los límites ecológicos del sistema. Representa la capacidad del entorno para soportar y mantener un cierto nivel de biomasa, teniendo en cuenta factores como la disponibilidad de nutrientes, la productividad, las interacciones ecológicas y las condiciones ambientales.

Para el caso español, estos valores de biomasa arbórea máxima alcanzables se sitúan en torno a las [50-150] Mg/ha. Según hemos visto en el capítulo 4, España es un país con un ecosistema forestal heterogéneo, siendo el norte una zona con mayor capacidad de almacenamiento de masa forestal que el sur.

Estudiando estos valores, junto con el análisis de los históricos podemos determinar valores promedio en los cuales podemos fijar el valor de stock máximo de bosque por unidad de área para nuestra ecuación. Existen incertidumbres a cerca de los

límites alcanzables de los ecosistemas forestales mundiales y según el artículo (Roebroek, Cescatti, Duveiller, Seneviratne, & Davin, 2023) cabe la posibilidad de que podrían estar en valores del 15-20% más de los valores en la situación actual.

De esta forma estimaremos los valores del stock máximo (M_t) siguiendo estos estudios. Para ello, evaluaremos dos casuísticas: En la primera de ellas evaluaremos la situación futura resultado de las estimaciones que sitúan en torno a 50-150 Mg de biomasa arbórea máxima por hectárea. Para ello fijaremos un stock máximo en torno a los 110-125 m³ de madera por hectárea. En el segundo caso de estudio evaluaremos la situación futura para un crecimiento máximo de los bosques del 20% la situación actual, dato estimado por los investigadores. Esto supone fijar un valor máximo de stock de 80 m³/ha. Para cada valor de stock calibraremos el valor de crecimiento, k_1 .

Las calibraciones llevadas a cabo se han realizado utilizando la herramienta de optimización de Vensim. El procedimiento consiste en conseguir el mejor valor de k_1 , que proporcione la tasa de crecimiento propia del bosque resultado de comparar la variable histórica del stock con la variable endógena de nuestro modelo que representa el stock. Se realizan un número de simulaciones hasta que se consigue minimizar la diferencia entre la variable del stock del modelo y la histórica. Para esta diferencia mínima el valor de k_1 es el más óptimo.

Siguiendo con el desarrollo del modelo partiendo del esquema de la Figura 5.1, vamos a desarrollar la parte que estudia la pérdida de madera. Representaremos mediante $[G_{it}]$ en m³, el cambio total del stock forestal. Para ello, incluimos en una variable la extracción de madera $[H_{it}]$ representada en m³. Además, incluimos $[\Delta DS_{it}]$ que representa el cambio de los stocks forestales causado por la expansión del área forestal y la deforestación. Para el caso español, el área forestal ha sufrido cambios en el último siglo como consecuencia del abandono de tierras y zonas rurales se ha producido un incremento en las hectáreas forestales. Sin embargo, el crecimiento en los últimos años no es significativo por lo que no incluiremos este valor en nuestra ecuación.

$$G_{it} = \Delta S_{it} + \Delta H_{it}$$

Ecuación 5.4. Fórmula cambios de stock forestal

En la práctica, el volumen de producción de madera no es igual al cambio en los stocks forestales debido a la pérdida en la producción de madera. Por lo tanto, se deben tener en cuenta los porcentajes de rendimiento para reflejar el proceso de producción de madera. Este porcentaje se recoge en una variable que hemos denominado como 'OUTTURN' (rendimiento). El propio estudio del que nos hemos apoyado (Zhang, y otros, 2021) proporciona estos datos a escala europea, pero el valor que hemos tomado ha sido facilitado por el Grupo de Ecología Aplicada y

Teledetección, GEAT (Teledetección, 2023) de la Universidad de León ya que se ajusta más a escala nacional. Este porcentaje también se utilizará posteriormente para calcular la extracción directa de madera.

Incorporando estas variables al modelo obtenemos el módulo forestal representado en la siguiente figura.

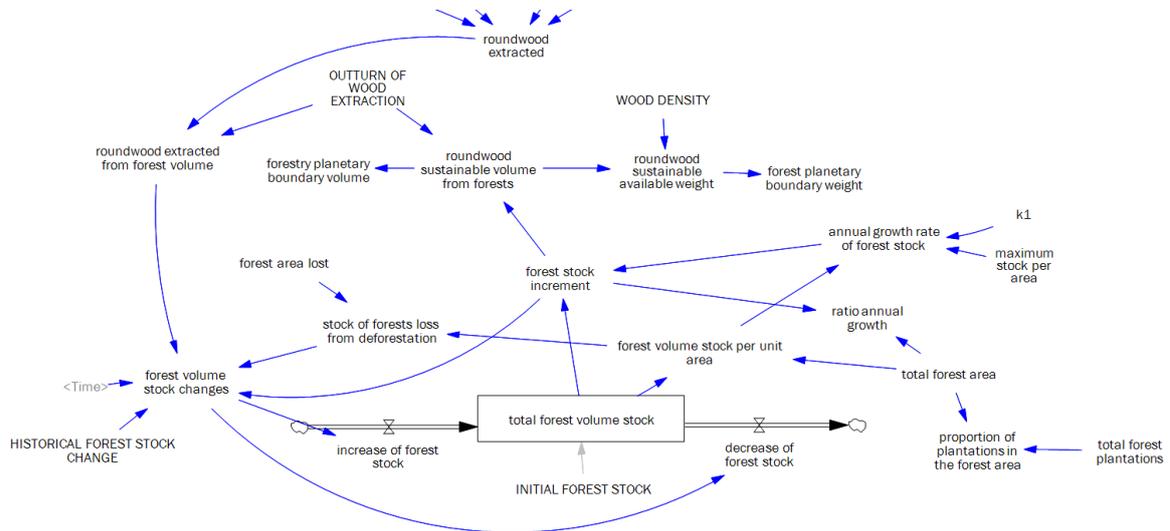


Figura 5.6. Modelado del módulo stock de forestal.
Fuente: elaboración propia

5.2.1.2 Modelado del stock de carbono forestal

El siguiente módulo se centra en el cálculo de las variables que representan los valores de biomasa y carbono forestal. Estas variables, se calculan a partir del modelo previamente descrito en la Figura 5.6, mediante los cálculos y constantes determinadas según (Ruiz-Peinado Gertrudix, 2013) para la estimación de biomasa y carbono forestal en los sistemas forestales. Muchos de estos valores vienen también descritos según el IPCC y han sido recogidos por FAO y MITECO en sus estudios.

El siguiente modelo, se encarga de calcular estos valores a partir de los cambios que se dan sobre el volumen de stock forestal en m³ de madera.

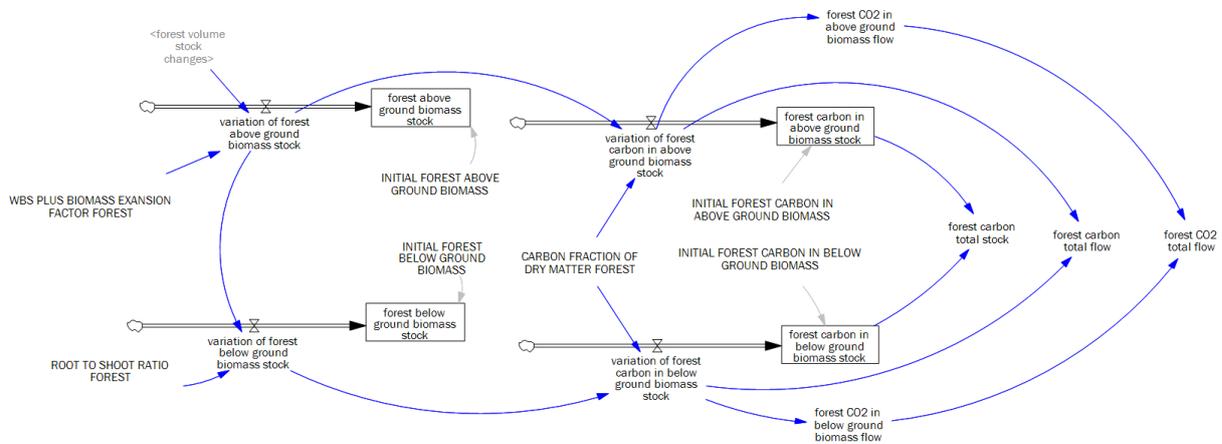


Figura 5.7. Modelado del módulo stock de carbono y biomasa.
Fuente: elaboración propia

Este módulo se constituye a partir de cuatro stocks de biomasa y carbono con sus flujos correspondientes. Los dos primeros stocks de biomasa representan el contenido de biomasa forestal viva y subterránea. Ambos stocks están alimentados por los flujos que representan la variación de biomasa viva y subterránea. Del mismo modo, los dos siguientes stocks, reflejan las existencias de carbono forestal vivo y bajo el suelo calculados a partir de la variación en las existencias vivas y subterráneas.

Este módulo permite calcular las absorciones/emisiones de CO₂ a partir de las existencias de carbono. De esta manera, el CO₂ total forestal absorbido por los bosques se calcula mediante la conversión de las toneladas de carbono (t C) a toneladas de CO₂ (t CO₂) mediante la relación del peso molecular del CO₂ y la masa atómica del carbono (C).

$$\Delta CO_2 = \Delta C \times \frac{44}{12}$$

Ecuación 5.5. Cálculo de la absorciones/emisiones de CO₂

A continuación, en la Figura 5.8 se muestra una gráfica en la que se ven reflejados los datos históricos recogidos por FAO y los datos obtenidos en nuestro modelo que representan la dinámica obtenida tras el cálculo de emisiones y absorciones. Según la Ecuación 5.5, los valores positivos serán absorciones mientras que los valores negativos se tratan de emisiones.

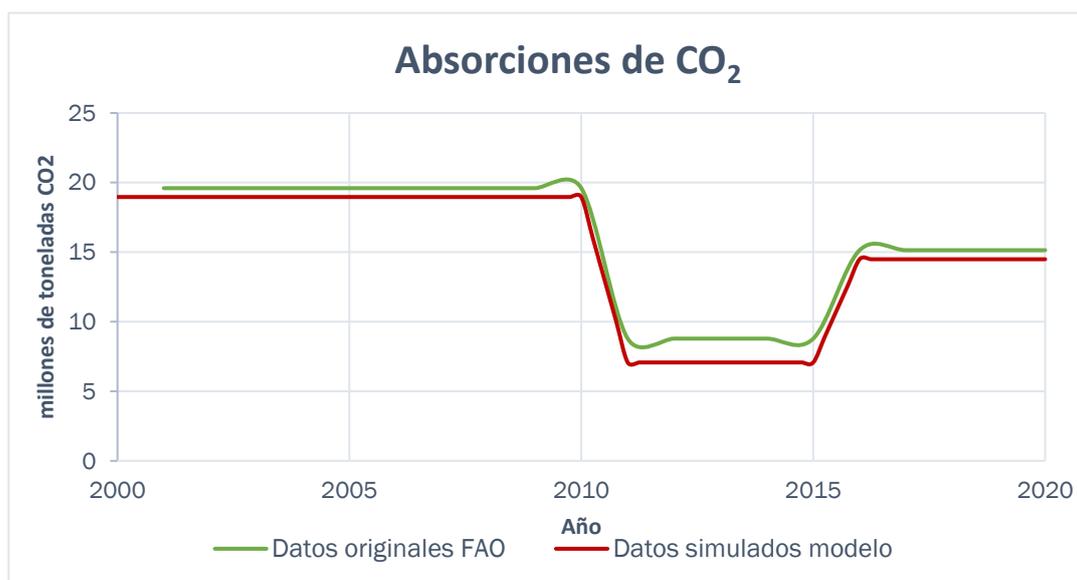


Figura 5.8. Absorciones de CO₂, comparación datos originales y datos simulados.
Fuente: elaboración propia

Cuando hay un cambio en el stock forestal, esto repercute directamente sobre el carbono forestal y en consecuencia en la capacidad de los bosques de comportarse como sumideros de CO₂. En esta línea también los incendios y el cambio de hectáreas provoca una reducción muy importante en las toneladas de CO₂ que son capaces de capturar los bosques.

Estos valores de las variables descritas anteriormente (stocks y flujos) se obtienen a partir de tres constantes propias de los ecosistemas forestales definidas en nuestro modelo.

- WBS PLUS BIOMASS EXPANSION FACTOR FOREST / FACTOR DE EXPANSIÓN DE LA BIOMASA (BEF)

Conocido como BEF's por sus siglas en inglés, este valor representa el factor de expansión de biomasa para convertir el incremento neto anual (incluida la corteza) en incremento de biomasa arbórea sobre el suelo, sin dimensiones. Se trata de un factor que relaciona la biomasa total y el volumen maderable. Este valor expresado en toneladas por metro cúbico se obtiene, para cada especie, a partir de los datos incluidos en el Informe de Inventarios de GEI de España 1990-2012 (2014). En el Informe, se asigna un valor de 0,8, de acuerdo con la publicación IPCC-1996. (Ruiz-Peinado Gertrudix, 2013)

- CARBON FRACTION OF DRY MATTER FOREST / FRACCIÓN DE CARBONO DE LA MATERIA SECA

Este valor representa la fracción de carbono de la materia seca, un valor que se toma por defecto según el IPCC, 0,5 t C / t m.s. Este valor se determina tras conocer el peso de biomasa seca y midiendo el peso de carbono fijado se calcula la concentración de carbono existente en la madera.

- ROOT TO SHOOT RATIO FOREST: FACTOR DE EXPANSIÓN DE LAS RAÍCES

Este valor representa el factor de expansión de las raíces. Según hemos descrito en el inicio de este capítulo dentro del total de biomasa, se incluye la biomasa arbórea por encima del suelo y la biomasa por debajo del suelo. Este factor permite calcular las reservas de biomasa existentes a partir de la biomasa arbórea disponible. Este coeficiente raíz-vástago medio para las especies españolas se sitúa en 0,33.

5.2.2 Escenarios

Un escenario es una representación simplificada de posibles futuros y se utiliza para evaluar los efectos de variables sobre las que hay mucho grado de incertidumbre.

Los escenarios son un conjunto de suposiciones coherentes sobre el futuro y son muy utilizados en los modelos de dinámica de sistemas para definir de forma coherente aquellos parámetros del modelo sobre los cuales existe incertidumbre. Estos, nos ayudan a comprender las consecuencias a largo plazo de las decisiones a corto plazo y permiten a los investigadores explorar diferentes futuros posibles en el contexto de las incertidumbres fundamentales del futuro.

En esta línea vamos a implementar varios escenarios distintos para evaluar el comportamiento del sistema estudiado.

5.2.2.1 Escenario 0 (SC0: Estudio base)

Este primer escenario se basa en evaluar el stock de madera de bosques partiendo de las estimaciones hechas para evaluar el modelo. En la siguiente tabla se reflejan los casos estudiados.

INTERRUPTOR ESCENARIO 0	n.º simulación	Valor stock máximo (m ³ /ha)
ESTUDIO BASE	1	80
	2	100
	3	125

Tabla 5.2. Casos de estudio sobre el escenario base, SC0

5.2.2.2 Escenario 1 (SC1: Tendencias de futuro)

Este escenario está caracterizado por la evolución futura acorde con las tendencias pasadas. Las simulaciones que se van a llevar a cabo están realizadas atendiendo a la evolución de las variables que influyen directamente en la extracción de madera. Analizando los valores históricos hemos calculado una ecuación que puede servir para representar la tendencia futura.

Si analizamos la extracción de madera nacional, hay tres variables clave que afectan directamente a ella. Estas tres variables son: el consumo nacional, las importaciones y las exportaciones. En cuanto a las importaciones, estas apenas son representativas en cuanto al total. Sus valores son muy bajos y durante los últimos años han disminuido aún más situándose en valores por debajo del millón de m³ de madera. En cuanto a las exportaciones, estas se sitúan también en valores muy bajos, pero con una tendencia creciente. A partir del año 2008, superaron el millón de m³ de madera y en los últimos años tomando valores más elevados.



Figura 5.9. Evolución histórica de las extracciones, importaciones, exportaciones y consumo de madera.

Fuente: elaboración propia; datos EUROSTAT y FAO

Sin embargo, el principal comportamiento que marca la extracción de madera es el consumo nacional. Este ha sufrido muchos cambios en el último siglo. Los valores de consumo a principios de este se situaban por encima de los 15 millones de m³. A partir del 2008, sufrió una caída importante causada también por un descenso en el consumo en el sector industrial. Ya a partir de 2016, la demanda de madera se ha vuelto a incrementar tendiendo a situarse en valores similares a los de principios de siglo.

Siguiendo estos datos se plantea este escenario, modelado de la siguiente manera a través de un interruptor que permite elegir el escenario calculado.

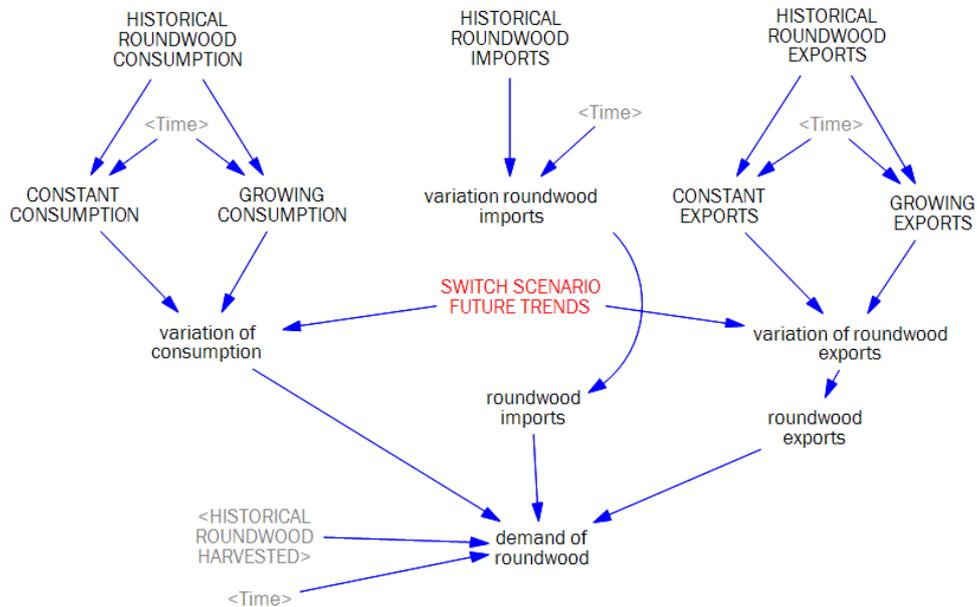


Figura 5.10. Modelado escenario SC1: TENDENCIAS DE FUTURO.
Fuente: elaboración propia

En él se evalúan tres posibles casos que se pueden dar atendiendo a variaciones en el consumo y las exportaciones de madera. En la siguiente tabla se recoge la información contemplada en este escenario.

INTERRUPTOR ESCENARIO 1 TENDENCIAS DE FUTURO	1	Proyección, consumo creciente y exportaciones constantes
	2	Proyección, consumo constante y exportaciones crecientes
	3	Proyección, consumo y exportaciones crecientes

Tabla 5.3. Casos escenario SC1, evaluación tendencias futuras

En la siguiente Figura 5.11, se refleja la evolución de la extracción de madera bajo las condiciones detalladas previamente para el primer escenario de tendencias de futuro.

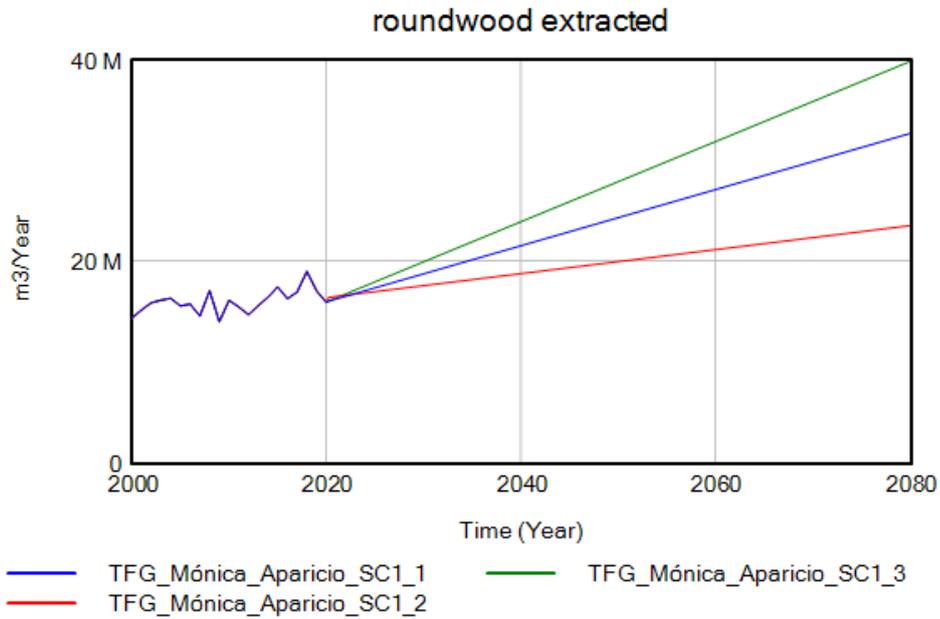


Figura 5.11. Evolución de la extracción de madera bajo el escenario SC1 (2000-2080).
Fuente: elaboración propia

5.2.2.3 Escenario 2 (SC2: Consumo calefactorio)

El siguiente escenario se plantea atendiendo al consumo de energía con fines calefactorios en el sector residencial en España. Según hemos analizado en el capítulo 4, Figura 4.5; para el año 2020, la estructura del consumo de energía para calefacción por las distintas tecnologías fue la siguiente.

El 31% de la energía consumida en 2020 (1772,086 ktep) fue obtenida de la biomasa, representando así la mayor fuente de energía para usos de calefacción en los hogares españoles. Esta fuente se encuentra seguida muy de cerca por el gas natural y el gasóleo que representan el 28,19 y 25,90 por ciento respectivamente con unos valores de 1609,169 y 1478,640 ktep. En valores más bajos se sitúa la energía eléctrica y el gas licuado de petróleo (GLP).

Partiendo de esta situación, se plantea un escenario en el cual se evalúe la posibilidad de sustituir al 100% de forma progresiva, el consumo de gas natural y gasóleo por sistemas de calefacción utilizando biomasa atendiendo a la disponibilidad de madera.

Para implementar este escenario es necesario cuantificar la cantidad de energía que se puede generar de la combustión de biomasa. Esta energía se puede calcular mediante el poder calorífico de la biomasa. Al conocer este valor, se puede determinar cuánta energía térmica se puede obtener al quemarla en procesos de generación de calor o energía. También se pueden realizar cálculos para dimensionar sistemas de calefacción, generación de vapor, cogeneración u otras aplicaciones que utilicen biomasa como combustible.

El poder calorífico de la biomasa varía según el tipo de biomasa y su composición. La biomasa puede consistir en diferentes materiales orgánicos, como madera, residuos agrícolas, residuos forestales, pellets de biomasa, entre otros. Cada tipo de biomasa tiene un poder calorífico específico.

El poder calorífico de la biomasa se puede expresar en dos formas diferentes: poder calorífico superior (PCS) y poder calorífico inferior (PCI). Estas dos medidas tienen en cuenta diferentes aspectos de la combustión de la biomasa y proporcionan información relevante para diferentes aplicaciones.

- **Poder calorífico superior (PCS):** Es la cantidad total de calor liberado durante la combustión de la biomasa, teniendo en cuenta la condensación del vapor de agua producido durante el proceso de combustión. Incluye el calor latente de condensación del agua generado por la combustión.
- **Poder calorífico inferior (PCI):** Consiste en el calor realmente aprovechable (producido sin tener en cuenta la energía de la condensación del agua y otros

procesos). El PCI es el calor efectivo disponible para la producción de energía térmica durante la combustión. (Energía, 2008)

Tanto el PCS como el PCI se suelen expresar en megajulios por kilogramo (MJ/kg) o megavatios-hora por tonelada (MWh/t).

Se ha definido un valor medio para el poder calorífico superior (PCS) de 20 MJ/kg al 0% de humedad según los datos proporcionados por CIEMAT para diferentes provincias. (20 es un valor promedio de todas las provincias españolas).

Los rendimientos se han calculado suponiendo un contenido de humedad del material del 40%, acorde al promedio nacional para los distintos tipos de restos forestales. El material húmedo experimenta por tanto una pérdida de productividad de toneladas de (1-X) siendo X la humedad de la biomasa expresada en base húmeda.

Se empleará la normativa UNE 164001EX para el cálculo del poder calorífico inferior (PCI) a una humedad determinada.

$$PCI (h\%) = \frac{PCSO \cdot 1000 \cdot (1 - X) - 11,27 \cdot X\% - 1,322}{1000}$$

$$PCI (h = 40\%) = \frac{20 \text{ MJ/kg} \cdot 1000 \cdot (1 - 0,4) - 11,27 \cdot 0,4 - 1,322}{1000}$$

$$PCI (h = 40\%) = 11,99417 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \approx 12 \text{ MJ/kg}$$

Una vez conocido el poder calorífico de la biomasa, partiremos de los datos históricos conocidos de consumo de GN y gasóleo, obteniendo un valor medio y mediante las conversiones energéticas correspondientes incorporaremos el escenario de forma lineal a partir del año 2020.

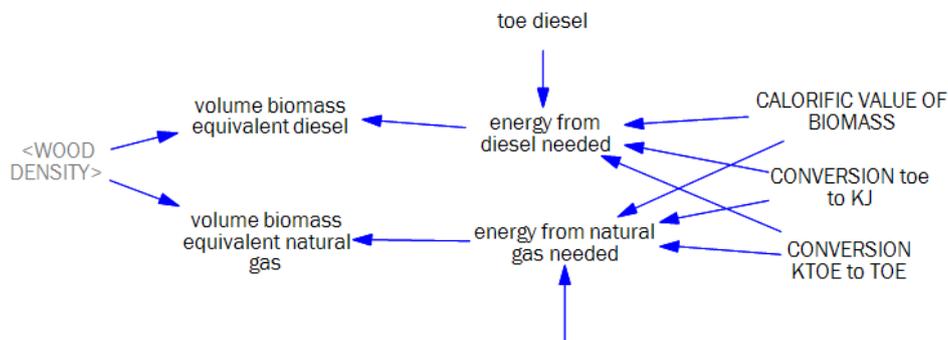


Figura 5.12. Implementación escenario SC2 CONSUMOS CALEFACTORIOS. Fuente elaboración propia

Según los gastos energéticos disponibles para el año 2020 tras hacer los cálculos, el volumen de madera necesario para cubrir esta demanda se sitúa en torno a los 8,63 y 8,31 millones de m³ de madera.

De esta manera, se incluye mediante modelado, este escenario SC2 de igual forma que el escenario anterior, implementado mediante un interruptor que regula tres casos posibles.

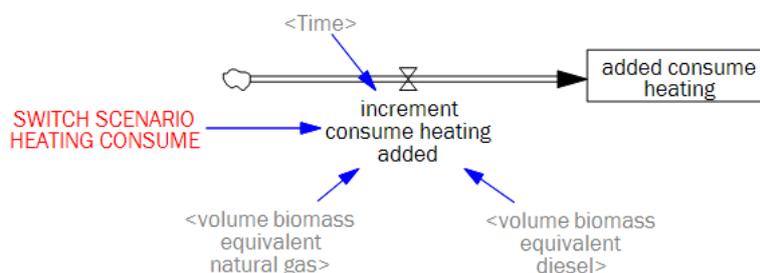


Figura 5.13. Modelado escenario SC2 CONSUMO CALEFACTORIO.
Fuente: elaboración propia

En la siguiente tabla se recoge la información contemplada en este escenario.

INTERRUPTOR ESCENARIO 2 CONSUMO CALEFACTORIO	1	Proyección, resultado de sustituir el consumo calefactorio de gas natural por biomasa
	2	Proyección, resultado de sustituir el consumo calefactorio de diésel por biomasa
	3	Proyección, resultado de sustituir el consumo calefactorio de gas natural y diésel por biomasa

Tabla 5.4 Casos escenario SC2, evaluación consumos calefactorios

En la siguiente Figura 5.14 Figura 5.11, se refleja la evolución de la extracción de madera bajo las condiciones detalladas previamente para el escenario SC2.

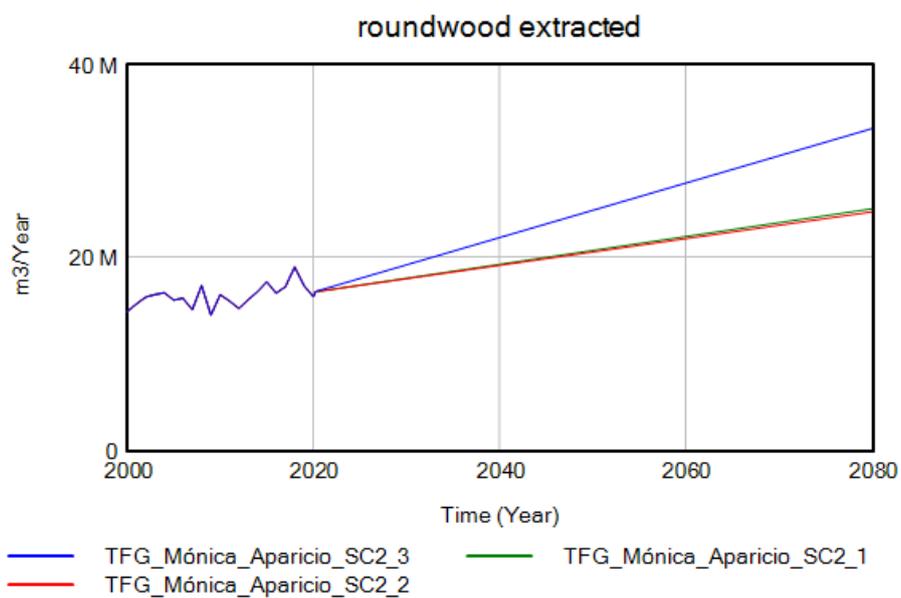


Figura 5.14. Evolución de la extracción de madera bajo el escenario SC2 (2000-2080).
Fuente: elaboración propia

6. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

6.1 RESULTADOS

6.1.1 Resultados escenario base (SC0)

Sobre un escenario base, se llevará a cabo una simulación del modelo. Se trata de un escenario en el cual la evolución de las variables dependientes futuras se caracteriza por adoptar valores medios y constantes de acuerdo con los datos históricos. A continuación, se presentan las gráficas que reflejan la evolución de las principales variables que reflejan el potencial disponible.

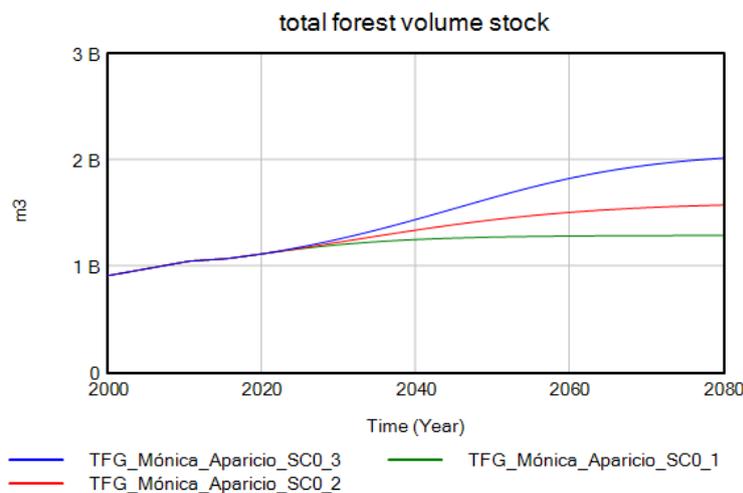


Figura 6.1. Evolución volumen forestal total, escenario SC0, 2000-2080.
Fuente: elaboración propia

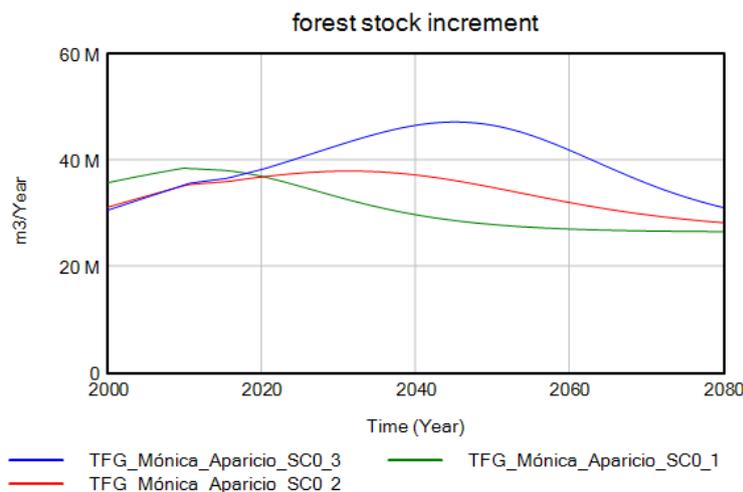


Figura 6.2. Evolución incremento del stock anual, escenario SC0, 2000-2080.
Fuente: elaboración propia

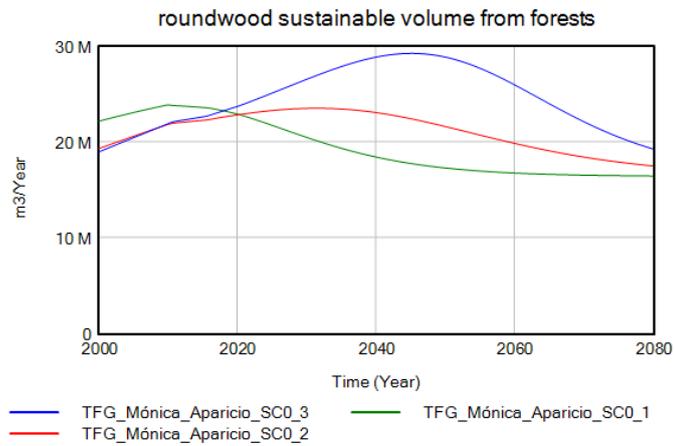


Figura 6.3. Evolución madera total disponible, escenario SC0, 2000-2080.
Fuente: elaboración propia

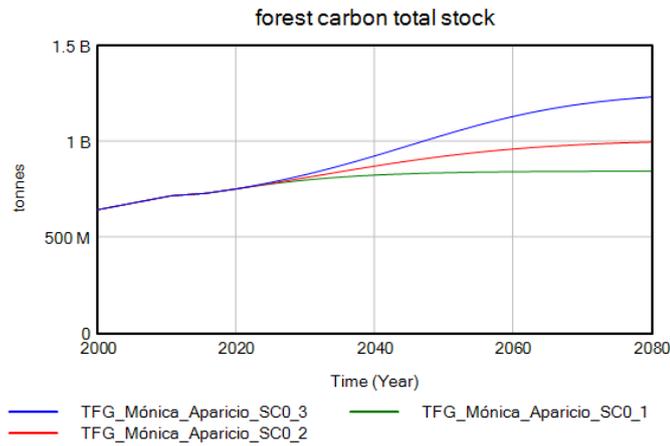


Figura 6.4. Evolución stock carbono forestal total, escenario SC0, 2000-2080.
Fuente: elaboración propia

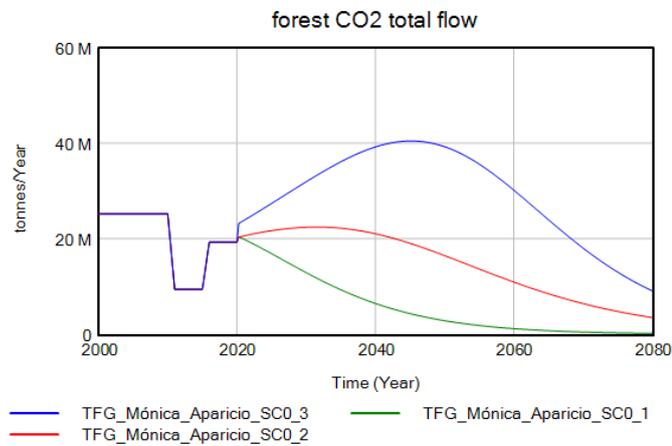


Figura 6.5. Evolución absorciones de CO₂, escenario SC0, 2000-2080.
Fuente: elaboración propia

Esta primera simulación nos permite comprobar la evolución de los distintos stocks de madera. De acuerdo con el último Inventario Forestal Nacional (2008), el crecimiento anual del stock de bosques se sitúa por encima de los 30 millones de m³ de madera. Según el modelo que hemos desarrollado y los resultados que hemos obtenido, los tres casos responden adecuadamente a esta dinámica. Además, los datos históricos de volumen de stock de madera que conocemos hasta 2020 se corresponden con los valores simulados. Si analizamos los resultados a partir de 2020, podemos ver las tres dinámicas muy diferenciadas.

Para el primer caso de estudio en el que el stock máximo es de 80 m³/ha, los valores máximos tanto de stock como de crecimiento se alcanzan en los primeros años de simulación. Esto nos hace indicar que la regeneración natural de los bosques estaría alcanzando valores máximos.

Si evaluamos los dos siguientes casos (SC0_2 y SC0_3) en los cuales las estimaciones son más flexibles y reflejan que la biomasa arbórea tiene un horizonte de crecimiento superior al 50% de los niveles actuales, el punto de equilibrio en cuanto al crecimiento de stock se sitúa más avanzado en el tiempo.

La dinámica que reflejan los tres resultados tiende a ser la adecuada dentro de los límites forestales, sin embargo; el ritmo en el que se dan es distinto por lo que el instante en el cual se dan situaciones destacables es complejo de determinar con determinación. Son veinte los años de diferencia por cada caso de estudio en los que se logra alcanzar el punto de equilibrio en el volumen total disponible.

Aun así, en cualquiera de los tres casos, el ritmo de extracción (que se sitúa en valores próximos a los actuales de 15 millones de m³) no es suficiente como para disminuir drásticamente los valores de madera disponible y provocar una falta de disponibilidad en un plazo largo.

Por otro lado, la situación de los bosques como almacén de carbono y sumideros de CO₂ tiende a alcanzar valores máximos a corto plazo y a partir de ahí a disminuir su aportación.

6.1.2 Resultados escenario SC1, tendencias de futuro

A continuación, se va a analizar este escenario que evalúa las posibles tendencias futuras partiendo de los dos escenarios menos y más favorables estudiados anteriormente. Esto implica simular el escenario SC0_1 y SC0_3 para cada casuística contemplada en este escenario. En la siguiente tabla se refleja un resumen.

EVALUACIÓN ESCENARIOS	Simulación escenario base	Simulación escenario actual (Tendencias de futuro, SC1)
	SC0_1 máximo stock 80 m ³ /ha	fut_1 - Proyección, consumo creciente y exportaciones constantes
		fut_2 - Proyección, consumo constante y exportaciones crecientes
		fut_3 - Proyección, consumo y exportaciones crecientes
	SC0_3 máximo stock 125m ³ /ha	fut_1 - Proyección, consumo creciente y exportaciones constantes
		fut_2 - Proyección, consumo constante y exportaciones crecientes)
fut_3 - Proyección, consumo y exportaciones crecientes		

Tabla 6.1. Resumen escenario de evaluación tendencias futuras (SC1)

STOCK MÁXIMO 80 m³/ha (SC0_1):

Los siguientes resultados corresponden al estudio del caso SC0_1 (con el stock máximo fijado en 80m³/ha).

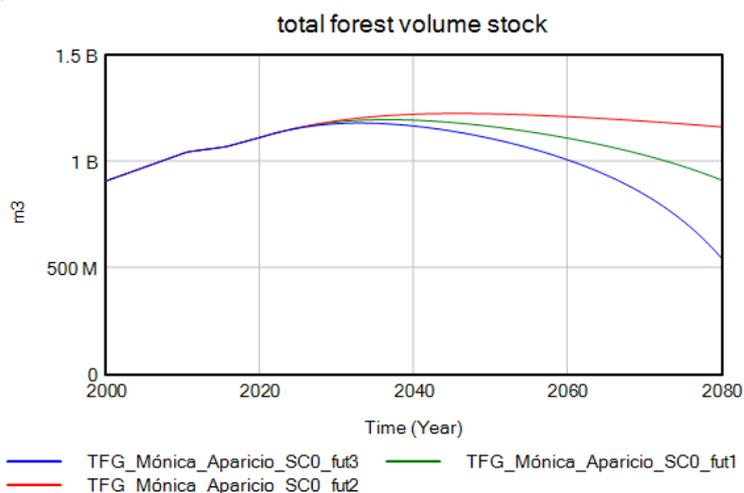


Figura 6.6. Evolución stock forestal total, escenario SC1, 2000-2080.
Fuente: elaboración propia

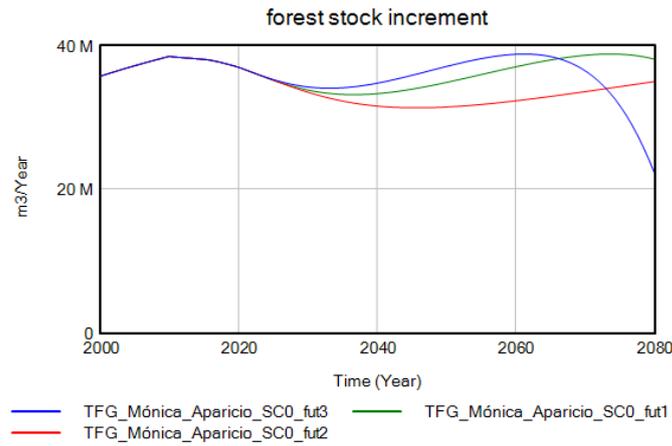


Figura 6.7. Evolución incremento del stock anual, escenario SC1, 2000-2080.
Fuente: elaboración propia

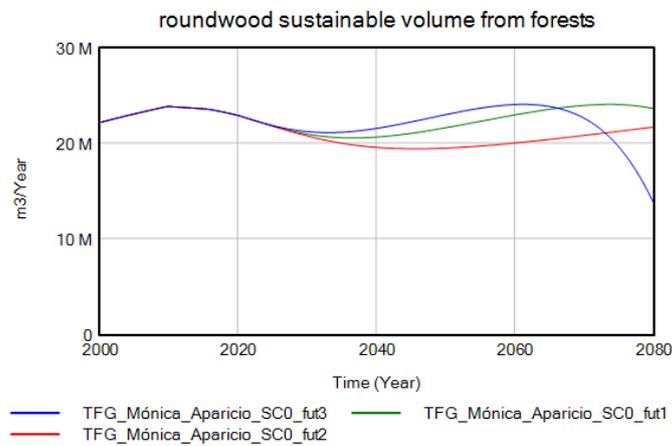


Figura 6.8. Evolución madera total disponible, escenario SC1, 2000-2080.
Fuente: elaboración propia

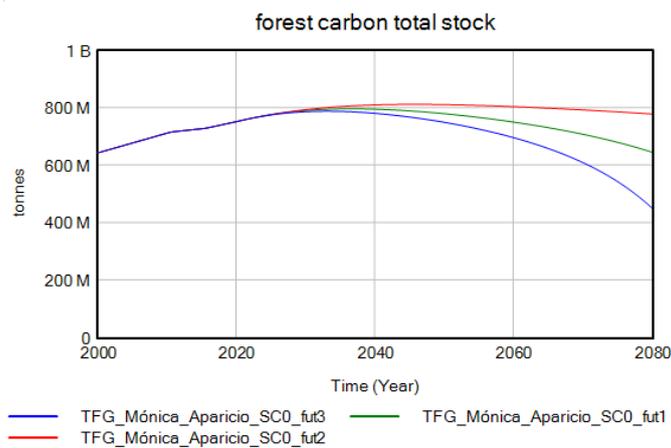


Figura 6.9. Evolución stock carbono forestal total, escenario SC1, 2000-2080.
Fuente: elaboración propia

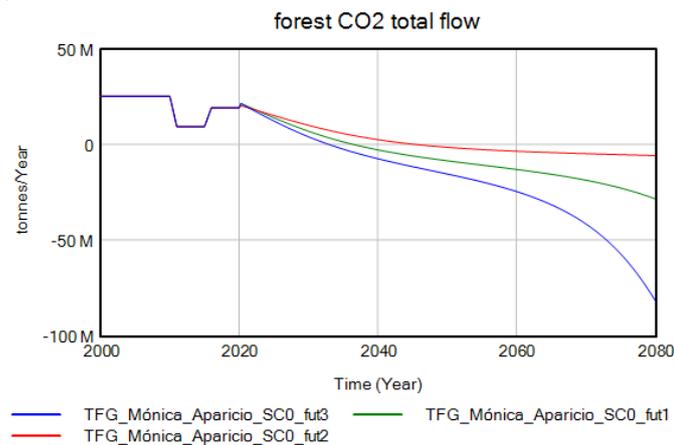


Figura 6.10. Evolución absorciones de CO₂, escenario SC1, 2000-2080.
Fuente: elaboración propia

Los tres resultados obtenidos tras aplicar las tres tendencias futuras muestran una tendencia de stock alejada de la existente en los primeros años de simulación. En los dos primeros casos, donde solo incrementa o bien el consumo o bien las exportaciones, el stock de madera tiende a disminuir, pero el crecimiento anual se encuentra en valores altos por lo que compensa ligeramente esta caída en el stock. No sucede lo mismo en el caso en el que los valores de demanda de madera alcancen valores muy altos, por encima de los 30 millones de m³. Para este caso el potencial disponible cae drásticamente y el ritmo de crecimiento de los bosques no logra compensar la extracción de madera.

STOCK MÁXIMO 125 m³/ha (SC0_3)

Vamos a comprobar estos mismos escenarios sobre el segundo caso de estudio (SC0_3) mostrado en la Tabla 6.1, donde el crecimiento de los bosques puede alcanzar niveles más elevados alcanzando un stock máximo de 125 m³/ha.

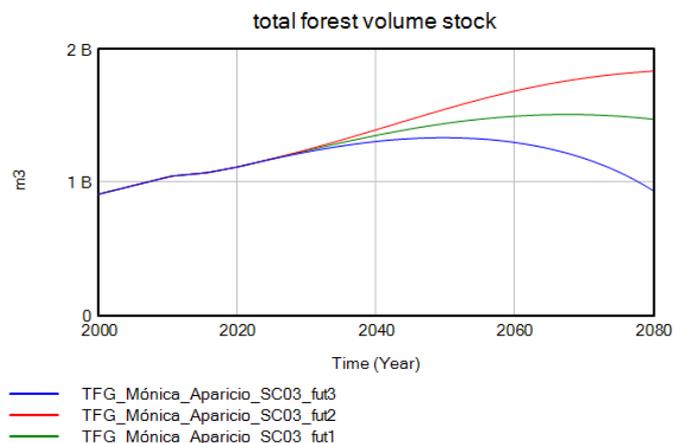


Figura 6.11. Evolución stock forestal total, escenario SC1, 2000-2080.
Fuente: elaboración propia

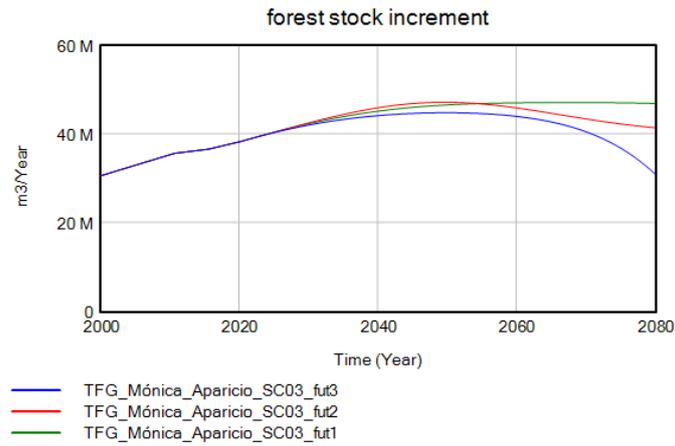


Figura 6.12. Evolución incremento del stock anual, escenario SC1, 2000-2080.
Fuente: elaboración propia

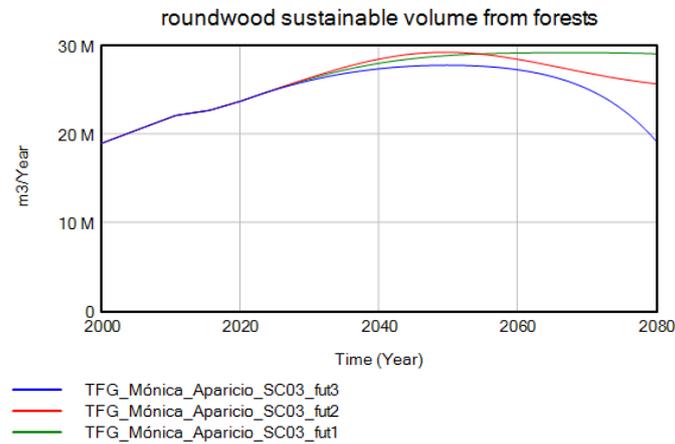


Figura 6.14. Evolución madera total disponible, escenario SC1, 2000-2080.
Fuente: elaboración propia

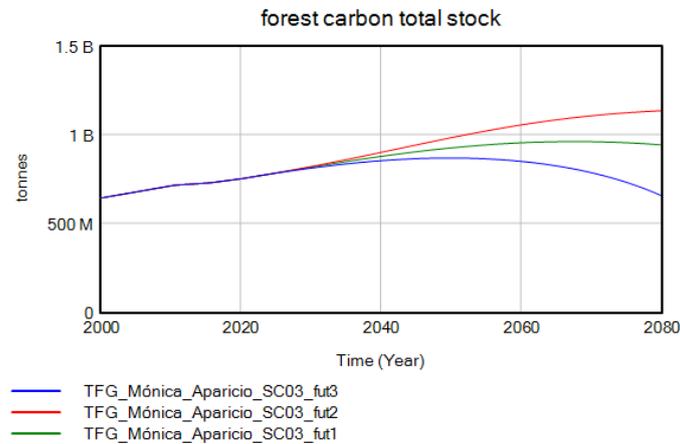


Figura 6.13. Evolución stock carbono forestal total, escenario SC1, 2000-2080.
Fuente: elaboración propia

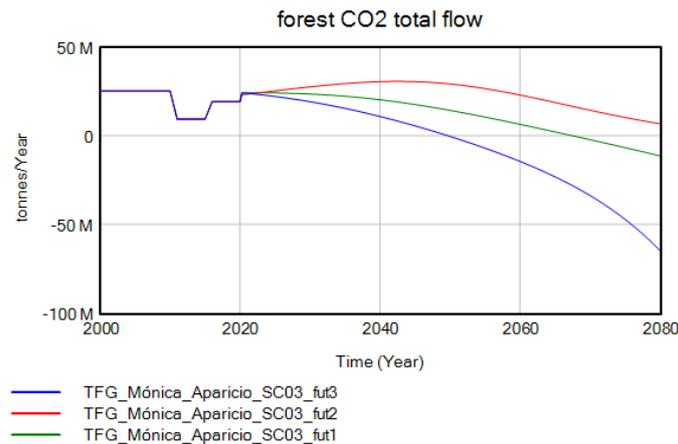


Figura 6.15. Evolución absorciones de CO₂, escenario SC1, 2000-2080.
Fuente: elaboración propia

Bajo estas condiciones de crecimiento de los bosques, la situación referente al potencial disponible es algo más favorable que en caso anterior. Sin embargo, hay valores de extracción que son demasiado elevados y ante este límite de crecimiento tampoco son viables de alcanzar. Igual que para el caso anterior, valores de extracción por encima de los 30 millones de m³, provocarían una caída en el stock irreversible. En el caso de situarse en torno a los 20 millones de m³, la situación en cuanto a la disponibilidad de madera baja y habría que analizar en el largo plazo si una extracción continuada de estos niveles podría garantizar una disponibilidad de madera que lograse un equilibrio.

Por otro lado, resulta interesante ver la Figura 6.15 que muestra el efecto que este consumo tiene directamente sobre el cambio climático. Según el escenario menos desfavorable, para el año 2050 los bosques dejarían de ser sumideros de carbono para convertirse en emisores. Una situación que también podría darse de forma más lenta para el resto de los escenarios.

Tras analizar esta extracción (Figura 5.11), hemos podido comprobar cómo para la primera y tercera extracción (fut_1 y fut_3) los valores resultan demasiado elevados, por lo que a partir de ahora nos centraremos en evaluar el siguiente escenario, partiendo de la situación (fut_2) en la que el incremento del consumo es más lento, siendo así una situación más favorable para el bosque.

6.1.3 Resultados escenario SC2, consumos calefactorios

De esta manera, según hemos estudiado, analizaremos este escenario teniendo en cuenta que el consumo se sitúa en valores de crecimiento muy ligeros siguiendo la siguiente tendencia.

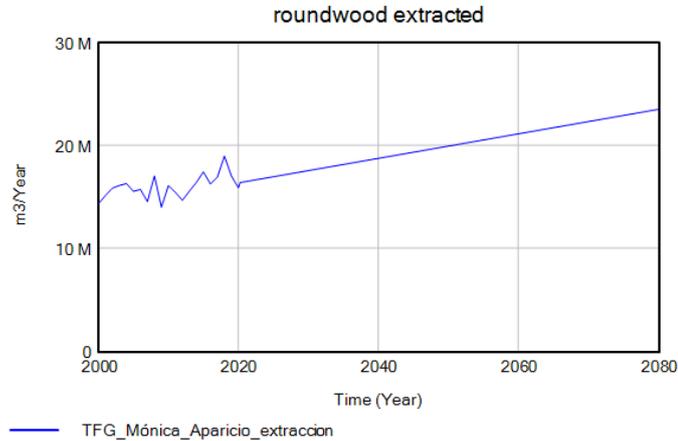


Figura 6.16. Evolución de la extracción fijada (2000-2080).
Fuente: elaboración propia

A partir de esta extracción, evaluaremos este escenario de consumos calefactorios según las condiciones detalladas previamente (Ver condiciones en Tabla 5.4). Según lo indicado, existen tres posibles tendencias de extracción llevadas a cabo que son las reflejadas en la siguiente figura.

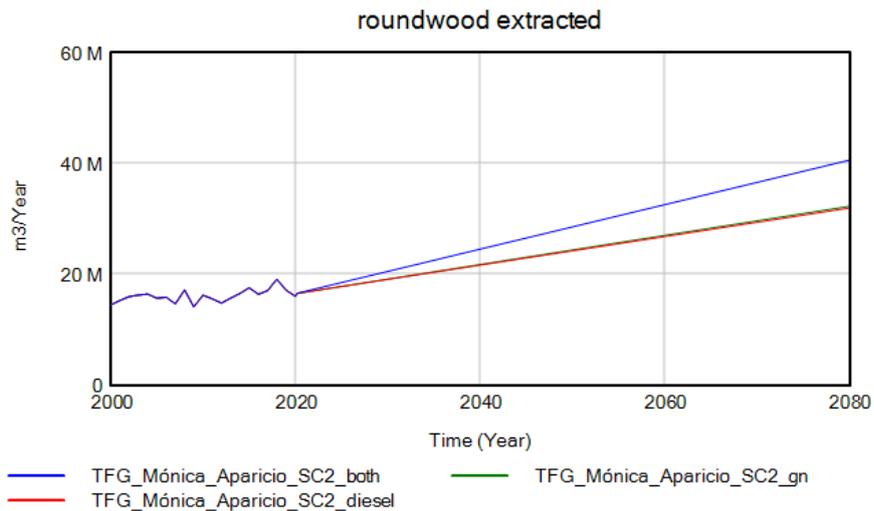


Figura 6.17. Evolución de la extracción bajo las condiciones contempladas en el escenario SC2 (2000-2080).
Fuente: elaboración propia

Evaluaremos cada una de las tres tendencias de extracción para los dos límites de crecimiento de stock vistos anteriormente. A continuación, se muestra un resumen de las simulaciones.

EVALUACIÓN ESCENARIOS	Simulación escenario base	Simulación escenario actual (Consumos calefactorios, SC2)
	SCO_1 máximo stock 80 m ³ /ha	GN - Proyección, resultado de sustituir el consumo calefactorio de gas natural por biomasa
		DIESEL- Proyección, resultado de sustituir el consumo calefactorio de diésel por biomasa
		AMBOS - Proyección, resultado de sustituir el consumo calefactorio de gas natural y diésel por biomasa
SCO_3 máximo stock 125m ³ /ha	GN - Proyección, resultado de sustituir el consumo calefactorio de gas natural por biomasa	
	DIESEL - Proyección, resultado de sustituir el consumo calefactorio de diésel por biomasa	
	AMBOS - Proyección, resultado de sustituir el consumo calefactorio de gas natural y diésel por biomasa	

Tabla 6.2. Resumen condiciones a simular en el escenario SC2, consumos calefactorios

STOCK MÁXIMO 80 m³/ha (SCO_1)

Los siguientes resultados corresponden al estudio del caso SCO_1 (con el stock máximo fijado en 80m³/ha).

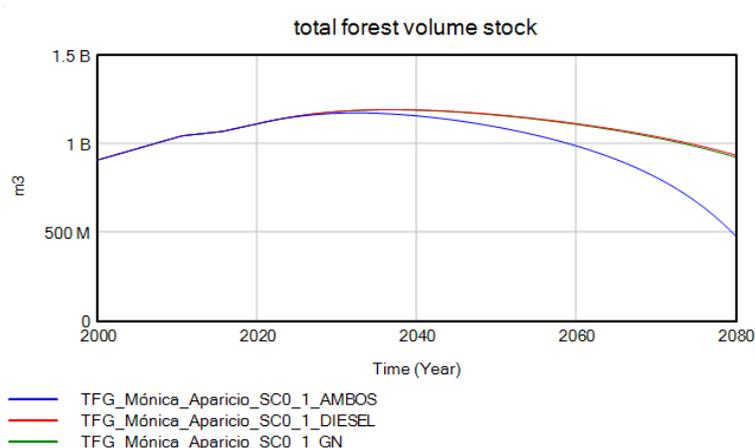


Figura 6.18. Evolución stock forestal total, escenario SC2, 2000-2080
Fuente: elaboración propia

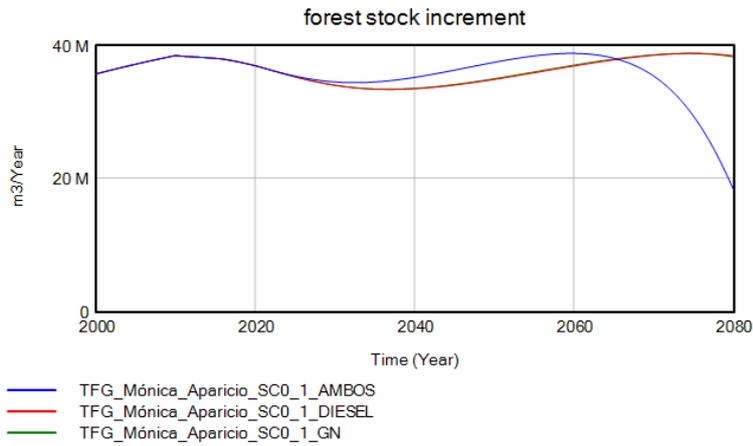


Figura 6.19. Evolución incremento del stock anual, escenario SC2, 2000-2080.
Fuente: elaboración propia

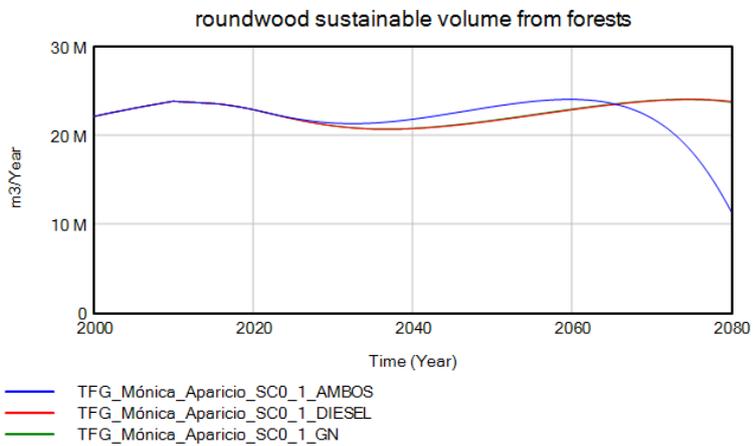


Figura 6.20. Evolución madera total disponible, escenario SC2, 2000-2080.
Fuente: elaboración propia

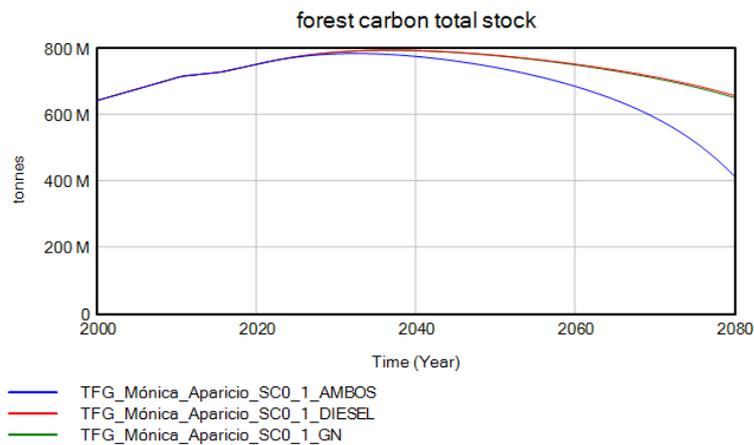


Figura 6.21. Evolución stock carbono forestal total, escenario SC2, 2000-2080.
Fuente: elaboración propia

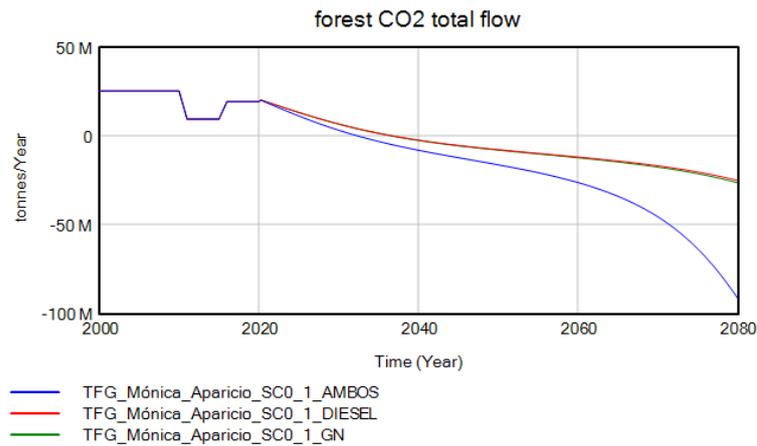


Figura 6.22. Evolución absorciones de CO₂, escenario SC2, 2000-2080.
Fuente: elaboración propia

Estos primeros resultados obtenidos bajo este escenario reflejan una situación de pérdida de stock en los tres casos. Una sustitución de sustitución completa de ambas tecnologías es inviable en el tiempo ya que la caída del stock es muy brusca y provoca que el crecimiento no pueda compensar esta caída. En el caso de que queramos sustituir una de las dos tecnologías de abastecimiento energético en calefacción, la situación es más favorable. Aun así, es compleja ya que si el consumo añadido también aumenta podrá complicarse la regeneración de los bosques.

STOCK MÁXIMO 125 m³/ha (SC0_3)

Los siguientes resultados corresponden al estudio del caso SC0_3 (con el stock máximo fijado en 125 m³/ha).

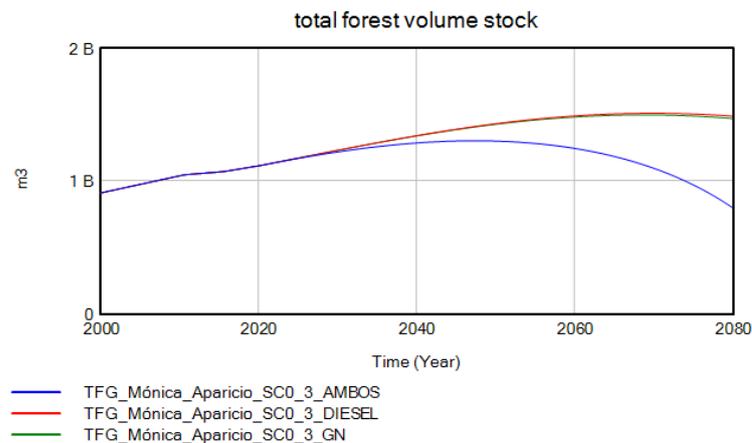


Figura 6.23. Evolución stock forestal total, escenario SC2, 2000-2080
Fuente: elaboración propia

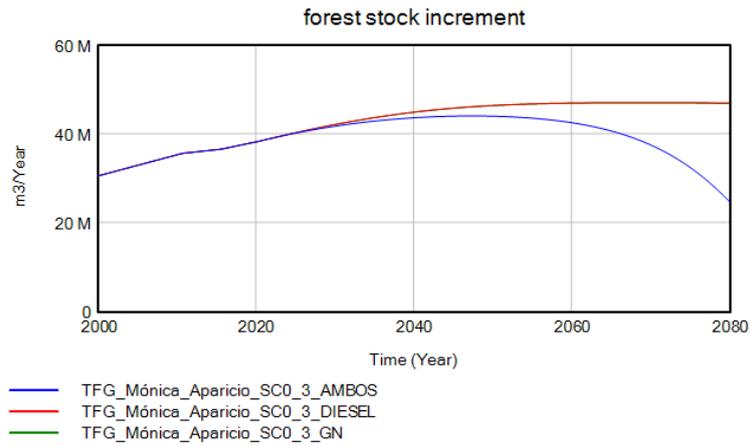


Figura 6.24. Evolución incremento del stock anual, escenario SC2, 2000-2080.
Fuente: elaboración propia

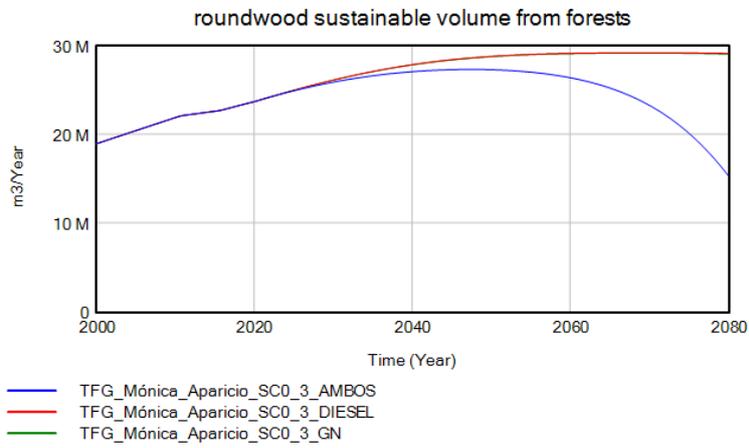


Figura 6.25. Evolución madera total disponible, escenario SC2, 2000-2080.
Fuente: elaboración propia

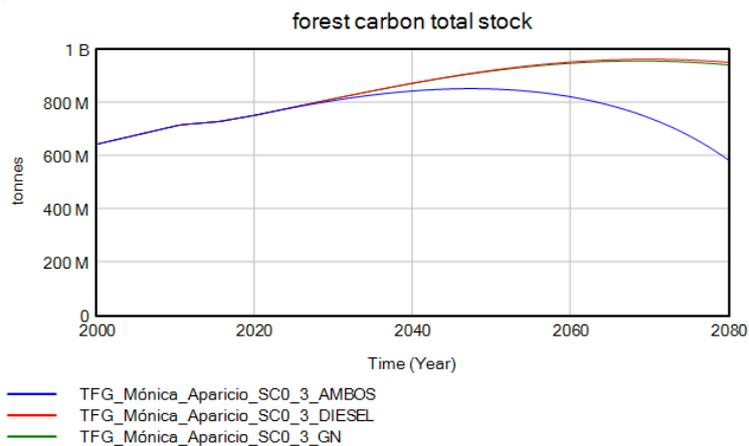


Figura 6.26. Evolución stock carbono forestal total, escenario SC2, 2000-2080.
Fuente: elaboración propia

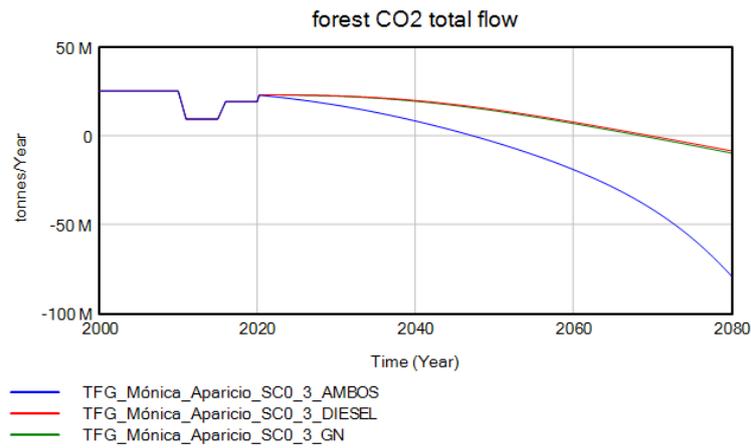


Figura 6.27. Evolución absorciones de CO₂, escenario SC2, 2000-2080.
Fuente: elaboración propia

Bajo estas condiciones de crecimiento de los bosques, la situación referente al potencial disponible es algo más favorable que en caso anterior. Sin embargo, al igual que sucede en el caso anterior, una sustitución total de ambas tecnologías en el tiempo es prácticamente inviable. Una sustitución de una de las dos tecnologías parece una opción posible si tenemos en cuenta que se logra cierto equilibrio en los valores de crecimiento y volumen disponible. Los valores de extracción de madera para abarcar esta situación se encuentran cerca de los 30 millones de m³ por lo que quizás esta situación prolongada en el tiempo puede ser insostenible.

6.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

El primer análisis surge de evaluar bajo el escenario base (SPO) la situación forestal existente. En esta línea, bajo este escenario, podemos ver la dinámica de los recursos forestales y cómo las distintas variables afectan a su evolución. De esta manera, fijando una extracción de madera en torno a los 15 millones de m³ extraídos, el crecimiento anual se sitúa por encima de los 30 millones de m³. Estos primeros resultados, más allá de valores concretos, muestran una realidad que es la gran disponibilidad de reservas forestales existentes. En el capítulo 4, ya reflejábamos un gran aumento en las existencias de árboles, tendencia que hemos podido comprobar en este primer escenario con unos crecimientos muy parecidos. Tras analizar este escenario para los tres casos de estudio resultado de variar el stock máximo por unidad de área alcanzable en la geografía española, podemos ver cómo los tres tienden a alcanzar una situación de equilibrio. Este punto está condicionado a los límites que las diversas especies forestales puedan tener, pero mediante este primer análisis podemos ver posibles comportamientos.

Analizando los resultados obtenidos tras aplicar el primer escenario (SC1) que evalúa los consumos de madera que se pueden dar en el futuro, podemos ver comportamientos que marcarán una posible evolución futura. Si analizamos el primer escenario donde el crecimiento natural máximo de los bosques puede lograrse en un tiempo cercano, una tendencia de extracción que simule el crecimiento en el consumo y las exportaciones puede provocar una caída en las reversas forestales que provoque una pérdida difícil de recuperar. Comparando estos valores con el primer escenario en el cual la demanda permanece constante sobre los 15 millones de m³, podemos ver cómo ahora la situación cambia, ya que el aumento en la extracción es demasiado para intentar lograr una situación de equilibrio que garantice la sostenibilidad.

En el caso en que el crecimiento de los bosques tenga un límite más lejano y se puedan alcanzar niveles de volumen por hectárea más elevados como sucede en algunos países europeos, los resultados son algo más favorables. Los niveles de extracción pueden incrementarse ligeramente sobre los niveles actuales, pero en ningún caso superar el doble de la extracción actual. Aun así, estas simulaciones están implementadas siguiendo una tendencia lenta en el tiempo, por lo que, si se produce un cambio muy significativo en un espacio temporal muy corto, el stock se va a ver reducido de forma drástica y los cambios van a ser mucho más inmediatos.

Bajo este primer escenario, podemos ver cómo la extracción de madera que se ha estado llevando a cabo durante estos años pasados es sostenible para garantizar el crecimiento de los bosques. Sin embargo, viendo su evolución desde principios de siglo hasta ahora, donde se ha incrementado un 20% la extracción en los últimos veinte años resulta un valor inquietante ya que, un incremento de este

valor para los próximos 20 años nos situaría en niveles de extracción cercanos a los 20 millones de m³ y quizás el límite alcanzado por los bosques no podría soportar una situación prolongada con estos valores.

Siguiendo con el análisis de los escenarios, el siguiente que hemos incorporado es el que evalúa la situación calefactora de los hogares españoles. Si bien es cierto que las estimaciones hechas pueden sufrir variaciones ya que existen muchos condicionantes como los rendimientos y posibles pérdidas energéticas, este escenario puede hacernos una día de los valores de madera que podríamos necesitar. Bajo la situación más desfavorable de crecimiento máximo del stock en volumen, la situación refleja cómo una sustitución total del gas natural y gasóleo es inviable. Una sustitución de una de ellas puede ser interesante de valorar siempre y cuando el consumo de madera que se pueda dar en otros sectores no exceda mucho en cantidad.

Lo mismo sucede para el caso en el que hemos establecido un límite de stock máximo mayor. La sustitución de ambas tecnologías por el uso de biomasa forestal existente es incompatible, sin embargo, podría estudiarse valorar una sustitución progresiva de una de las dos tecnologías. La idea es intentar lograr una situación de equilibrio en el consumo global que se hace de la madera. Para ello hay que tener en cuenta todos los usos que se hace de ella porque sí que es posible llegar a un buen uso sostenible en varios sectores.

Como hemos visto, el modelo presenta varias situaciones atendiendo a esta diferencia de stock máximo que hemos valorado. Es por ello por lo que presenta limitaciones y precisa de un análisis por parte de sectores expertos en la materia. Es importante mencionar que hay una falta de datos actualizados sobre los límites de este ecosistema además de información acerca de la biomasa dentro de los límites forestales.

6.3 CONCLUSIONES DEL TRABAJO

En este trabajo se ha llevado a cabo una investigación amplia para integrar todos los aspectos posibles para el estudio del potencial sostenible en los bosques españoles. Después del estudio en la literatura y bibliografía, hemos podido comprobar la realidad sobre la importancia que los ecosistemas forestales tienen en el mundo. Más allá de esta importante labor como parte del ciclo de vida, resulta muy destacable su función como medio sostenible para ser utilizados como recursos energéticos.

Desde hace ya varios años, se vienen desarrollando una gran cantidad de proyectos y estudios renovables que incluyen la energía eólica y solar como fuentes determinantes para lograr una transición energética que logre una reducción en las emisiones y la dependencia hacia el uso de combustibles fósiles. Sin embargo, la gran intermitencia y la falta de capacidad de almacenamiento que estas tecnologías ofrecen marcan el provenir de este cambio. En esta línea, la biomasa aparece como alternativa renovable que puede ayudar. Una parte fundamental de estos recursos renovables radica en la biomasa forestal existente. A diferencia de lo que está sucediendo en otras partes del mundo, donde en algunos lugares la situación de los bosques es crítica, en España la situación forestal es más favorable. Esta ventaja si no es gestionada de forma adecuada, puede convertirse en un problema ya que en los últimos años el abandono de tierras y zonas rurales ha sido un aliciente en la propagación de los incendios forestales. De esta forma, evaluar la situación resulta interesante para gestionar y mejorar los recursos de los cuales disponemos.

Para desarrollar este trabajo se ha optado por desarrollar un modelo que permita evaluar estos posibles cambios. El modelo desarrollado en Vensim, parte de los principios de la dinámica de sistemas con la idea de integrar estos conceptos en el estudio de la materia. En primer lugar, se ha llevado a cabo una labor importante de revisión bibliográfica para conocer la situación y poder construir este modelo. A partir de aquí, la revisión nos ha permitido aproximar un primer prototipo que a base de la experimentación hemos podido mejorar. Sin embargo, es destacable la falta de modelos globales sobre el potencial sostenible de los bosques, así como de la dificultad para encontrar datos precisos sobre ellos. Aun así, una parte esencial en la elaboración de este proyecto se basa en la recopilación, análisis y tratamiento de los datos históricos disponibles. La comparación de estos datos históricos con los primeros resultados de nuestro modelo resulta clave para detectar errores en el mismo o posibles comportamientos irreales. El proceso de modelar es complejo y en estas ocasiones se puede comprobar cómo hay que modificar muchos aspectos hasta conseguir un modelo robusto y completo.

En esta línea hemos conseguido realizar una primera aproximación del modelo cuyos objetivos hemos perseguido en este trabajo. Se trata de un primer paso que permite relacionar un IAM como es el proyecto MODESLOW con modelos de bosques, pero es preciso trabajar con investigadores de otras áreas para ajustar parámetros más concretos y de ahí el abanico de escenarios que hemos contemplado.

Una vez hemos conseguido obtener un modelo razonable, uno de los objetivos principales es el de evaluar escenarios que puedan responder a una posible evolución futura. En esta línea hemos evaluado posibles tendencias según varios criterios. Uno de los primeros resultados que obtenemos de estas simulaciones se trata de la disponibilidad de biomasa forestal existente. Hemos podido comprobar las estimaciones que el IDAE hace en torno a las 18 toneladas de biomasa disponible al año. Esta disponibilidad de recursos viene creciendo desde principios de siglo y tiende a continuar a corto-plazo. Por otro lado, hemos evaluado situaciones referentes a consumos que se pueden dar. Todas ellas están implementadas desde el punto menos radical de tal forma que reflejen lo más cerca posible la realidad. El modelo desarrollado refleja la importancia que el crecimiento de stock tiene para conservar los niveles de disponibilidad sostenible. De esta manera resulta interesante analizar las tendencias de extracción para buscar un punto de equilibrio que favorezca esta disponibilidad.

Por otro lado, hemos evaluado una situación interesante referente al consumo energético. Partiendo de los datos históricos de los consumos en el sector residencial, hemos conocido las principales tecnologías que forman parte de este consumo. La biomasa representa la principal forma energética de uso por encima de otras no renovables. Estudios recientes hablan de un incremento importante en los últimos años en el uso de la leña. El aumento en los precios de la electricidad y el gas han ayudado a optar por este método energético. De esta forma, hemos evaluado la casuística de que paulatinamente sustituyéramos el gas natural y el gasóleo por biomasa residual arbórea. Las simulaciones muestran un incremento importante en la extracción de madera para suplir esta demanda que alejaría a largo plazo una situación de equilibrio sostenible en los bosques españoles. De esta manera sería interesante estudiar bien la demanda necesaria para no provocar un descenso drástico del stock de bosques que provocaría la irreversibilidad de la situación.

En líneas generales, los resultados obtenidos son bastantes cautos ya que sería preciso contar con la aprobación de otros expertos para valorar algunas estimaciones llevadas a cabo y que por tanto puedan evaluar la situación que se puede dar en los próximos años. Cabe destacar que muchas de las variables adoptadas se han calculado siguiendo un promedio para la geografía española. No obstante, las condiciones ambientales y climatológicas que se puedan dar en el futuro van a tener una influencia muy destacable en ellas. No hay duda de que, como

recursos naturales dentro de nuestro planeta, los bosques son una parte esencial y fundamental de la vida por lo que gestionarlos de forma adecuada mejorará el equilibrio ambiental, social y económico de nuestro futuro.

6.4 LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO

El presente trabajo se ha desarrollado dentro de un grupo de investigación, formando parte de un proyecto más amplio. Es por ello, que muchos de los enfoques de estudio futuros van orientados a completar los objetivos globales del proyecto.

De esta manera, el módulo desarrollado en este trabajo que estudia el ecosistema forestal debe enmarcarse dentro del módulo general del proyecto que recoge los usos de la Tierra. Este trabajo corresponde a una primera aproximación en el estudio de evaluar la dinámica futura de los bosques españoles. Es por ello, que dentro del grupo de investigación se va a seguir trabajando en él junto con gente experta en el ámbito forestal para mejorar los resultados. En este ámbito, la información disponible pública es muy limitada de ahí muchas de las limitaciones que hemos tenido en el trabajo.

En esta línea, un área para trabajar sería el estudio de los cambios en el uso del suelo de la geografía española. En los últimos años, la superficie forestal apenas ha cambiado por lo que no hemos prestado atención en este trabajo, pero sería interesante ampliar el modelo realizado en este TFG, a un modelo en el que se incluya un análisis en los cambios del uso de la tierra.

En el contexto del estudio de la generación renovable y sus limitaciones, hemos realizado un pequeño estudio sobre la biomasa como fuente renovable de energía y experimentado ante diversos escenarios posibles tendencias futuras. Para completar este estudio, podría llevarse a cabo una investigación sobre la tasa de retorno energético (EROI) de esta tecnología renovable, y así evaluar la cantidad de energía utilizable por cada unidad de energía aportada. En un primer enfoque inicial sobre este trabajo, se planteó la posibilidad de llevar a cabo este estudio. Sin embargo, se trata de un trabajo complejo ya que se deben llevar a cabo cálculos que involucran muchas variables además de realizar un análisis complejo del ciclo de vida de muchos equipos.

Por último, en una fase futura se pueden probar más escenarios que evalúen otras circunstancias ambientales, energéticas o incluso económicas. Este modelo está abierto a una posible modificación en un futuro para incorporar otras variables con las que se quiera experimentar.

7. REFERENCIAS

Ameztegui, A., Rodrigues, M., & Granda, V. (2022). Uncertainty of biomass stocks in Spanish forests: a comprehensive comparison of allometric equations. *European Journal of Forest Research*, 141, 395–407.

Buongiorno, J., Turner, J., & Zhu, S. (2006). An economic model of international wood supply, forest stock and forest area change. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 73-86.
doi:<https://doi.org/10.1080/02827580500478506>

Campano Méndez, M. (2021). *Modelado de los cambios de uso de la tierra mediante Dinámica de Sistemas para su integración en el modelo WILLIAM*. Obtenido de <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/48005>

Capellán-Pérez, Í. (2016). Obtenido de https://addi.ehu.es/bitstream/handle/10810/19438/TESIS_CAPELLAN_PEREZ_I%c3%91IGO.pdf?sequence=1&isAllowed=y

CIEMAT Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas. (2023). Obtenido de <https://www.ciemat.es/>

de Blas, I., Miguel González, L., & de Castro Carranza, C. (mayo de 2021). INTEGRATED ASSESSMENT MODELS (IAMS) APPLIED TO CLIMATE CHANGE AND ENERGY TRANSITION. *Revista DYNA*, 96, 316-321.
doi:<https://doi.org/10.6036/9922>

de Castro, C., & Capellán Pérez, Í. (2020). Standard, Point of Use, and Extended Energy Return on Energy Invested (EROI) from Comprehensive Material Requirements of Present Global Wind, Solar and Hydro Power Technologies. *energies*.

Endesa. (Enero de 2022). *Endesa; Energía de la biomasa*. Obtenido de <https://www.endesa.com/es/la-cara-e/centrales-electricas/energia-biomasa>

Energía, I. (. (2008). *Biomasa: Industria*.

Energías renovables. (2022). *Energías renovables*. Recuperado el 2023, de <https://www.energias-renovables.com/bioenergia/las-ventas-de-estufas-y-chimeneas-de-20220530>

EUROSTAT. (2021). Obtenido de <https://ec.europa.eu/eurostat/web/main/data/database>

FAO. (2020). *Evaluación de los recursos forestales mundiales. Informe principal*.

FAO. (2022). *El estado de los bosques del mundo*.

- Forrester, J. (2009). *Some Basic Concepts in System Dynamics*.
- GEEDS. (2023). Obtenido de <https://geeds.es/>
- Gregorio, M. d. (2020). *Biomasa en España. Generación de valor añadido y análisis prospectivo*.
- IDAE. (2021). Obtenido de <https://www.idae.es/informacion-y-publicaciones/estudios-informes-y-estadisticas>
- INE. (s.f.). *Instituto Nacional de Estadística*. Recuperado el 2023, de <https://www.ine.es/dyngs/IOE/es/operacion.htm?numinv=10002>
- Keywan Riahi, D. P. (January de 2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change*, 42, 153-168. doi:<https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>
- Martín García, J. (2012). *Teoría y ejercicios prácticos de Dinámica de Sistemas*.
- Matteucci, S. (2018). *Límites planetarios y Ley de bosques*. Fronteras.
- Mediavilla, M., & Miguel, L. J. (s.f.). *Dinámica de Sistemas*.
- Ministerio para la transición ecológica. (2019). *Guía para la estimación de absorciones de dióxido de carbono*. Obtenido de https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/guiapa_tcm30-479094.pdf
- Ministerio para la transición ecológica y reto demográfico. (s.f.). Obtenido de <https://www.miteco.gob.es/es/>
- Red Eléctrica Española. (2022). *Red Eléctrica Española*. Obtenido de <https://www.ree.es>
- Red Española de Ciudades por el Clima. (s.f.). *Los sumideros de carbono a nivel local*. Recuperado el 2023, de <https://redciudadesclima.es/sites/default/files/2020-06/c2dd700737802664a97469104e56f17d.pdf>
- Rockström, J., Noone, K., Steffen, W., & Persson, Å. (2009). *Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity*. Ecology and society.
- Roebroek, C., Cescatti, A., Duveiller, G., Seneviratne, S., & Davin, E. (2023). Releasing global forests from human management: How much more carbon could be stored? *Science*, 749-753. doi:10.1126/science.add5878

- Ruiz-Peinado Gertrudix, R. (2013). *Modelos para la estimación del carbono en la biomasa de los sistemas forestales. Influencia de la silvicultura en los stocks de carbono*. Universidad de Valladolid, Instituto Universitario de Investigación y Gestión Forestal Sostenible, Palencia.
- Steffen, W. (2015). *Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet*. Science.
- Teledetección, G. G. (2023). GEAT. Recuperado el mayo de 2023, de <http://ecologiaaplicadayteledeteccion.blogspot.com/>
- Twenergy. (2019). Recuperado el 2023, de <https://twenergy.com/>
- United nations & UK Government. (2 de 11 de 2021). *Glasgow Climate Pact*. Obtenido de <https://ukcop26.org/glasgow-leaders-declaration-on-forests-and-land-use/>
- Vensim. (2023). *Vensim*. Obtenido de <https://vensim.com/>
- Weyant, J. (January de 2017). Some Contributions of Integrated Assessment Models of Global Climate Change. (T. U. Press, Ed.) *Review of Environmental Economics and Policy*, 115-137.
doi:<https://doi.org/10.1093/reep/rew018o>
- Wikipedia. (2023). Obtenido de https://es.wikipedia.org/wiki/Din%C3%A1mica_de_sistemas
- Zhang, Q., Qi, J., Cheng, B., Yu, C., Liang, S., Wiedmann, T., . . . Zhong, Q. (2021). *Planetary Boundaries for Forests and Their National Exceedance*. Environmental Science & Technology.

8. ANEXOS

A continuación, se muestran los datos técnicos más significativos del modelo realizado.

Parámetros de control de la simulación.

- Unidades temporales: años
- Tiempo inicial: 2000
- Tiempo final: 2080
- Tiempo de paso: 0.25 años

La documentación completa se recoge en el anexo adjunto (*TFG_02518_anejos.zip*).