



**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID**

**ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES**

**Grado en Ingeniería en Electrónica Industrial y Automática**

**Modelado de los cambios de uso de la  
tierra mediante Dinámica de Sistemas  
para su integración en el modelo WILIAM.**

**Autora:**

**Marina Campano Méndez**

**Tutora:**

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

**Valladolid, julio 2021**



## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, quiero agradecer su guía y su ayuda en todo momento a mi tutora del Trabajo Fin de Grado, Margarita Mediavilla Pascual.

En segundo lugar, quiero dar las gracias a mis padres, por su paciencia y por confiar siempre en mí y a mi hermano, gracias Sergio por ser mi fuente de energía.

Por último, gracias Sandra, por ser mi compañera y apoyo durante estos años, no solo has hecho posible el camino, lo has hecho placentero.



## Resumen:

Los cambios de uso del suelo son una de las principales causas de pérdida de biodiversidad y emisiones de gases de efecto invernadero y su cantidad y severidad ha aumentado en los últimos tiempos. Es por ello que los modelos utilizados para estudiar el cambio climático, los Integrated Assessment Models o IAM's, están incluyendo módulos de gestión de usos del suelo en los últimos años.

En este Trabajo Fin de Grado se lleva a cabo el modelado de los cambios de uso del suelo, mediante dinámica de sistemas haciendo uso del programa Vensim, para su integración en WILIAM, el IAM que está siendo desarrollado por el proyecto LOCOMOTION en el cual participa el Grupo de Energía, Economía y Dinámica de Sistemas (GEEDS) de la UVA.

A partir del modelo, pueden realizarse simulaciones que permiten estudiar los cambios de uso del suelo esperados bajo escenarios diversos.

**Palabras clave:** Cambios de uso del suelo, Dinámica de Sistemas, Modelos de Evaluación Integrada, LOCOMOTION, Escenarios.

## Abstract:

Land use changes are one of the main sources of biodiversity loss and greenhouse gas emissions and its severity and occurrence has increased in recent times. It is for this reason that the models used to study climate change, the Integrated Assessment Models or IAM's are including land use modules in recent years.

In this Final Degree Project, the modelling of land use changes is carried out applying System Dynamics and using the program Vensim, for its integration in WILIAM, the IAM that is being developed by the project LOCOMOTION in which the research group of Energy, Economy and System Dynamics (GEEDS) from UVA participates.

The model allows the user to perform simulations in order to study which land use changes are expected under different scenarios.

**Key words:** Land use changes, System Dynamics, Integrated Assessment Models, LOCOMOTION, Scenarios.



# ÍNDICE

1 . INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS .....	1
1.1 . Introducción .....	1
1.2 . Motivación y contexto.....	2
1.3 . Objetivos .....	2
2 . MODELADO DEL USO DE LA TIERRA EN OTROS IAMs.....	5
2.1 . Posibles enfoques en el modelado del uso de la tierra.....	5
2.2 . Modelos sobre los cambios de uso del suelo .....	7
2.2.1 . GLOBIOM .....	8
2.2.2 . GCAM .....	10
2.2.3 . FeliX Model .....	13
3 . DINÁMICA DE SISTEMAS .....	17
3.1 . Introducción .....	17
3.2 . Elementos Principales.....	18
3.2.1 . Fronteras del sistema .....	18
3.2.2 . Diagrama Causal.....	18
3.2.3 . Elemento limitativo y elementos clave .....	19
3.2.4 . Diagramas de Flujo o de Forrester .....	19
3.3 . Proceso de modelado .....	20
3.4 . Programa empleado. VENSIM. ....	22
3.4.1 . Interfaz de usuario .....	23
3.4.2 . Ecuaciones destacadas.....	23
3.4.3 . Importar y exportar datos .....	24
3.4.4 . Secuencia computacional e integración .....	24
4 . INTRODUCCIÓN AL PROYECTO LOCOMOTION.....	27
4.1 . Estructura y objetivos.....	27
4.2 . Regiones socioeconómicas y zonas climáticas.....	29
4.3 . Módulo de Tierra, Agua y Clima .....	32
5 . METODOLOGÍA .....	35
5.1 . Introducción a los cambios de uso del suelo .....	36
5.1.1 . Introducción teórica .....	36
5.1.2 . Categorías de uso del suelo .....	53
5.2 . Obtención de datos .....	55
5.2.1 . Bases de datos.....	55
5.2.2 . Procedimiento .....	60

5.3 . Modelado en Vensim .....	119
5.3.1 . Criterios de modelado de WILIAM .....	119
5.3.2 . Estructura general .....	121
Expansión de las tierras de cultivo de secano .....	123
Expansión de las tierras de cultivo de regadío y disponibilidad de agua ..	123
5.3.3 . Modelo de evolución histórica .....	128
6 . RESULTADOS .....	129
6.1 . Comparación con los históricos .....	129
6.2 . Políticas y escenarios .....	131
6.2.1 . Presentación de resultados y análisis .....	131
6.2.2 . Discusión .....	160
7 . CONCLUSIONES .....	163
7.1 . Conclusiones personales .....	163
7.2 . Futuras líneas de trabajo .....	164
8 . REFERENCIAS .....	165
ANEXOS .....	173
Anexo 1 . PAÍSES DE LAS REGIONES LOCOMOTION .....	175
Anexo 2 . TABLAS DE DATOS .....	183



## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 2.1. Tipos de uso del suelo y su descripción considerados en GLOBIOM</i>	8
<i>Figura 2.2. Categorías de cubierta del suelo de GLC2000</i>	9
<i>Figura 2.3. Correspondencia entre las categorías de GLC2000 y los usos del suelo de GLOBIOM</i>	9
<i>Figura 2.4. Matriz de transición entre usos del suelo de GLOBIOM</i>	10
<i>Figura 2.5. Estructura general de GLOBIOM</i>	10
<i>Figura 2.6. Usos de la tierra en GCAM</i>	11
<i>Figura 2.7. Correspondencia entre los usos del suelo de GCAM y las categorías de SAGE y HYDE</i>	12
<i>Figura 2.8. Estructura de Felix</i>	14
<i>Figura 3.1. Relación causal positiva</i>	18
<i>Figura 3.2. Relación causal negativa</i>	18
<i>Figura 3.3. Representación de un bucle causal</i>	19
<i>Figura 3.4. Representación de un diagrama de flujos</i>	20
<i>Figura 3.5. Interacciones en el proceso de modelado</i>	22
<i>Figura 3.6. Interfaz de usuario de Vensim (Fuente: Creación propia)</i>	23
<i>Figura 4.1. Estructura de los modelos WILIAM</i>	29
<i>Figura 4.2. Regiones LOCOMOTION)</i>	30
<i>Figura 4.3. Correspondencia entre las zonas Köppen originales y las empleadas en WILIAM</i>	31
<i>Figura 4.4. Zonas Köppen en WILIAM</i>	31
<i>Figura 4.5. Sub-módulos dentro del módulo "Tierra, Agua y Clima"</i>	33
<i>Figura 4.6. Relaciones del módulo de Tierra, Agua y Clima</i>	33
<i>Figura 5.1. Esquema del sub-módulo de distribución de usos del suelo</i>	35
<i>Figura 5.2. Tendencia de los bosques primarios por zona climática</i>	38
<i>Figura 5.3. Porcentaje de bosques primarios respecto del total de bosques por zona climática</i>	38
<i>Figura 5.4. Porcentaje de la deforestación causada por cada factor</i>	39
<i>Figura 5.5. Porcentaje de la deforestación de bosque primario causada por cada factor</i>	40
<i>Figura 5.6. Evolución de las tierras de cultivo de secano y regadío</i>	44
<i>Figura 5.7. Impulsores del reverdecimiento y la desertización por regiones</i>	51
<i>Figura 5.8. Cambios de uso del suelo debido al efecto de las precipitaciones y SAT</i>	52
<i>Figura 5.9. Mapa del mundo dividido por tipos de cubierta terrestre con resolución espacial de 300m en el año 2017</i>	56
<i>Figura 5.10. Porcentaje de plantaciones y bosques forestados respecto del total de bosques plantados, 1990, 2000, 2010 y 2020, por país</i>	72
<i>Figura 5.11. Producción anual de electricidad por plantas PV entre 2005 y 2018</i>	74
<i>Figura 5.12. Estimación del factor de cobertura del suelo por zona geográfica</i>	76
<i>Figura 5.13. Porcentaje de nuevas tierras urbanas obtenidas de cada uso de la tierra por región van Vliet</i>	80
<i>Figura 5.14. Regiones van Vliet</i>	81

<b>Figura 5.15.</b> Porcentaje de nuevas tierras de cultivo obtenidas de cada uso de la tierra por región van Vliet .....	84
<b>Figura 5.16.</b> Porcentaje de nuevas tierras de cultivo obtenidas de cada uso de la tierra por región Gibbs .....	85
<b>Figura 5.17.</b> Superficie de otros usos de la tierra que puede convertirse en tierras de cultivo y su calidad por regiones FAO .....	89
<b>Figura 5.18.</b> Resumen del proceso para la obtención de datos sobre los cambios de uso del suelo causados por la expansión de las tierras de cultivo de secano.....	92
<b>Figura 5.19.</b> Cantidad de nuevas tierras de cultivo y de pastoreo de otros usos de la tierra en países de Latino América .....	93
<b>Figura 5.20.</b> Matriz de transición entre usos de la tierra para LATAM .....	94
<b>Figura 5.21.</b> Resumen del proceso para la obtención de datos sobre los cambios de uso del suelo causados por la expansión de las tierras de pastoreo .....	95
<b>Figura 5.22.</b> Tierra adecuada para plantaciones/forestación por uso de la tierra y región.....	96
<b>Figura 5.23.</b> Superficie de cada uso de la tierra adecuada para forestación	97
<b>Figura 5.24.</b> Relación entre la superficie urbana y la población, mundial ...	104
<b>Figura 5.25.</b> Resumen del proceso para la obtención de datos sobre los cambios de uso del suelo causados por la expansión urbana .....	105
<b>Figura 5.26.</b> Estrés de los recursos hídricos por país .....	112
<b>Figura 5.27.</b> Producción global de electricidad (1990-2018) .....	116
<b>Figura 5.28.</b> Ventana de entradas al modelo en Vensim.....	120
<b>Figura 5.29.</b> Ventana del modelo en Vensim.....	120
<b>Figura 5.30.</b> Ventana de entradas de los escenarios en Vensim.....	121
<b>Figura 5.31.</b> Modelado en Vensim de los cambios de uso de la tierra debidos a la expansión urbana .....	122
<b>Figura 5.32.</b> Modelado en Vensim de los cambio de uso de suelo debidos a la expansión de las tierras de cultivo de secano .....	123
<b>Figura 5.33.</b> Modelado en Vensim de los cambios de uso del suelo debidos a la expansión de las tierras de cultivo de regadío y la escasez de agua .....	123
<b>Figura 5.34.</b> Modelado en Vensim de los cambios de uso del suelo debidos a la expansión de tierras de pastoreo .....	124
<b>Figura 5.35.</b> Modelado en Vensim de los cambios de uso del suelo asociados a la demanda de madera (expansión de las plantaciones).....	124
<b>Figura 5.36.</b> Modelado de los cambios de uso del suelo debidos a la forestación .....	125
<b>Figura 5.37.</b> Modelado en Vensim de los cambios de uso de suelo debidos a la expansión de la tierra para solar .....	125
<b>Figura 5.38.</b> Modelado en Vensim del aumento de la población.....	126
<b>Figura 5.39.</b> Modelado en Vensim de la demanda de tierras de pastoreo ..	126
<b>Figura 5.40.</b> Modelado en Vensim de la demanda de tierras de cultivo y la escasez de agua.....	127
<b>Figura 5.41.</b> Modelado en Vensim de la demanda de madera .....	127
<b>Figura 5.42.</b> Modelado en Vensim de la demanda de energía solar .....	127
<b>Figura 5.43.</b> Modelo de evolución en función de las tendencias históricas	128
<b>Figura 6.1.</b> Producción de energía solar en la región CHINA bajo cada escenario, 2005-2050.....	132

<b>Figura 6.2.</b> Evolución de las tierras para solar en la región EU27 bajo cada escenario, 2005-2050 .....	132
<b>Figura 6.3.</b> Evolución de las tierras para solar en la región UK bajo cada escenario, 2005-2050 .....	133
<b>Figura 6.4.</b> Evolución de las tierras para solar en la región CHINA bajo cada escenario, 2005-2050 .....	133
<b>Figura 6.5.</b> Evolución de las tierras para solar en la región EASOC bajo cada escenario, 2005-2050 .....	133
<b>Figura 6.6.</b> Evolución de las tierras para solar en la región INDIA bajo cada escenario, 2005-2050 .....	134
<b>Figura 6.7.</b> Evolución de las tierras para solar en la región LATAM bajo cada escenario, 2005-2050 .....	134
<b>Figura 6.8.</b> Evolución de las tierras para solar en la región RUSSIA bajo cada escenario, 2005-2050 .....	134
<b>Figura 6.9.</b> Evolución de las tierras para solar en la región USMCA bajo cada escenario, 2005-2050 .....	135
<b>Figura 6.10.</b> Evolución de las tierras para solar en la región LROW bajo cada escenario, 2005-2050 .....	135
<b>Figura 6.11.</b> Efecto de los límites de expansión de la tierra para solar en EU27, escenario SP3, 2005-2050 .....	136
<b>Figura 6.12.</b> Efecto de los límites de expansión de la tierra para solar en EU27, escenario SP1, 2005-2050 .....	137
<b>Figura 6.13.</b> Efecto de los límites de expansión de la tierra para solar en CHINA, escenario SP3, 2005-2050.....	137
<b>Figura 6.14.</b> Evolución de las tierras para solar en la región EU27, escenario SP2 con y sin producción en las cubiertas urbanas, 2005-2050 .....	138
<b>Figura 6.15.</b> Evolución de las tierras para solar en la región USMCA, escenario SP3 con y sin producción en las cubiertas urbanas, 2005-2050 .....	138
<b>Figura 6.16.</b> Evolución de la superficie urbana en la región EU27 bajo cada escenario, 2005-2050 .....	139
<b>Figura 6.17.</b> Evolución de la superficie urbana en la región INDIA bajo cada escenario, 2005-2050 .....	139
<b>Figura 6.18.</b> Evolución de las tierras de cultivo de secano en la zona TROPICAL bajo cada escenario, 2005-2050.....	140
<b>Figura 6.19.</b> Evolución de las tierras de cultivo de secano en la zona WARM bajo cada escenario, 2005-2050.....	140
<b>Figura 6.20.</b> Evolución de las tierras de cultivo de secano en la zona ARID_HOT bajo cada escenario, 2005-2050 .....	141
<b>Figura 6.21.</b> Evolución de las tierras de cultivo de secano en la zona ARID_COLD bajo cada escenario, 2005-2050.....	141
<b>Figura 6.22.</b> Evolución de las tierras de cultivo de secano en la zona TEMPERATE bajo cada escenario, 2005-2050.....	141
<b>Figura 6.23.</b> Evolución de las tierras de cultivo de secano en la zona WINTER_SNOW bajo cada escenario, 2005-2050 .....	142
<b>Figura 6.24.</b> Evolución de las tierras de cultivo de secano en la zona SNOW bajo cada escenario, 2005-2050.....	142
<b>Figura 6.25.</b> Evolución de las tierras de cultivo de secano en la zona POLAR bajo cada escenario, 2005-2050.....	142

<b>Figura 6.26.</b> Efecto de los límites de expansión de las tierras de cultivo en la zona TROPICAL, escenario SP3, 2005-2050 .....	144
<b>Figura 6.27.</b> Efecto de los límites de expansión de las tierras de cultivo en la zona TROPICAL, escenario SP2, 2005-2050 .....	144
<b>Figura 6.28.</b> Efecto de los límites de expansión de las tierras de cultivo en la zona TROPICAL, escenario SP1, 2005-2050 .....	144
<b>Figura 6.29.</b> Evolución de las tierras de cultivo de regadío en la zona TROPICAL bajo cada escenario, 2005-2050 .....	145
<b>Figura 6.30.</b> Evolución de las tierras de cultivo de regadío en la zona WARM bajo cada escenario, 2005-2050 .....	145
<b>Figura 6.31.</b> Evolución de las tierras de cultivo de regadío en la zona ARID_HOT bajo cada escenario, 2005-2050.....	145
<b>Figura 6.32.</b> Evolución de las tierras de cultivo de regadío en la zona ARID_COLD bajo cada escenario, 2005-2050 .....	146
<b>Figura 6.33.</b> Evolución de las tierras de cultivo de regadío en la zona TEMPERATE bajo cada escenario, 2005-2050 .....	146
<b>Figura 6.34.</b> Evolución de las tierras de cultivo de regadío en la zona WINTER_SNOW bajo cada escenario, 2005-2050.....	146
<b>Figura 6.35.</b> Evolución de las tierras de cultivo de regadío en la zona SNOW bajo cada escenario, 2005-2050 .....	147
<b>Figura 6.36.</b> Evolución de las tierras de cultivo de regadío en la zona POLAR bajo cada escenario, 2005-2050 .....	147
<b>Figura 6.37.</b> Evolución de las tierras de cultivo de regadío en la región LATAM bajo cada escenario, 2005-2050 .....	148
<b>Figura 6.38.</b> Evolución de las tierras de cultivo de regadío en la región INDIA bajo cada escenario, 2005-2050 .....	148
<b>Figura 6.39.</b> Evolución de las plantaciones forestales en la zona TROPICAL bajo cada escenario, 2005-2050 .....	149
<b>Figura 6.40.</b> Evolución de las plantaciones forestales en la zona TEMPERATE bajo cada escenario, 2005-2050 .....	149
<b>Figura 6.41.</b> Evolución de los bosques gestionados en la zona TROPICAL bajo cada escenario, 2005-2050 .....	150
<b>Figura 6.42.</b> Evolución de los bosques primarios en la zona TROPICAL bajo cada escenario, 2005-2050 .....	150
<b>Figura 6.43.</b> Evolución de los bosques primarios en la zona WARM bajo cada escenario, 2005-2050.....	151
<b>Figura 6.44.</b> Evolución de los bosques gestionados en la zona WARM bajo cada escenario, 2005-2050 .....	151
<b>Figura 6.45.</b> Evolución de los bosques primarios en la zona ARID_HOT bajo cada escenario, 2005-2050 .....	151
<b>Figura 6.46.</b> Evolución de los bosques gestionados en la zona ARID_HOT bajo cada escenario, 2005-2050 .....	152
<b>Figura 6.47.</b> Evolución de los bosques primarios en la zona ARID_COLD bajo cada escenario, 2005-2050 .....	152
<b>Figura 6.48.</b> Evolución de los bosques gestionados en la zona ARID_COLD bajo cada escenario, 2005-2050 .....	152
<b>Figura 6.49.</b> Evolución de los bosques primarios en la zona TEMPERATE bajo cada escenario, 2005-2050 .....	153

<b>Figura 6.50.</b> Evolución de los bosques gestionados en la zona TEMPERATE bajo cada escenario, 2005-2050.....	153
<b>Figura 6.51.</b> Evolución de los bosques primarios en la zona WINTER_SNOW bajo cada escenario, 2005-2050.....	153
<b>Figura 6.52.</b> Evolución de los bosques primarios en la zona SNOW bajo cada escenario, 2005-2050 .....	154
<b>Figura 6.53.</b> Evolución de los bosques gestionados en la zona SNOW bajo cada escenario, 2005-2050 .....	154
<b>Figura 6.54.</b> Evolución de los bosques primarios en la zona POLAR bajo cada escenario, 2005-2050 .....	154
<b>Figura 6.55.</b> Evolución de los bosques gestionados en la zona POLAR bajo cada escenario, 2005-2050 .....	155
<b>Figura 6.56.</b> Efecto de la política de protección de bosque primario en la zona TROPICAL, escenario SP1, 2005-2050.....	155
<b>Figura 6.57.</b> Efecto de la política de protección de bosque primario en la zona TROPICAL, escenario SP3, 2005-2050.....	156
<b>Figura 6.58.</b> Efecto de la política de protección de bosque primario en la región LATAM, escenario SP2, 2005-2050 .....	156
<b>Figura 6.59.</b> Efecto de la política de protección de bosque primario en la región LATAM, escenario SP2, 2005-2050 .....	156
<b>Figura 6.60.</b> Evolución de las tierras de pastoreo en la zona TEMPERATE bajo cada escenario, 2005-2050 .....	157
<b>Figura 6.61.</b> Evolución de las tierras de matorrales en la zona TEMPERATE bajo cada escenario, 2005-2050.....	158
<b>Figura 6.62.</b> Evolución de la superficie de “otras tierras” en la zona TROPICAL bajo cada escenario, 2005-2050.....	158
<b>Figura 6.63.</b> Evolución de la superficie de “otras tierras” en la zona ARID_HOT bajo cada escenario, 2005-2050.....	159
<b>Figura 6.64.</b> Evolución de la superficie de “otras tierras” en la zona TEMPERATE bajo cada escenario, 2005-2050.....	159



## ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 5.1. Leyenda por colores de las 12 categorías de primarias de cobertura terrestre consideradas por ESA-CCI-LC.....</i>	<i>57</i>
<i>Tabla 5.2. Leyenda por colores de los 12 categorías secundarias de cobertura terrestre consideradas por ESA-CCI-LC.....</i>	<i>57</i>
<i>Tabla 5.3. Tipos de cubierta terrestre considerados por FAO.....</i>	<i>58</i>
<i>Tabla 5.4. Tipos de uso del suelo considerados por FAO.....</i>	<i>59</i>
<i>Tabla 5.5. Agrupación de las categorías de cobertura terrestre de ESA CCI-LC en usos de la tierra más adecuados a WILIAM .....</i>	<i>62</i>
<i>Tabla 5.7. Superficie de cada uso de la tierra de EU27 en cada zona Köppen .....</i>	<i>63</i>
<i>Tabla 5.8. Superficie de tierras de cultivo de secano en cada zona dentro de cada región.....</i>	<i>64</i>
<i>Tabla 5.9. Porcentaje de cada tipo de bosque WILIAM en cada región, 2005 .....</i>	<i>65</i>
<i>Tabla 5.10. Superficie de cada tipo de bosque WILIAM en cada región, 2005 .....</i>	<i>65</i>
<i>Tabla 5.11. Superficie de cada tipo de bosque WILIAM en cada zona Köppen, 2005 .....</i>	<i>66</i>
<i>Tabla 5.12. Porcentaje de masas de agua, nieve y hielo en cada región LOCOMOTION, 2005.....</i>	<i>66</i>
<i>Tabla 5.13. Superficie de humedales y otros usos de la tierra en cada región LOCOMOTION, 2005.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabla 5.14. Superficie de humedales y otros usos de la tierra en cada zona Köppen, 2005.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabla 5.15. Superficie de tierra para solar en cada región LOCOMOTION, 2005 .....</i>	<i>67</i>
<i>Tabla 5.16. Matriz RtoZ para las tierras de cultivo de secano.....</i>	<i>68</i>
<i>Tabla 5.17. Matriz ZtoR para las tierras de cultivo de secano.....</i>	<i>68</i>
<i>Tabla 5.18. Tendencia anual de tierras de regadío, 1997-2002, 2002-2007, 2007-2012, 2012-2017, por región LOCOMOTION.....</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 5.19. Tendencia anual de bosques plantados, plantaciones y bosques forestados, 1990-2000, 2000-2010 y 2010-2020, por región LOCOMOTION .....</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 5.20. Correspondencia entre los tipos de bosque de FAO y LOCOMOTION .....</i>	<i>73</i>
<i>Tabla 5.21. Porcentaje de la producción de energía solar de cada región IEA producida en cada región LOCOMOTION .....</i>	<i>74</i>
<i>Tabla 5.22. Producción anual de electricidad por plantas PV por región LOCOMOTION, .....</i>	<i>75</i>
<i>Tabla 5.23. Densidad de energía solar y parámetros de cálculo por país.....</i>	<i>77</i>
<i>Tabla 5.24. Densidad de energía solar por zona geográfica .....</i>	<i>77</i>
<i>Tabla 5.25. Porcentaje de la producción de energía solar de cada región LOCOMOTION producida en cada zona del estudio.....</i>	<i>78</i>
<i>Tabla 5.26. Densidad de energía solar por región LOCOMOTION .....</i>	<i>78</i>
<i>Tabla 5.27. Eficiencia de la tierra para producir energía solar por región LOCOMOTION .....</i>	<i>79</i>

<b>Tabla 5.28.</b> Porcentaje de población de cada región LOCOMOTION en cada región van Vliet .....	81
<b>Tabla 5.29.</b> Porcentaje de nuevas tierras urbanas que proviene de cada uso de la tierra por regiones LOCOMOTION .....	82
<b>Tabla 5.30.</b> Porcentaje de nuevas tierras de cultivo obtenidas de cada uso de la tierra (sin tipos de bosques) por región LOCOMOTION .....	84
<b>Tabla 5.31.</b> Porcentaje que proviene de cada tipo de bosque de las tierras de agricultura que vienen de bosques por región Gibbs.....	86
<b>Tabla 5.32.</b> Porcentaje de población de cada región LOCOMOTION en cada región Gibbs.....	86
<b>Tabla 5.33.</b> Porcentaje que proviene de cada tipo de bosque de las tierras de agricultura que vienen de bosques por región LOCOMOTION .....	87
<b>Tabla 5.34.</b> Porcentaje de nuevas tierras de cultivo obtenidas de cada uso de la tierra por región LOCOMOTION .....	87
<b>Tabla 5.35.</b> Porcentaje de nuevas tierras de cultivo obtenidas de cada uso de la tierra por zona Köppen .....	87
<b>Tabla 5.36.</b> Porcentaje de superficie de cada región FAO en cada región LOCOMOTION.....	90
<b>Tabla 5.37.</b> Límites de la expansión de tierras de cultivo de secano por región LOCOMOTION.....	90
<b>Tabla 5.38.</b> Límites de la expansión de tierras de cultivo de secano por zona Köppen .....	91
<b>Tabla 5.39.</b> Porcentaje de nuevas tierras de pastoreo obtenidas de cada uso de la tierra en LATAM.....	94
<b>Tabla 5.40.</b> Porcentaje de nuevas tierras de pastoreo obtenidas de cada uso de la tierra por zona Köppen .....	94
<b>Tabla 5.41.</b> Porcentaje de nuevas plantaciones que viene de cada uso de la tierra .....	97
<b>Tabla 5.42.</b> Porcentaje de la capacidad instalada para producción de energía solar en cada uso de la tierra para cada país.....	99
<b>Tabla 5.43.</b> Porcentaje de cada uso de la tierra adecuado para situar plantas de producción de energía solar.....	100
<b>Tabla 5.44.</b> Porcentaje de tierra para solar que viene de cada uso de la tierra por región LOCOMOTION.....	100
<b>Tabla 5.45.</b> Límites de la expansión de la tierra para solar por región LOCOMOTION.....	101
<b>Tabla 5.46.</b> Matriz RtoZ en el caso de la expansión de tierra para solar para las tierras de cultivo de secano.....	102
<b>Tabla 5.47.</b> Porcentaje de la superficie de tierras de regadío que va a otros usos de la tierra por zona Köppen .....	103
<b>Tabla 5.48.</b> Parámetros de la relación entre la tierra urbana y la población por regiones.....	104
<b>Tabla 5.49.</b> Eficiencia histórica anual de las plantaciones por zona Köppen .....	107
<b>Tabla 5.50.</b> Eficiencia estimada de las plantaciones por zona Köppen .....	107
<b>Tabla 5.51.</b> Eficiencia estimada de los bosques naturales por zona Köppen .....	108
<b>Tabla 5.52.</b> Porcentaje de la demanda de madera que se extrae de los bosques primarios por zona Köppen .....	109



<b>Tabla 5.53.</b> <i>Porcentajes ajustados de demanda de madera que se extrae de los bosques primarios por zona Köppen.....</i>	<i>109</i>
<b>Tabla 5.54.</b> <i>Valor del parámetro que representa la escasez de agua en 2018 .....</i>	<i>113</i>
<b>Tabla 5.55.</b> <i>Porcentaje de la producción global de electricidad producida en cada región LOCOMOTION .....</i>	<i>116</i>
<b>Tabla 5.56.</b> <i>Porcentaje de la producción de electricidad cubierto con energía solar en 2018 en cada región .....</i>	<i>116</i>
<b>Tabla 5.57.</b> <i>Año en que se alcanza el porcentaje de solar en la electricidad en cada región.....</i>	<i>117</i>
<b>Tabla 5.58.</b> <i>Porcentaje estimado de madera obtenido de las plantaciones en 2050 .....</i>	<i>118</i>
<b>Tabla 6.1.</b> <i>Máximo error entre los datos históricos y la simulación del modelo (2005-2018).....</i>	<i>129</i>



## Glosario de acrónimos

IPCC - Panel Intergubernamental del Cambio Climático

IAM's - Integrated Assessment Models o Modelos de Evaluación Integrada

GEEDS - Grupo de Investigación de Energía, Economía y Dinámica de Sistemas

UVa - Universidad de Valladolid

WILIAM - Within Limits Integrated Assessment Model

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

DS - Dinámica de Sistemas

MEDEAS - Modelling the Energy Development under Environmental And Socioeconomic constraints

GLOBIOM - Global Biomass Optimization Model

IIASA - International Institute for Applied Systems Analysis

GCAM - Global Change Assessment Model

AEZs - Zonas Agroecológicas

FeliX - Functional Enviro-economic Linkages Integrated neXus

FAO - Organización para la Agricultura y la Alimentación

UN - Naciones Unidas

IEA - Agencia Internacional de la Energía

ESA - Agencia Espacial Europea

EU27 - Unión Europea

UK - Reino Unido

EASOC - Sudeste asiático y Oceanía

LATAM - Latino América

USMCA - Estados Unidos, México y Canadá

LROW - Resto del mundo

CCI - Iniciativa por el Cambio Climático

LC - Cubierta del Suelo





# **1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS**

## **1.1. Introducción**

La tierra es el escenario en que toda actividad humana se desarrolla, además de la principal fuente de materiales para el desarrollo de dicha actividad (Briassoulis, 2019). En la actualidad prácticamente toda superficie accesible está siendo utilizada de una forma u otra para algún propósito directamente derivado de las necesidades humanas (Saurab, 2018).

Sin embargo, la tierra no solo está siendo intensamente explotada, sino que está en continua evolución y cambio. Desde el punto de vista social, estos cambios son necesarios para la producción de alimento y energía, imprescindibles para la supervivencia humana (Bett, 2019). Sin embargo, desde el punto de vista ambiental, tienen efectos mucho más negativos que positivos, puesto que afectan a amplio rango de variables ambientales, entre las cuales se encuentran las emisiones de carbono y la pérdida de biodiversidad (Bett, 2019). De hecho, los cambios de uso del suelo están considerados como una de las principales causas de la pérdida de biodiversidad (Bett, 2019) y se consideran responsables del 18% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (Chapagain & James, 2013). Estos efectos negativos son producidos por las prácticas de uso insostenibles, como la deforestación o la sobreexplotación de la tierra que, inevitablemente, derivan en la salinización y degradación de dicha superficie (Bett, 2019).

Esta pérdida de biodiversidad y el efecto negativo sobre las variables ambientales amenaza la calidad de vida humana. En el corto plazo, el efecto se ve reflejado mayoritariamente sobre la seguridad alimentaria, la salud, bienestar y seguridad humana mientras que, en el largo plazo, la persistencia del planeta se ve gravemente amenazada (Briassoulis, 2019).

Debido a su importante efecto sobre la calidad de vida humana, los organismos de estudio del cambio climático como el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC) entre otros, consideran imprescindible conocer y cuantificar los cambios de uso del suelo y sus consecuencias (Saurab, 2018). Los modelos sobre los cambios de uso de la tierra son precisamente herramientas que nacen con el objetivo de contribuir al estudio de las causas y consecuencia de dichos cambios y que ayudan en la comprensión del sistema de uso de la tierra. Es también su objetivo apoyar en una futura toma de decisiones de tal forma que, en la medida de lo posible, se minimicen los efectos de estos cambios (Verburg et al., 2004).



## **1.2. Motivación y contexto**

En los últimos años los cambios de uso del suelo se han intensificado de manera significativa, pues el aumento de la población no solo ha generado una mayor demanda de superficie urbana, sino que también ha producido una mayor demanda de alimentos y de energía. Además, puesto que se busca maximizar la producción, es habitual el cambio de bosques a plantaciones o la evolución de cultivos de secano a regadío (Saurab, 2018). En los próximos años es de esperar que esta tendencia se intensifique aún más, dado que no solo continuará la tendencia observada hasta el momento, sino que el problema se verá agravado por la transición hacia las energías renovables, que presentan el problema de requerir superficie para ser capaces de generar energía (ej. energía solar, biocombustibles) y la incentivación de políticas de reforestación.

Es por este motivo que se considera importante cuantificar los cambios de uso del suelo, para poder estudiar tanto los efectos de la competencia entre la producción de alimentos y energía como las consecuencias ambientales del aumento de la población y de la transición hacia las energías renovables y su repercusión sobre la calidad de vida humana.

En este contexto se plantea el desarrollo de este trabajo como una aportación al proyecto LOCOMOTION (*Low-carbon society: an enhanced modelling tool for the transition to sustainability*), el cual está siendo actualmente desarrollado por el Grupo de Investigación de Energía, Economía y Dinámica de Sistemas (GEEDs) de la Universidad de Valladolid (Uva) junto a 13 socios europeos.

El objetivo principal de este proyecto es el desarrollo de un conjunto de modelos de evaluación integrada (IAMs), denominados WILIAM (“Whitin limits”), para el estudio de las complejas interacciones entre el ser humano y su entorno. Para llevar a cabo dicho objetivo el proyecto recurre, entre otras técnicas y métodos, a la modelización mediante la Dinámica de Sistemas (DS) con el software Vensim.

Puesto que se trata de desarrollar un modelo del mundo a partir del cual estudiar los efectos de la actividad humana a todos los niveles, se considera imprescindible el estudio de la tierra y sus recursos y, en concreto, del sistema de uso del suelo y los cambios que se producen en el mismo. El presente TFG se centra en el desarrollo de un modelo sobre los cambios de uso del suelo para su integración como un sub-módulo dentro del modelo completo WILIAM.

## **1.3. Objetivos**

- Llevar a cabo una extensa investigación bibliográfica con el objetivo de obtener la mayor información posible del sistema de uso del suelo y sus cambios, obteniendo datos sobre las tendencias históricas y las que se esperan en el futuro.



- Obtener los datos necesarios para cuantificar los cambios de uso del suelo, así como encontrar cuáles son los principales impulsores de dichos cambios y determinar la proporción en que los provocan.
- Identificar todas las variables cuyo efecto sobre el sistema es significativo para poder diseñar un modelo que ofrezca una visión completa de la problemática.
- Realizar un modelo de Dinámica de Sistemas utilizando el programa Vensim sobre la base de los criterios de modelado del proyecto LOCOMOTION para su integración, en una etapa futura, en el modelo WILIAM.
- Diseñar una serie de escenarios con narrativas alternativas y obtener resultados, tras la simulación del modelo bajo los mismos, a partir de los cuales puedan estudiarse las consecuencias bajo cada una de las situaciones.



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES

## Capítulo 1. Introducción y objetivos





## **2. MODELADO DEL USO DE LA TIERRA EN OTROS IAMs**

Muchos de los trabajos existentes en relación al modelado del uso de la tierra son parte de modelos de evaluación integrada (IAMs). Estos modelos nacen con el objetivo de estudiar la problemática relativa cambio climático y una de sus características principales es que su modelado reúne un conjunto más amplio de áreas y métodos de los que caracterizarían un estudio de la misma cuestión dentro de los límites de una sola disciplina. Además, uno de sus objetivos es proporcionar información de uso y no solo avanzar en la mera comprensión del tema (Ferrerías, 2017). Es por esto que los IAM incluyen una serie de módulos (ej. demografía, economía, energía...) entre los cuáles se encuentra, habitualmente, el de uso del suelo. Los IAMs consideran importante el estudio de este módulo puesto que la calidad de las tierras es un factor clave en la producción de alimentos, madera y energía y, además, la gestión y cambios de uso del suelo tienen un importante efecto en los ciclos de agua y carbono siendo un gran impulsor de los cambios ambientales (Kyle, 2011).

En esta sección se revisan los principales enfoques que se pueden adoptar en el modelado de los usos del suelo así como los principales modelos existentes sobre la materia. El objetivo principal de la sección es apoyar la toma de decisiones y el enfoque tomado en la modelización y configuración del módulo de uso de la tierra de este proyecto.

### **2.1. Posibles enfoques en el modelado del uso de la tierra**

La mayoría de modelos sobre los cambios de uso del suelo se basan en al menos uno de los siguientes principios básicos (van Schrojenstein Lantman, J., Verburg, P.H., Bregt, A. and Stan, 2011):

- Continuación de las tendencias históricas: Los futuros usos y cambios de uso del suelo pueden predecirse a partir de los cambios históricos.
- Idoneidad de la tierra: La adecuación de la tierra para un uso concreto depende de diversos factores, desde la obtención del máximo beneficio económico (idoneidad económica) hasta las características del terreno (idoneidad biofísica).
- Interacción con la vecindad: La posibilidad de transición de un uso a otro depende de los usos del suelo rodean a este y de los factores económicos y biofísicos que los caracterizan.
- Interacción de los actores: Los cambios de uso del suelo son el resultado de la interacción entre impulsores socioeconómicos y políticos.

Es habitual describir los cambios del uso del suelo en base a un mecanismo particular empleado para caracterizar dichos cambios. Los principales



mecanismos que pueden emplearse son (van Schrojenstein Lantman, J., Verburg, P.H., Bregt, A. and Stan, 2011):

- Autómata celular (AC): Explica el cambio de uso del suelo en base al estado actual de la célula y los cambios producidos en sus células vecinas. Es decir, se basa en los principios de continuación de las tendencias históricas e interacción con la vecindad. Existen de dos tipos: los AC sin restricciones, que emplean únicamente reglas de decisión para calcular los cambios de uso del suelo y los AC restringidos en los cuales la cantidad de un uso del suelo que puede cambiar a otro está limitada. Tanto las reglas de transición como los límites se establecen en base a la opinión de expertos o a partir del estudio del uso histórico del suelo.
- Análisis estadístico: En base a los cuatro principios básicos, se estudian mapas de uso del suelo con el objetivo de extraer información estadística que ayude a predecir los patrones futuros.
- Cadenas Markov: Se basa en el principio de continuación de las tendencias históricas, su característica principal es el empleo de matrices para representar los cambios entre los distintos usos del suelo. Bajo el supuesto de estatismo, se usa dicha matriz para calcular la probabilidad futura de cambio de un uso a otro. Estas pueden obtenerse a partir del conocimiento de expertos o por el estudio de mapas pasados.
- Redes neuronales artificiales (ANNs): Se basan en los cuatro principios básicos. El algoritmo asume una relación entre los cambios de usos del suelo pasados y futuros. El modelo se "entrena" con un conjunto de datos y mapas de uso del suelo en diferentes años lo que le permite reconocer y reproducir las tendencias de los distintos usos del suelo.
- Basados en la economía: Se basan en el principio de idoneidad de la tierra. Estos consideran que mientras el beneficio obtenido a partir de un producto sea superior que los costes de transporte de este, la tierra seguirá empleándose para producirlo.
- Basados en la acción de agentes: Se basan en el principio de interacción de los actores. Los cambios de uso del suelo dependen de la toma humana de decisiones. La toma de decisiones se define a partir del juicio de expertos, realización de cuestionarios o uso de redes neuronales artificiales.

El mecanismo elegido se codifica después en algoritmos. En la fase de modelado pueden adoptarse una amplia variedad de enfoques, que pueden



resumirse en las siguientes características (Verburg, P.H., Gimore Pontius, R., Kok, K. and Veldkamp, 2008):

- Espacial o no espacial: Los modelos espaciales están dotados de un alto nivel de detalle espacial los cambios de usos del suelo se representan para (píxeles individuales en un raster). Mientras que, los no espaciales se centran en modelar la tasa y magnitud de los cambios de uso de la tierra sin considerar su distribución espacial.
- Dinámico o estático: En los modelos estáticos los coeficientes que explican la distribución de los usos del suelo se calculan en base a una serie de hipotéticos factores determinantes. Mientras que los modelos dinámicos prestan mayor atención a variables como la competencia entre usos del suelo, la irreversibilidad de cambios pasados que genera dependencia de las tendencias pasadas y las trayectorias fijas de cambio de usos del suelo.
- Descriptivos o prescriptivos: Los modelos descriptivos pretenden simular el funcionamiento de los cambios de uso del suelo así como explorar los patrones que estos seguirán en el futuro próximo, mientras que, los prescriptivos pretenden calcular qué configuraciones de uso del suelo se ajustan mejor a unos objetivos marcados.
- Deductivo o inductivo: Los modelos inductivos se basan en correlaciones estadísticas entre los cambios de la tierra y un conjunto de variables impulsoras. Por otra parte, los modelos deductivos se estructuran en torno a las relaciones críticas entre el ser humano y el entorno centrando la atención en los datos necesarios para explorar esas relaciones. Es decir, emplean la teoría para predecir los futuros patrones. El enfoque inductivo se basa, con demasiada frecuencia, en datos fácilmente disponibles que no siempre representan plenamente algunos los procesos.

El modelo desarrollado en este proyecto se basa en los principios de continuación de las tendencias históricas e interacción de los factores y, en algunos casos en el de idoneidad de la tierra. No es un modelo espacialmente explícito puede es simplemente un sub-módulo dentro de un modelo general y no se considera que sea necesario tal nivel de precisión. Además es dinámico y descriptivo

## **2.2. Modelos sobre los cambios de uso del suelo**

Los modelos seleccionados no se han descrito de forma exhaustiva, por ejemplo, aspectos diferentes a los usos del suelo o descripción en profundidad de las ecuaciones, puesto que esto se encuentra fuera del alcance de este



documento, y existe una gran cantidad de documentación en sus respectivas páginas web.

### 2.2.1. GLOBIOM

GLOBIOM (Global Biomass Optimization Model) es un modelo de equilibrio parcial recursivo dinámico desarrollado por la IIASA (International Institute for Applied Systems Analysis). Integra los sectores agrícola, bioenergético y forestal para proporcionar un análisis sobre cuestiones globales relativas a la competición por el uso de la tierra entre los principales sectores de producción dependientes de ella. Modela los cambios a lo largo del tiempo (dinámico), el valor de la demanda y de la producción se iguala en cada periodo (equilibrio) y, aunque cubre con gran detalle algunos sectores la información sobre otros es externa (parcial). El modelo divide el mundo en 11 regiones, que pueden ser desagregadas hasta un total de 37. La resolución espacial varía entre cuadrículas 5'' (~10x10km) y 30'' (~50x50km) (IIASA, 2015).

El modelo cuenta con una base de datos exhaustiva (Skalský et al., 2008) sobre datos geoespaciales sobre el suelo, del clima, la topografía, y la cubierta, uso y gestión de la tierra. En la Figura 2.1 se muestran, junto a su descripción, los usos del suelo considerados en GLOBIOM.

Name	Description
Cropland	GLOBIOM covers 18 major crops, which represented about 80 % of the 2007 global harvested area. Four management systems are considered (irrigated, high input – rainfed, low input – rainfed and subsistence) corresponding to the IFPRI crop distribution data classification.
Grassland	Managed grassland used for livestock production.
Forest, managed	Managed forests are used for wood production. Five primary products can be harvested from managed forests: saw logs, pulp logs, other industrial logs, firewood, and energy biomass.
Forest, unmanaged	Forest reserve currently not harvested.
Forest, protected	Protected forest not available for wood supply.
Short rotation plantations	The energy biomass, which can come from managed forest and short rotation tree plantations can be used in bioenergy chains for polyproduction of ethanol, methanol, heat and power, and biogas mixes.
Other natural vegetation	Other land that can be converted to managed grassland or short rotation plantations.

**Figura 2.1.** Tipos de uso del suelo y su descripción considerados en GLOBIOM (Fuente: IIASA, 2014)

Dada la dificultad para diferenciar entre las tierras de pastoreo y pastos naturales, se establece la categoría de tierras de pastoreo, definida como la superficie necesaria para alimentar al ganado y se fusionan los pastos naturales en la categoría de tierra de otra vegetación natural. Por otra parte, dado que no existe un mapa global sobre la superficie de plantaciones su asignación inicial se hace mediante optimización a partir de la cubierta forestal (Havlík et al., 2011).

Los datos sobre la cubierta del suelo para el año base en cada región se obtienen del GLC2000 (The Global Land Cover for year 2000), que atribuye a

cada píxel de 1x1 km de resolución una determinada cubierta del suelo gracias a técnicas de teledetección. Las categorías que considera GLC2000 son las que se muestran en la Figura 2.2, y se agrupan en las categorías de GLOBIOM en base a los criterios de la Figura 2.3 (Skalský et al., 2008).

LAND COVER CLASS	CLASS DESCRIPTION
1	Tree Cover, broadleaved, evergreen
2	Tree Cover, broadleaved, deciduous, closed
3	Tree Cover, broadleaved, deciduous, open
4	Tree Cover, needle-leaved, evergreen
5	Tree Cover, needle-leaved, deciduous
6	Tree Cover, mixed leaf type
7	Tree Cover, regularly flooded, fresh water
8	Tree Cover, regularly flooded, saline water
9	Mosaic: Tree Cover / Other natural vegetation
10	Tree Cover, burnt
11	Shrub Cover, closed-open, evergreen
12	Shrub Cover, closed-open, deciduous
13	Herbaceous Cover, closed-open
14	Sparse herbaceous or sparse shrub cover
15	Regularly flooded shrub and/or herbaceous cover
16	Cultivated and managed areas
17	Mosaic: Cropland / Tree Cover / Other natural vegetation
18	Mosaic: Cropland / Shrub and/or grass cover
19	Bare Areas
20	Water Bodies
21	Snow and Ice
22	Artificial surfaces and associated areas
23	No data

**Figura 2.2.** Categorías de cubierta del suelo de GLC2000 (Fuente: Skalský et al., 2008)

**Table 4.1:** GLC2000 classes derived global database land cover classes

GLOBAL DATABASE LAND COVER CLASS	ORIGINAL GLC2000 CLASSES (Tab. 2.1)
total agricultural land	16,17,18
grassland	13,
forest	1, 2, 3, 4, 5, 6, 9, 10
wetlands	7, 8, 15
other natural vegetation	11, 12, 14
not relevant land covers	19, 20, 21, 22

**Figura 2.3.** Correspondencia entre las categorías de GLC2000 y los usos del suelo de GLOBIOM (Fuente: Skalský et al., 2008)

El equilibrio del mercado se calcula eligiendo en cada caso el uso de la tierra que maximice la suma del excedente del productor y del consumidor. Todos los cambios de uso del suelo que se producen en GLOBIOM son debidos a la expansión de la agricultura o la silvicultura y las opciones de cambio están limitadas, tanto por restricciones biofísicas como por criterios de idoneidad de la tierra. La idoneidad de la tierra se obtiene a nivel de cuadrícula, pues la productividad de cada tipo de cultivo es específica a este nivel. La rentabilidad de la conversión de cualquier superficie en tierras de cultivo se calcula a partir de su productividad y el coste derivado de la conversión. Un enfoque similar se utiliza para la productividad de las praderas y los pastos. Los posibles cambios que contempla el modelo son los que aparecen en la Figura 2.4 (Havlík et al., 2011; Havlík et al., 2018).

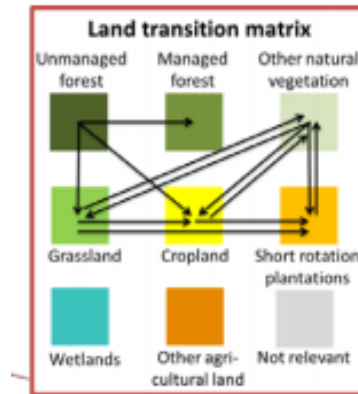


Figura 2.4. Matriz de transición entre usos del suelo de GLOBIOM (Fuente: Havlík et al., 2018)

GLOBIOM indica que se presentó especial atención a los humedales (*wetland*), sin embargo, debido a la escasa información disponible al respecto de las conversiones de humedales a otros usos del suelo ha resultado imposible modelar de manera explícita dichos cambios (Havlík et al., 2018).

La estructura general del modelo se muestra en Figura 2.5.

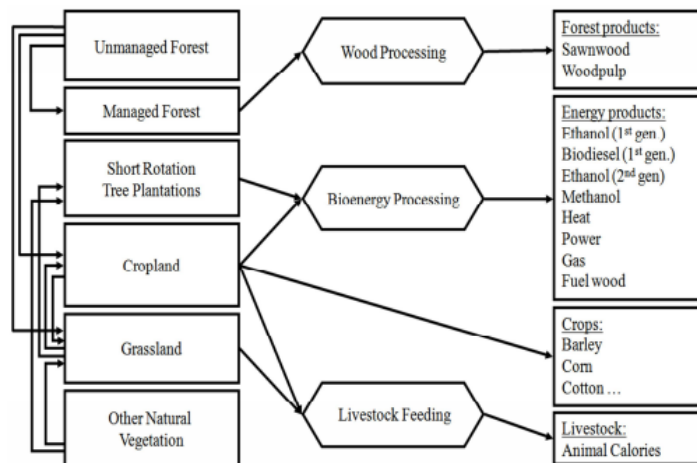


Figura 2.5. Estructura general de GLOBIOM (Fuente: IIASA, 2014)

### 2.2.2. GCAM

GCAM (Global Change Assessment Model) es un modelo global desagregado en regiones políticas que interactúan a través del comercio internacional. Calcula la oferta, la demanda y los precios en intervalos de 5 años para una serie de productos entre los cuales se encuentran productos agrícolas y forestales. El comportamiento económico está basado en el equilibrio.

GCAM representa el sistema terrestre en 283 unidades espaciales, resultado de la intersección de 32 regiones socio-económicas útiles para representar variables económicas como la producción industrial, el comercio o el uso de la energía y 18 zonas agroecológicas (AEZs), empleadas en el trabajo con

variables como el tipo de vegetación y la productividad de los cultivos que son más homogéneas en base al clima (Le Page et al., 2016).

Estas 283 unidades espaciales pueden clasificarse en 11 categorías de uso del suelo organizadas en estructura nodal como se muestra en la Figura 2.6.

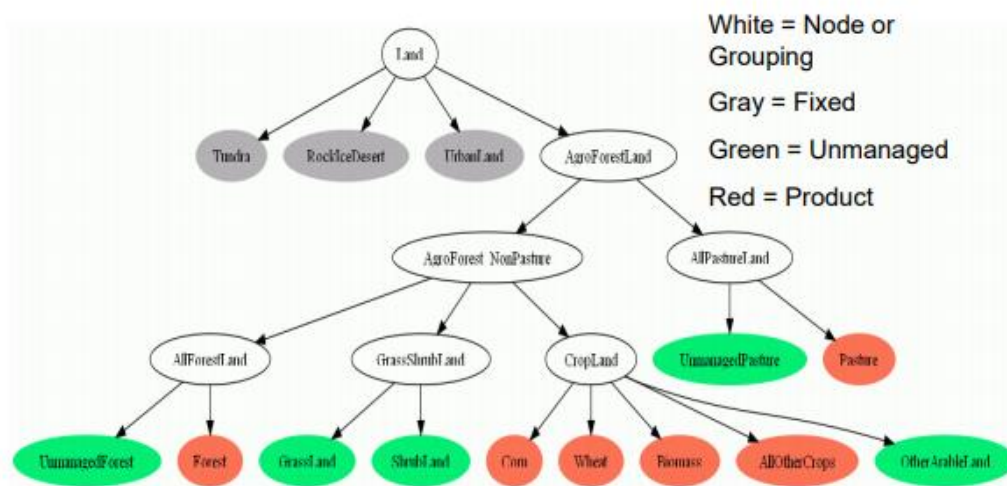


Figure 1.2 Land use types and land nesting in GCAM 3.0

Figura 2.6. Usos de la tierra en GCAM (Fuente: Kyle, 2011)

Los usos incluyen varios tipos de vegetación natural (usos no productivos) como los bosques o los pastizales no gestionados y varios tipos de tierras productivas como las tierras de pastoreo, los bosques gestionados o las tierras de cultivo, en las cuales pueden producirse de una veintena de productos agrícolas (ej. maíz, arroz), de los cuales cinco son cultivos energéticos (Le Page et al., 2016). Tres de estos usos (tundra, roca/hielo/desierto y área edificada) no se consideran disponibles para ningún otro uso, mientras que el resto está sujeto a posibles cambios de uso del suelo (Kyle, 2011).

Los datos sobre la distribución geográfica los distintos usos de la tierra en el año base, 2005, así como la tendencia histórica de cada uso de la tierra se han obtenido de los mapas espaciales HYDE (History Database of the Global Environment) y de los datos de vegetación potencial de SAGE (Centre for Sustainability and the Global Environment). También se emplea la base de datos de FAO (Organización para la Agricultura y la Alimentación) (FAOSTAT) para realizar ajustes. La correspondencia entre los usos de la tierra considerados en GCAM y las categorías de HYDE y SAGE se refleja en la Figura 2.7. Se considera preferentemente la clasificación de HYDE y se emplea SAGE para concretar el tipo de uso (Kyle, 2011).



SAGE land type	HYDE land type	GCAM land type
Tropical Evergreen Forest/Woodland	Unmanaged	Forest (managed and unmanaged)
Tropical Deciduous Forest/Woodland	Unmanaged	Forest (managed and unmanaged)
Temperate Broadleaf Evergreen Forest/Woodland	Unmanaged	Forest (managed and unmanaged)
Temperate Needleleaf Evergreen Forest/Woodland	Unmanaged	Forest (managed and unmanaged)
Temperate Deciduous Forest/Woodland	Unmanaged	Forest (managed and unmanaged)
Boreal Evergreen Forest/Woodland	Unmanaged	Forest (managed and unmanaged)
Boreal Deciduous Forest/Woodland	Unmanaged	Forest (managed and unmanaged)
Evergreen/Deciduous Mixed Forest/Woodland	Unmanaged	Forest (managed and unmanaged)
Savanna	Unmanaged	Grassland
Grassland/Steppe	Unmanaged	Grassland
Dense Shrubland	Unmanaged	Shrubland
Open Shrubland	Unmanaged	Shrubland
Tundra	Unmanaged	Tundra
Desert	Unmanaged	RockIceDesert
Polar Desert/Rock/Ice	Unmanaged	RockIceDesert
[ALL]	Pasture	Pasture (managed and unmanaged)
[ALL]	Built-up land	Cropland
[ALL]	Cropland	Urbanland

**Figura 2.7.** Correspondencia entre los usos del suelo de GCAM y las categorías de SAGE y HYDE (Fuente: Kyle, 2011)

### Tierras de cultivo

El total de tierras de cultivo disponibles para cosecha cada año se calcula como la tierra de cultivo HYDE menos la tierra en barbecho conocida en cada región. La superficie de tierra en barbecho se calcula para cada región a partir de los datos de FAOSTAT. La tierra de barbecho entra en GCAM como la categoría otras tierras arables (*other arable land*).

El ratio cosechado-cultivado se calcula como la suma del área cosechada, para todos los cultivos, dividida entre el área de tierras de cultivo que se considera que están en producción, es decir, no están en barbecho. En las regiones en las que la relación es inferior a 1 se establece que todos los cultivos tienen una relación de valor 1 y la discrepancia resultante se añade a la categoría de otras tierras arables. En aquellas en las que la relación es superior a 2.5 se fija en 2.5 y se convierten tierras no gestionadas (pastizales, tierras de matorrales, bosques y pastos no gestionados) en tierras de cultivo. La asunción de 2.5 como máximo pretende ser coherente con la literatura que indica que existe un límite físico 3 cosechas al año.

### Bosques y pastos gestionados

El área de bosque gestionado se calcula, en cada periodo, en base a la producción de madera anual en cada región dividida entre la producción estimada de biomasa forestal en cada AEZ.

El área de tierras de pastoreo gestionadas se calcula de manera similar a los bosques gestionados. Su producción en cada región se calcula como el aporte de los pastos al sistema de alimentación del ganado, que puede ser por pastoreo o por alimentación a partir de cultivos, y se divide entre la producción de biomasa de los pastos estimada para cada AEZ. Se establece como máximo





que solo el 85% del total de los pastos puedan ser gestionados, en caso de que en el cálculo se obtenga una necesidad superior esto se limita y se supone un mayor rendimiento de los pastos.

### Cambios de uso del suelo

En última instancia los cambios en GCAM se hacen en base al beneficio que puede obtenerse de cada uso de la tierra así como de un exponente que para cada cambio uso del suelo que refleja la mayor o menor probabilidad de que este se produzca. En el caso de las tierras productivas (tierras de cultivo o pastoreo y bosques gestionados) las tasas de beneficio son endógenas, calculadas como el beneficio de los productos primarios producidos en ella y el valor del carbono en ella (si este tiene un precio). Para las tierras no gestionadas las tasas son exógenas, y se calculan a partir de los datos de GTAP. Esto permite calcular el valor total de la tierra, que es igual al de todos los productos que se obtienen de ella, y que dividido entre la cantidad de tierra en producción en cada región permite obtener el valor de la tierra por unidad de superficie. Este es el valor que se le da a las tierras no gestionadas en cualquier nodo para la región en cuestión

Generalmente se supone más fácil, es decir, se asignan exponentes más altos, al sustituir productos dentro de cada nodo que entre distintos nodos. Lo que significa que resulta más sencillo cambiar, por ejemplo, de un tipo de cultivo a otro que convertir tierras de pastos o bosques en tierras de cultivo. Por otra parte los exponentes en las zonas áridas son más bajos para evitar procesos inviábiles, como por ejemplo la expansión de los bosques en tierras áridas.

### **2.2.3. FeliX Model**

El modelo FeliX (Functional Enviro-economic Linkages Integrated neXus) incluye los siguientes ocho sectores: Economía, Energía, Ciclo del Carbono, Clima, Biodiversidad, Agua, Población y Uso del Suelo permitiendo la realimentación entre ellos. En FeliX la tierra se divide en cuatro categorías principales: superficie agrícola (*agricultural land*), superficie forestal (*forest land*), superficie urbana (*urban and industrial land*) y otras tierras (*other land*), entre las que se incluyen los pastizales (*grassland and woodland*). La estructura del módulo de Uso del Suelo en FeliX se muestra en la Figura 2.8.

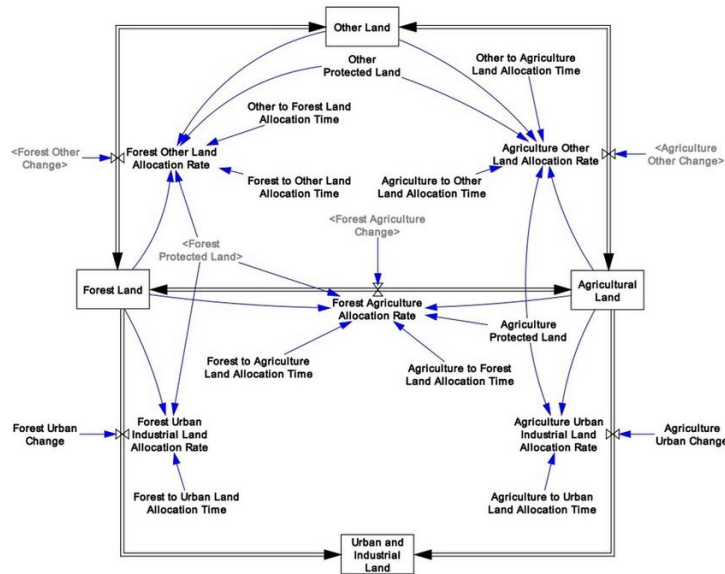


Figura 2.8. Estructura de FeliX (Fuente: Rydzak et al., 2013)

FeliX es un modelo programado en Vensim, de manera que cada categoría se representa mediante un stock. Los stocks de todas las categorías pueden crecer o decrecer, excepto el de superficie urbana que solo puede crecer, debido a los posibles cambios de uso del suelo. Los flujos (cambios de uso del suelo) se modelan como procesos naturales dependientes del tiempo. Por ejemplo, al abandonar una tierra agrícola esta se cubre primero de hierba, más tarde de arbustos y por último de árboles. Cuanto más fácil sea transformar una zona, menor será el tiempo impuesto. En los cambios “bosque a otros”, “bosque a agrícola” y “agrícola a otros”, existen, además de los procesos naturales de transformación, otras fuerzas que impulsan el ritmo de expansión o reducción del área.

Algunas de las tierras forestales y otras tierras están protegidas, lo que implica que están excluidas de cualquier tipo de transformación, es decir, actúan como límites. Las tierras forestales protegidas aumentan progresivamente.

Las tierras agrícolas se encuentran subdivididas en: arables, cultivos permanentes y tierras de pastoreo siguiendo la terminología de FAO. Estas superficies se dedican a la producción de alimentos vegetales o animales. La superficie necesaria de las mismas calcula a partir del volumen de población, las dietas, el PIB per cápita y la demanda de biocombustibles (definida por el módulo de energía). En caso de surgir discrepancia entre las tierras necesarias y las existentes se activan los procesos de transformación.

Excluyendo las tierras forestales protegidas una fracción de los bosques se dedica a la tala para la extracción de biomasa. La demanda de la misma la determina el módulo de energía. La relación entre los terrenos forestales necesarios y los disponibles, escalada por un factor de capacidad de expansión



de los bosques, activa la transformación entre las tierras forestales y otras tierras.

La transformación de zonas agrícolas en zonas forestales se produce si hay tierras agrícolas que no están en uso y no existe demanda de tierras agrícolas (existentes menor que necesarias). Al contrario, si existe demanda la expansión de tierras agrícolas se hará a expensas del bosque. Ambos procesos son escalados por un factor de capacidad de expansión. Lo mismo ocurre entre tierras agrícolas y otras tierras.

La expansión del área urbana a costa de los bosques y las tierras agrícolas es impulsada por el crecimiento de la población.





## **3. DINÁMICA DE SISTEMAS**

### **3.1. Introducción**

La Dinámica de Sistemas nació en el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT) en los años 50, desarrollada por el profesor Jay W. Forrester a partir de la teoría de control y el diseño de servomecanismos (John D. Sterman, 2002).

En la definición de Dinámica de Sistemas se entiende sistema como una unidad cuyos elementos interaccionan entre sí al verse continuamente afectados unos por otros. Por su parte, dinámica define el carácter cambiante de aquello a lo que asociamos el adjetivo (Aracil, 1997). La función de la Dinámica de Sistemas es modelar las relaciones entre todas las partes del sistema y cómo estas influyen en el comportamiento del mismo a lo largo del tiempo. Es, en parte, un método para desarrollar y probar modelos matemáticos formales complejos y realizar simulaciones de sistemas dinámicos no lineales con el objetivo de analizar y diseñar políticas. Sin embargo, el éxito de este diseño requiere de algo más que herramientas técnicas y modelos matemáticos, ya que, a pesar de sus raíces en la ingeniería, la Dinámica de Sistemas no es la mera aplicación de las matemáticas a los problemas sociales, sino que, para ser eficaz, debe considerar los problemas sociales, políticos y ecológicos que son consecuencia de las soluciones técnicas que la ingeniería propone. Es por esto que la Dinámica de Sistemas es fundamentalmente interdisciplinar (John D. Sterman, 2002).

El objetivo principal de la Dinámica de Sistemas es “comprender las causas estructurales que provocan el comportamiento del sistema” (Martín García, 2003). Esto resulta más complicado de lo que podría parecer dada la tendencia humana a pensar en términos lineales y no tener en cuenta las realimentaciones que nos rodean. Se tiende a pensar que al enfrentarse a un problema, se emprende una acción, se obtiene un resultado y ese es el fin del problema. Sin embargo, la realidad es bien distinta ya que, generalmente, la acción que se emprende conlleva problemas y, por consiguiente, acciones futuras. No existe ni principio ni fin, sino que vivimos en complejos bucles causados por realimentaciones (Forrester, 2009).

La complejidad dinámica puede surgir incluso en sistemas simples con baja complejidad combinatoria. Las principales razones de esta complejidad son (John D. Sterman, 2002): (i) los cambios de los sistemas se producen en muchas escalas de tiempo que en ocasiones interactúan; (ii) los sistemas están fuertemente acoplados, interactúan entre sí y con el mundo lo que produce la creación de bucles; (iii) rara vez el efecto es rara vez proporcional a la causa y lo que ocurre a nivel local rara vez es extrapolable a mayor escala; (iv) dependen de la historia; (v) pequeñas perturbaciones pueden llegar a modificar la estructura global; (vi) las reglas de decisión de los agentes varían

a lo largo del tiempo.; (vii) los retrasos producen que la respuesta a corto plazo sea diferente de la respuesta a largo plazo; (viii) en ocasiones la causa y el efecto están alejados temporalmente lo que resulta contra-intuitivo; (iv) la complejidad de los sistemas con los que se trabaja desborda la capacidad de comprenderlos.

## 3.2. Elementos Principales

En este apartado se explica la estructura básica empleada en los modelos en dinámica de sistemas.

### 3.2.1. Fronteras del sistema

El Sistema debe, con el menor número de elementos posibles, permitir realizar simulaciones que expliquen cuál de las políticas o propuestas de actuación consideradas es más eficaz para solucionar el problema planteado. El proceso natural del modelado es crear inicialmente un modelo pequeño que se vaya expandiendo y perfeccionando. A continuación, es imprescindible simplificar y suprimir aquellos elementos que no se consideran decisivos (Martín García, 2003).

### 3.2.2. Diagrama Causal

Mayoritariamente se emplea el Diagrama Causal para ilustrar los elementos clave del sistema y las relaciones que se establecen entre ellos. En este diagrama las relaciones entre las variables se representan mediante flechas. Si estas van acompañadas de un signo “+” el cambio en la variable destino se producirá en el mismo sentido en que se produce el cambio en la variable origen. Mientras que, si el signo es “-” el cambio en la variable destino es en sentido contrario al producido en la variable origen.

En la Figura 3.1 un incremento en la variable A produce un incremento en B, mientras que en la Figura 3.2 el incremento de A produce el decrecimiento de B.



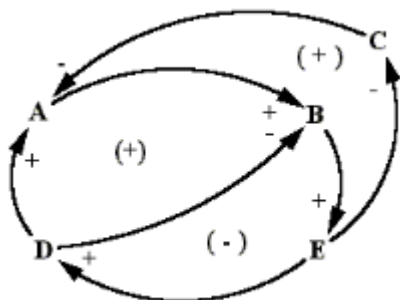
**Figura 3.1.** Relación causal positiva  
(Fuente: Martín García, 2003)



**Figura 3.2.** Relación causal negativa  
(Fuente: Martín García, 2003)

Una cadena cerrada de relaciones causales (Figura 3.3) se denomina bucle, retroalimentación o feedback. Se definen como positivos cuando el número de relaciones negativas es par y negativos cuando es impar. Independientemente de la situación de partida los bucles negativos llevan al modelo a una situación estable, por el contrario los positivos lo llevan a una situación inestable. En la realidad los sistemas contienen ambos tipos de bucles y el comportamiento final depende de cuál es el dominante según el momento. Los bucles resultan

muy útiles pues permiten conocer y comprender, gracias a la estructura del sistema, las razones estructurales de su comportamiento y actuar en base a ellas con el objetivo de modificar dichos bucles (Martín García, 2003).



**Figura 3.3.** Representación de un bucle causal  
(Fuente: Martín García, 2003)

### 3.2.3. Elemento limitativo y elementos clave

El elemento limitativo es aquel que limita el crecimiento del sistema. Es único en cada momento y varía a lo largo del tiempo, es decir, es dinámico. Llegar a conocer cuál será el próximo elemento limitativo permite avanzar en la comprensión y controlar con eficacia la evolución del sistema.

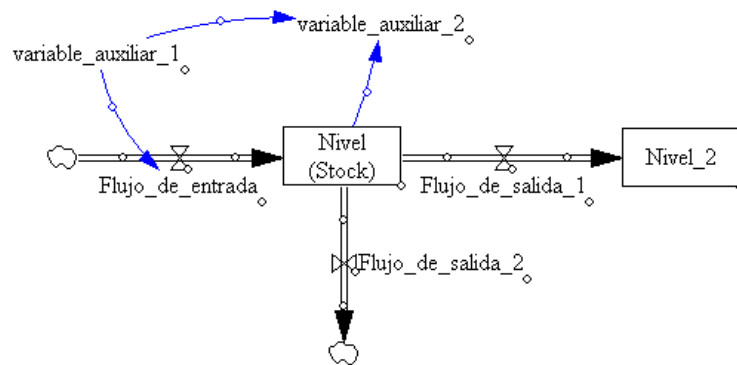
Los elementos clave (en inglés *leverage points*) son los puntos de palanca, presión o influencia. En un sistema suelen existir varios, que no son evidentes ni fáciles de identificar, y que no es habitual que varíen a lo largo del tiempo. Pueden emplearse para conseguir grandes cambios con poco esfuerzo, aunque se corre el riesgo de que el sistema responda de forma violenta (Martín García, 2003).

### 3.2.4. Diagramas de Flujo o de Forrester

Los Diagramas de Flujo son una traducción de los Diagramas Causales a una terminología comprensible por el ordenador. Para construirlos debemos identificar entre los elementos del sistema:

- Los niveles (stocks): Son aquellos que muestran en cada instante la situación del modelo y presentan una acumulación, memoria o almacén. Varían únicamente en función de los flujos.
- Los flujos: Son los elementos que causan la variación de los niveles. Son funciones temporales que recogen el resultado de las decisiones tomadas en el sistema.
- Variables auxiliares: Son el resto de elementos del sistema. Se relacionan entre ellas, con los flujos y con los stocks. Son los parámetros que representan los aspectos que condicionan el comportamiento de los flujos.

Como se muestra en la Figura 3.4, los niveles se representan con rectángulos, los flujos como válvulas. Cuando el flujo parte desde una nube que representa esta representa una fuente inagotable. También posible que el flujo parta desde un nivel hacia otro nivel, o que el flujo salga desde el nivel hacia una nube, que en este caso representa un sumidero. Un nivel puede tener varios flujos de entrada y de salida. Las variables auxiliares que condicionan el comportamiento de los flujos se unen a estos mediante flechas.



**Figura 3.4.** Representación de un diagrama de flujos  
(Fuente: Creación propia)

Todas estas variables, auxiliares, flujos y niveles están relacionadas entre sí a través de expresiones matemáticas, que en ocasiones pueden ser simples relaciones lineales o pueden llegar a ser muy complejas. En el caso de los niveles su valor siempre será la acumulación existente más el valor del flujo o flujos de entrada menos el o los de salida, como se muestra en la Ecuación 3.1.

$$\text{Ecuación 3.1} \quad nivel(t) = \int_{t_0}^t [flujo_{entrada}(s) - flujo_{salida}(s)] ds + nivel(t_0)$$

Pueden existir retardos, retrasos o delays que es el tiempo de demora entre una acción y su efecto. Son esenciales para comprender la dinámica de los sistemas. Matemáticamente se calculan como se muestra en la Ecuación 3.2.

$$\text{Ecuación 3.2} \quad Salida(t) = Entrada(t - T) \quad \text{siendo } T \text{ el retardo}$$

### **3.3. Proceso de modelado**

La Real Academia Española (RAE) define modelo como “esquema teórico, generalmente en forma matemática, de un sistema o de una realidad compleja que se elabora para facilitar su comprensión y el estudio de su comportamiento”. “El arte del proceso de la construcción de modelos es saber qué cortar y el propósito del modelo actúa como cuchillo lógico. Él proporciona los criterios para decidir qué puede ser ignorado, de forma que solo queden las características necesarias para cumplir el objetivo” (John D. Sterman, 2002).

Las fases de este proceso son las siguientes (Sterman, 2000):

- a. Articulación del problema: Consiste en seleccionar las fronteras, encontrar las variables y conceptos clave, fijar el horizonte temporal, de

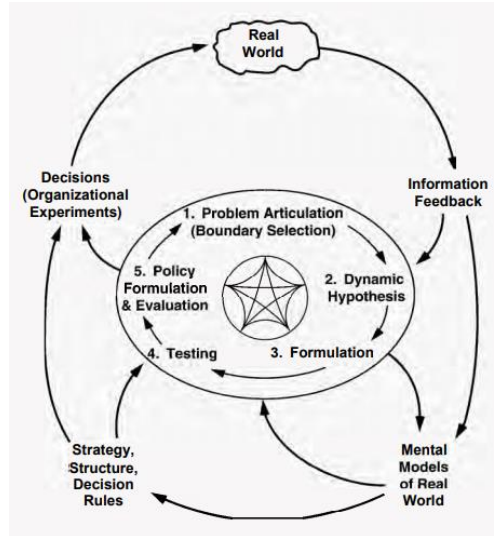




cara al futuro y al pasado y buscar el comportamiento histórico de las variables clave y preguntarse cuál debería ser su comportamiento futuro.

- b. Formulación de hipótesis: Consiste generar hipótesis iniciales en base al comportamiento actual del problema, formular hipótesis que expliquen la dinámica del sistema como consecuencia endógena de la estructura de retroalimentación de este, generar mapas causales en base a las hipótesis iniciales, las variables claves y tendencias históricas.
- c. Formulación del modelo dinámico: Consiste en desarrollar la estructura y fijar las reglas de decisión, estimar los parámetros, las condiciones iniciales y las relaciones entre variables y comprobar su consistencia en base al propósito y frontera del sistema.
- d. Prueba del modelo: Se debe comprobar que es adecuado para su propósito. Se le somete a pruebas de robustez y sensibilidad con el propósito de observar si su comportamiento ante condiciones extremas o ante incertidumbre es realista.
- e. Diseño de políticas y evaluación: Se diseñan escenarios, políticas o nuevas reglas de decisión aplicables al modelo con el objetivo de estudiar los efectos de la aplicación de cada una de ellas.

Es importante remarcar que este no es un proceso lineal, sino que es un proceso realimentado. A lo largo del modelado se produce un constante cuestionamiento, prueba y perfeccionamiento, generándose un ciclo iterativo entre todas las etapas del proceso. Además, los experimentos y pruebas llevados a cabo sobre el modelo retroalimentan los modelos mentales y provocan la creación de nuevas estructuras o reglas de decisión que conducen a cambios y mejoras en el modelo formal. En la Figura 3.5 se observan las interacciones entre las etapas de construcción del modelo así como las de este con el mundo real.



**Figura 3.5.** Interacciones en el proceso de modelado  
(Fuente: Sterman, 2000)

### **3.4. Programa empleado. VENSIM.**

Vensim es una herramienta visual de modelización que permite conceptualizar, documentar, simular, analizar y optimizar modelos de dinámica de sistemas. Provee una forma simple y flexible de construir modelos de simulación, a través de, o bien lazos causales o bien diagramas de stock y flujo (SyntheSim, 2018).

Vensim ofrece los siguientes productos: PLE (Personal Learning Edition), PLE Plus, Professional y DSS (Decision Support System). Estos comparten esencialmente la misma interfaz y cada uno es una versión mejorada del producto al que precede. PLE Plus añade a PLE un uso más fácil de los datos y capacidades de simulación de sensibilidad. Professional permite el uso de subíndices (subscripts) y ayuda a la optimización. DSS incluye la posibilidad de utilizar funciones externas y simulaciones compiladas (VENTANA Systems, n.d.). Para el desarrollo de este trabajo se ha empleado Vensim DSS.

### 3.4.1. Interfaz de usuario

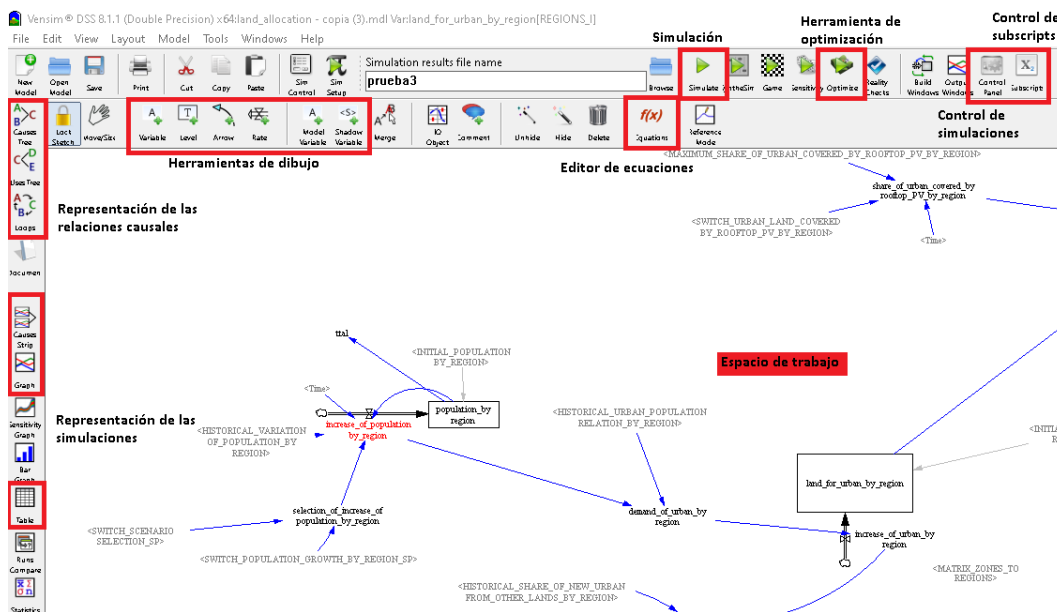


Figura 3.6. Interfaz de usuario de Vensim (Fuente: Creación propia)

En la Figura 3.6 se muestra el espacio de trabajo de Vensim así como las herramientas que permiten el dibujo de stocks, flujos, variables auxiliares y variables sombras, que resultan muy útiles para representar variables ya existentes en otra parte del modelo y evitar así que el modelo se llene de flechas. Las herramientas de representación de relaciones causales muestran la estructura del modelo a través de diagramas causales y bucles

También se muestran las herramientas para simular el modelo y para poder visualizar de forma gráfica los resultados de cada simulación. El control de simulaciones permite representar más de una simulación a la vez.

El control de subíndices permite que una variable represente un rango de conceptos (ej. subíndice “usos de la tierra”, rango “bosque”, “cultivos”, “urbana”), es decir, permite añadir un vector a una variable. El editor de ecuaciones permite definir cada variable en base a expresiones matemáticas de tal forma que una variable dependa de otras variables.

Por último, la herramienta de optimización permite ajustar los resultados de una variable a los obtenidos, para esa misma variable, en otra simulación mediante la variación del valor de las constantes del modelo que el usuario decida.

### 3.4.2. Ecuaciones destacadas

- **IF THEN ELSE** ('Condición', 'OnTrue', 'OnFalse'): Gracias a esta ecuación se le puede dar valores diferentes a una variable en función de si se cumple o no una condición.



- **DELAY1** ('Variable', 'Time'): Gracias a esta ecuación puede conocerse el valor de una variable hace tantos tiempos de paso como se especifique en el campo time.
- **SUM** (x[i!]): Gracias a esta ecuación puede sumarse el valor de todos los rangos de una variable con subíndice.

### 3.4.3. Importar y exportar datos

Resulta muy útil y cómodo importar datos desde documentos Excel. Para esto se utilizan las siguientes funciones:

- Datos constantes (ej. área inicial de bosque): **GET DIRECT CONSTANTS** ('/carpeta/prueba.xlsx', 'Hoja1', 'A1'). El primer argumento se corresponde con el nombre y ubicación del documento Excel, que debe encontrarse en el mismo directorio que el modelo (archivo .mdl), el segundo es la hoja del documento en la que se encuentran los datos y el tercero es el nombre que se le ha dado en el documento Excel al conjunto de celdas que se desea importar. Puede importarse una única celda, una fila o columna o una matriz.
- Datos temporales (ej. tendencia del área forestal entre 1990 y 2010): **GET DIRECT DATA** ('/carpeta/prueba.xlsx', 'Hoja1', 'tiempo', 'A1'). El tercer argumento es el nombre que se le ha dado en el Excel las celdas en las que se encuentran los años de la serie temporal.

Los datos de cualquier variable pueden exportarse en archivos Excel o .dat desde la pestaña "Model".

### 3.4.4. Secuencia computacional e integración

#### Técnicas de integración

**Euler:** Proporciona la solución más rápida y simple. Se usa en la mayoría de los modelos. Es adecuada cuando existen simplificaciones y falta de información. Es el método empleado en este trabajo.

**Diff:** Realiza la integración de Euler pero almacena los valores calculados en el paso anterior. Está pensado para el trabajo con ecuaciones en diferencia.

**RK4:** Realiza la integración Runge-Kutta de cuarto orden. Se emplea para obtener una respuesta precisa rápidamente. Generalmente se usa en modelos de sistemas físicos, especialmente aquellos que implican oscilación.

#### Pasos de la simulación

Los pasos que da Vensim para simular un modelo cambian según el método de integración, para Euler son:



**i. Preparación:** Las constantes se ajustan a los valores especificados para ellas. Se leen todos los datos, se cargan los valores y se calculan las ecuaciones. Al final de este paso todas las constantes tendrán valor.

**ii. Inicialización:** Para cada stock del modelo, Vensim determina su nivel inicial de este. Al finalizar esta fase todos los niveles tendrán valor y es posible que algunas variables auxiliares también.

**iii. Cálculo de las variables auxiliares:** Se calculan a partir de la ecuación de cada una de ellas. Al final de este paso todas las variables del modelo tendrán un valor.

**iv. Almacenamiento de resultados:** Los valores de los stocks y de las variables auxiliares que resultan de estos se almacenan.

**v. Cálculo del flujo neto:** En base a las variables auxiliares se calcula la tasa neta de cambio, flujos, para cada stock.

**vi. Integración:** Para la integración con Euler, los resultados del paso anterior se multiplican por el TIME STEP (definido al crear el modelo) y se añaden a los valores de los stocks. Al terminar esta etapa el tiempo ha avanzado el tiempo de paso y se han calculado los nuevos valores de los niveles.

**vii. Repetición:** Se repiten los pasos 3, 4, 5 y 6 hasta llegar al tiempo final.





## **4. INTRODUCCIÓN AL PROYECTO LOCOMOTION**

### **4.1. Estructura y objetivos**

El proyecto europeo LOCOMOTION busca identificar los caminos más efectivos hacia una sociedad sostenible con bajas emisiones. Su objetivo principal es desarrollar un conjunto de IAMs, denominados WILIAM anidados para tres niveles geográficos: mundial, europeo y nacional para los 27 países miembros de la Unión Europea (UE) y el Reino Unido (RU). Para el estudio de las complejísticas interacciones entre el ser humano y su entorno, el proyecto recurre a diferentes técnicas y métodos, como la modelización de la Dinámica de Sistemas (DS) con el software Vensim, el Análisis Input-Output (IOA), los cálculos del Retorno de la Inversión en Energía (EROI), el Análisis del Ciclo de Vida (ACV), la huella de carbono y del suelo, la microsimulación y muchos otros. Para el desarrollo de los modelos WILIAM se toman como base modelos MEDEAS (Modelling the Energy Development under Environmental And Socioeconomic constraints) existentes, que fueron desarrollados en el marco del proyecto MEDEAS también por la Uva.

Los objetivos generales de LOCOMOTION son los siguientes:

- Transformar el modelo en un modelo regional, de 9 regiones, con el propósito de aumentar la cobertura y precisión.
- Mejorar el estado del arte de los IAMs mediante el aumento de la precisión de los módulos de MEDEAS y la incorporación de nuevos módulos.
- Integrar funcionalidades relevantes de otros modelos y comparar los resultados.
- Mejorar la evolución de escenarios integrando políticas de gestión de la demanda.
- Desarrollar un marco de modelado que represente mejor la incertidumbre.
- Mejorar la usabilidad de los IAMs mediante el desarrollo de interfaces gráficas de usuario y un juego de simulación.

Los modelos WILIAM se encuentran estructurados en siete módulos, con sus respectivos sub-módulos. Esta estructura, reflejada en la Figura 4.1, permite probar y ampliar cada módulo sin perjudicar la solidez del conjunto. Los módulos y sus funciones principales son los siguientes (LOCOMOTION, n.d.):

Economía y finanzas: Estima de la demanda final de bienes y servicios de unos 50 sectores económicos. La demanda final de energía se calcula, para cualquier fuente de energía primaria, en función de la intensidad energética de



cada sector económico. La demanda energética de los sectores económicos energéticos y no energéticos se contrastará con diferentes escenarios de desarrollo tecnológico, disponibilidad de energía y reducción del uso de combustibles fósiles. La economía se modela asumiendo posible desequilibrio (es decir, mercados no compensados), crecimiento basado en la demanda y restricciones de la oferta. El sub-módulo financiero permitirá comprender mejor las limitaciones de los sistemas económico y energético debidas a los activos financieros y a la deuda pública y privada.

Energías renovables y no renovables: El módulo incluye el potencial energético y la disponibilidad de recursos energéticos renovables y no renovables teniendo en cuenta las limitaciones biofísicas y temporales. Se consideran cinco combustibles finales (electricidad, calor, sólidos, gases y líquidos) y se diversos tipos de tecnologías energéticas. Para el cálculo del rendimiento energético se calcula la tasa de retorno energética (TRE; en inglés EROEI). Se tiene en cuenta la intermitencia de las fuentes de energía renovables.

Materiales no combustibles: El módulo tiene en cuenta la disponibilidad de materiales (por ejemplo, tierras raras, litio, plata, cobalto, indio, etc.) necesarios para la economía y el desarrollo de las infraestructuras energéticas. Se estima la evolución de las tasas de reciclaje por material y el consumo de energía asociado su extracción, lo que permite el cálculo endógeno y dinámico de la TRE de cada tecnología energética. Para modelar el transporte y el sector de la construcción se adopta un enfoque ascendente.

Infraestructuras y tecnologías energéticas: Incluye todas las infraestructuras necesarias para extraer, transportar y convertir las fuentes de energía primaria en cualquiera de los tipos de energía final considerados. Se estima la cantidad de materiales necesarios para su construcción en diferentes escenarios de transición energética y se comparan con la disponibilidad de reservas y recursos.

Medio ambiente: Incluye el ciclo del carbono (emisiones de GHG procedentes del consumo de energía por la demanda de los sectores económicos, compatibilidad con los escenarios de reducción de emisiones, estimación de la probabilidad de puntos de inflexión), el ciclo del agua y los principales aspectos de la competencia por el uso del suelo entre la generación de energía y otras necesidades. En particular, se considera la contribución a las emisiones de GHG de los cambios en el uso de la tierra producidos con fines económicos (LULUCF), de los biocombustibles y las necesidades de tierra para producción de energía.

Cambio climático: Proyecta los niveles de cambio climático en función de las emisiones de GHG resultado de la actividad humana. Además, a través de una función de daños, se hace una retroalimentación para captar el efecto del aumento de la temperatura global sobre la actividad humana.



**Población y sociedad:** Se centra en las diversas retroalimentaciones entre la energía, el medio ambiente, el cambio climático y la sociedad y bienestar humanos. Estudia cómo las transiciones en el sistema energético afectan a la sociedad (ej. desigualdad, migración y salud), diferenciando entre género y cohortes de edad, pero también la forma en que el cambio demográfico altera la demanda de energía. Se modelan varios de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (SDGs) de la ONU para evaluar su consecución bajo diferentes escenarios.

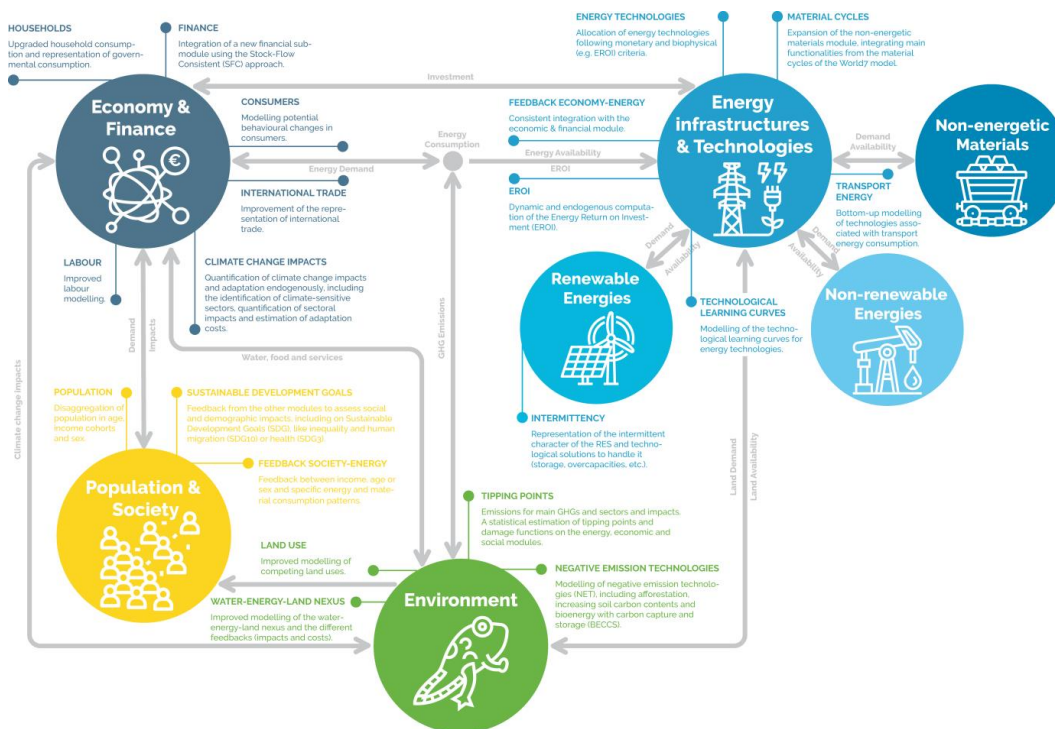
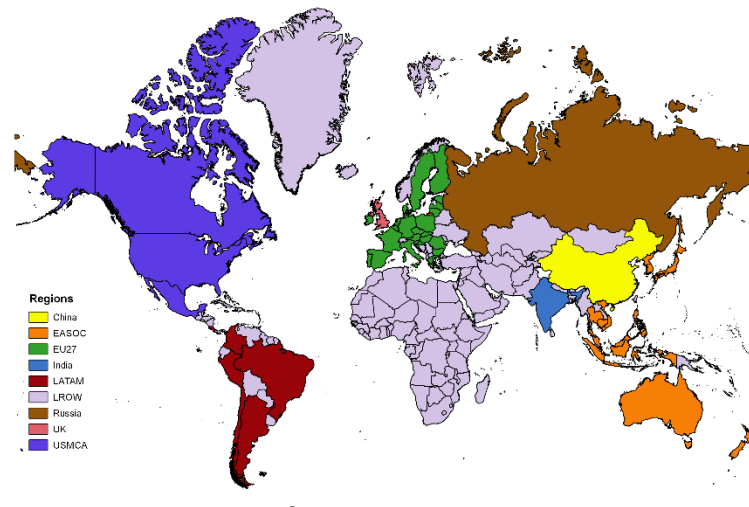


Figura 4.1. Estructura de los modelos WILLIAM (Fuente: LOCOMOTION, n.d.)

Para el desarrollo del proyecto este se divide en diferentes grupos de trabajo. Entre estos, cuatro son grupos destinados al modelado: WP4 (economía), WP5 (demografía), WP6 (tierra, agua y clima) y WP7 (energía). El grupo dentro del cual se desarrolla este proyecto es el WP6, aunque, debido a las conexiones entre módulos se han obtenido datos e información de otros grupos de trabajo.

## 4.2. Regiones socioeconómicas y zonas climáticas

El modelo global de WILLIAM se divide en las siguientes nueve regiones: EU27 (Unión Europea), UK (Reino Unido), CHINA, EASOC (Sudeste asiático y Oceanía), INDIA, LATAM (Latino América), RUSSIA, USMCA (Estados Unidos, México y Canadá) y LROW (Resto del mundo). Estas regiones se muestran en la Figura 4.2 y los países que agrupa cada una de ellas se pueden encontrar en el Anexo 1. A lo largo del proyecto se hará referencia a estas como regiones LOCOMOTION.



**Figura 4.2.** Regiones LOCOMOTION (Fuente: WP6 LOCOMOTION)

Estas regiones han sido formadas en base a criterios económicos lo cual es muy útil en cuanto a trabajar con todos los aspectos relacionados con la economía y la demanda de bienes físicos, como la energía, los alimentos o el agua. Sin embargo, esta agregación no es la más adecuada para trabajar con los recursos extraídos de la tierra, pues la mayor parte de los parámetros biofísicos que interesan al modelado del uso de la tierra (rendimiento de los cultivos, crecimiento de los bosques, disponibilidad de agua o irradiación solar) son dependientes de factores climáticos y no de los límites políticos de los países. Además, no solo algunas de las regiones LOCOMOTION son extremadamente heterogéneas (LROW incluye desde países africanos a europeos o latinoamericanos) lo que hace que agrupen muy diversos tipos de clima, sino que, en los países grandes como China o Estados Unidos, existen grandes diferencias respecto a las características climáticas dentro de los propios límites del país en función de la situación geográfica dentro de él.

Esto dificulta unificar demanda y producción, ya que, por ejemplo, la demanda de alimentos depende de criterios económicos mientras que, el rendimiento de las tierras de cultivo y la idoneidad para usar ciertas tierras como tierras de cultivo depende de criterios climáticos. La solución propuesta para atajar este problema es adoptar una desagregación mixta o doble. La demanda de los productos extraídos de la tierra como alimentos, materiales o energía, será calculada por regiones económicas o LOCOMOTION. Mientras que, la disponibilidad de estos productos será calculada por zonas climáticas.

Para esta regionalización climática se emplean las zonas Köppen. La clasificación climática de Köppen-Geiger fue creada en 1900 por el geógrafo ruso de origen alemán especializado en climatología Wladimir Peter Köppen y revisada más adelante por Rudolf Geiger. Consiste en una clasificación climática mundial que identifica cinco tipos de climas principales (tropical,

seco, templado, continental y polar) a partir de los cuales se realiza una subdivisión hasta alcanzar un total de treinta climas. Considerar todas estas subdivisiones exigiría, tanto un aumento en la complejidad computacional, como en el tratamiento y la búsqueda de datos. Dado que WILIAM no es exclusivamente un modelo de uso de la tierra, sino que el uso de la tierra es tan solo un sub-módulo dentro del conjunto no se estima necesario tan alto nivel de precisión, sino que, se considera correcto puede realizar una agrupación de estas treinta en ocho como se muestra en la Figura 4.3. Las zonas Köppen quedan distribuidas como se muestra en la Figura 4.4.

legend_Koppdefinition (climate_temperature_precipitation)	adj_Koppen
BSk Arid_Summer dry_cold arid	Cold arid
BWk Arid_Winter dry_cold arid	Cold arid
BWh Arid_Winter dry_hot arid	Hot arid
BSh Arid_Summer dry_hot arid	Hot arid
EF Polar_Fully humid_polar frost	Polar
ET Polar_Polar tundra	Polar
Dfc Snow_Fully humid_cool summer	Snow
Dfd Snow_Fully humid_extremely continental	Snow
Dsc Snow_Summer dry_cool summer	Snow
Dsd Snow_Summer dry_extremely continental	Snow
Dwc Snow_Winter dry_cool summer	Snow
Dwd Snow_Winter dry_extremely continental	Snow
Cfb Warm_temperate_Fully humid_warm summer	Temperate
Cfc Warm_temperate_Fully humid_cool summer	Temperate
Csc Warm_temperate_Summer dry_cool summer	Temperate
Cwc Warm_temperate_Winter dry_cool summer	Temperate
Af Equatorial_Fully humid_Tropical	Tropical
Am Equatorial_Monsoonal_Tropical	Tropical
As Equatorial_Summer dry_Tropical	Tropical
Aw Equatorial_Winter dry_Tropical	Tropical
Cwa Warm_temperate_Winter dry_hot summer	Warm
Cwb Warm_temperate_Winter dry_warm summer	Warm
Cfa Warm_temperate_Fully humid_hot summer	Warm
Csa Warm_temperate_Summer dry_hot summer	Warm
Csb Warm_temperate_Summer dry_warm summer	Warm
Dfa Snow_Fully humid_hot summer	Snow_hs
Dfb Snow_Fully humid_warm summer	Snow_hs
Dsa Snow_Summer dry_hot summer	Snow_hs
Dsb Snow_Summer dry_warm summer	Snow_hs
Dwa Snow_Winter dry_hot summer	Snow_hs
Dwb Snow_Winter dry_warm summer	Snow_hs

Figura 4.3. Correspondencia entre las zonas Köppen originales y las empleadas en WILIAM (Fuente: WP6 LOCOMOTION)

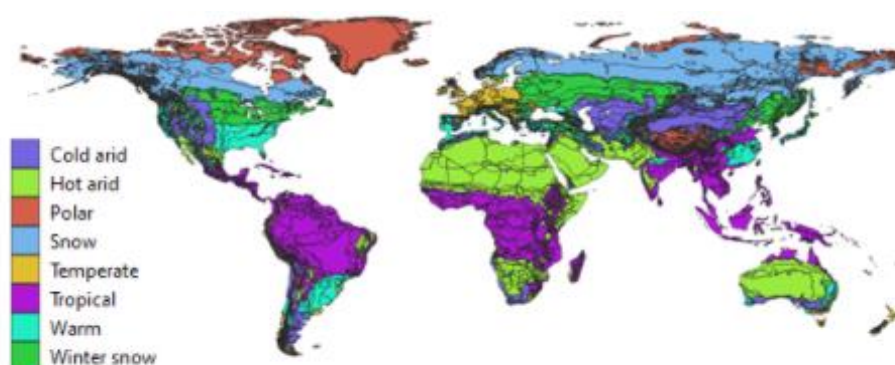


Figure 2: Köppen classification.

Figura 4.4. Zonas Köppen en WILIAM (Fuente: WP6 LOCOMOTION)



Para relacionar las zonas Köppen y las regiones LOCOMOTION se emplean unas matrices de transición que representan, en definitiva, el porcentaje de cada uso del suelo de cada región que se encuentra en cada zona Köppen o viceversa.

### **4.3. Módulo de Tierra, Agua y Clima**

Este proyecto se desarrolla dentro del módulo de medio ambiente de WILIAM también conocido como “Tierra, Agua y Clima”. Dado que LOCOMOTION toma como punto de partida el modelado de MEDEAS para mejorarlo, si es posible, en primer lugar se va a presentar el módulo de uso de la tierra del proyecto MEDEAS.

El módulo de uso del suelo es el menos desarrollado de todos los de MEDEAS. Este estaba mayoritariamente orientado al seguimiento de la demanda de tierras para la producción de energía y su objetivo principal era comparar la demanda de tierras producir energía de fuentes renovables (tanto electricidad como biomasa) con la demanda de otros usos. Es decir, MEDEAS calcula la demanda de suelo para biocombustibles de primera y segunda generación, energía eléctrica renovable, usos urbanos y la demanda de biomasa extraída del bosque (Pastor, 2020). La capacidad de crecimiento de la ocupación de tierra de estos usos está restringida en base a límites de sostenibilidad extraídos de una revisión bibliográfica. Las salidas (*outputs*) del módulo son los porcentajes de tierra utilizados para la producción de biocombustibles y las energías renovables, así como la pérdida de bosque, sin embargo, MEDEAS no modela de forma endógena la competencia por la tierra necesaria para producir entre energía, alimentos o para usos industriales (Pastor, 2020). Entre las tareas que deben llevarse a cabo para mejorar el módulo de MEDEAS, la tarea 6.1.3. es la modelización de la asignación o distribución del uso de la tierra, es decir, añadir esta competencia que MEDEAS no incluía. Este proyecto se centra en cubrir el desarrollo de esta tarea.

A continuación se presenta una visión general del módulo de Tierra, Agua y Clima de WILIAM para ubicar dentro de este dónde se desarrolla este proyecto y la motivación del mismo. En primer lugar, el módulo se divide en tres grandes bloques, como su propio nombre lo indica, que, además, se dividen en sus propios sub-módulos como se muestra en la Figura 4.5.

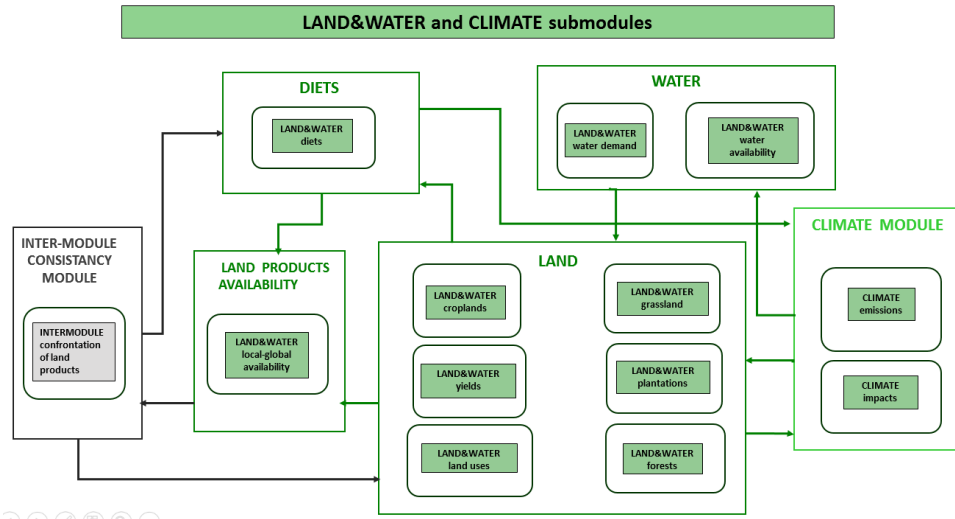


Figura 4.5. Sub-módulos dentro del módulo "Tierra, Agua y Clima"  
(Fuente: WP6 LOCOMOTION)

Entre los propios sub-módulos y entre el módulo y otros módulos existen conexiones, es decir, relaciones. Por ejemplo, los cambios de uso del suelo, se van a ver afectados tanto por las dietas como por el agua, dentro del módulo, y por la población, o la demanda de energía, que son variables calculadas por otros módulos. Además, las relaciones se convierten en más complejas puesto que las variables que afectan al modelo dependen a su vez de otras, por ejemplo, las dietas se ven condicionadas por el módulo de economía y de demografía. Además este sub-módulo proporciona información que es necesaria para otros. El sub-módulo de clima necesita conocer la superficie que cambia de uso de suelo para calcular las emisiones debidas a los cambios de uso del suelo y, el de dietas la necesita para calcular la capacidad real de producción de alimentos. La estructura de las relaciones que se establecen en el módulo de Tierra, Agua y Clima se presentan en la Figura 4.6.

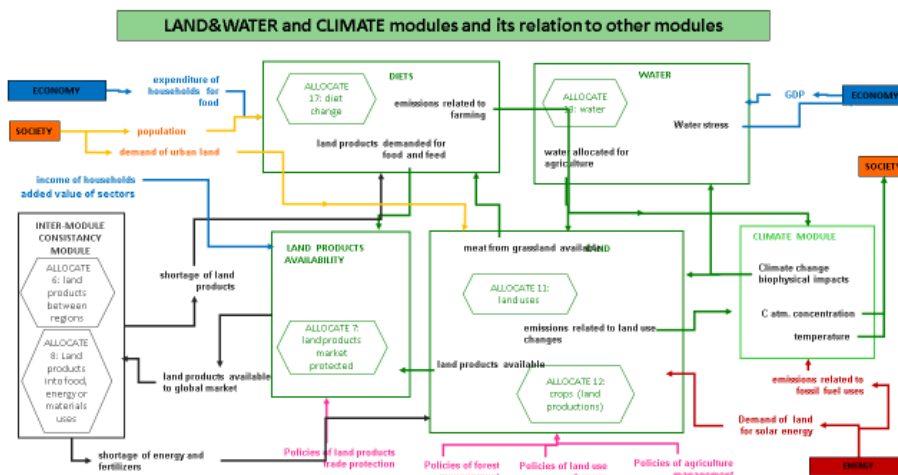


Figura 4.6. Relaciones del módulo de Tierra, Agua y Clima  
(Fuente: WP6 LOCOMOTION)



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES

## Capítulo 4. Introducción al proyecto LOCOMOTION

## 5. METODOLOGÍA

Se presenta a continuación el esquema del sub-módulo de distribución de usos del suelo (*land uses allocation*) de WILLIAM así como las tareas a llevar a cabo para su modelado. Tras esto describe el trabajo llevado a cabo para la compleción de cada una de las tareas.

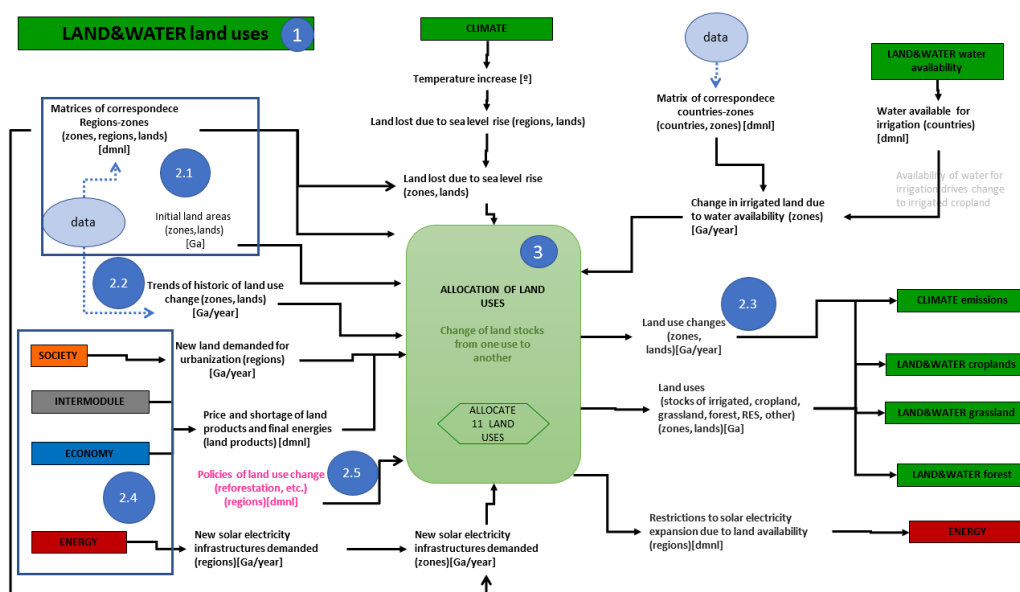


Figura 5.1. Esquema del sub-módulo de distribución de usos del suelo (Fuente: WP6 LOCOMOTION)

### Tarea 1. Profundizar en el conocimiento de los cambios de uso del suelo

- Tarea 1.1. Llevar a cabo una revisión bibliográfica que permita conocer con profundidad el tema.
- Tarea 1.2. Decidir las categorías de uso del suelo definitivas sobre la base del trabajo realizado previamente por el grupo.

### Tarea 2. Obtención de datos

- Tarea 2.1. Cálculo de las superficies iniciales de cada uso de la tierra y generación de las matrices de transición.
- Tarea 2.2. Cálculo de las tendencias históricas de cada uso de la tierra. Esta información es importante para conocer qué usos de la tierra han aumentado y cuales disminuido los últimos años y también será importante, en una fase posterior para comprobar el funcionamiento del modelo.
- Tarea 2.3. Cuantificación del aumento de cada uso del suelo que se hace a costa de otros usos del suelo, es decir, conocer el porcentaje de



la nueva superficie determinado uso del suelo que proviene del resto de usos del suelo.

- Tarea 2.4. Identificar cuáles son los impulsores de la demanda de los usos del suelo que causan los cambios de uso de la tierra y tratar de cuantificar en qué proporción lo hacen.
- Tarea 2.5. Diseñar las políticas y escenarios y seleccionar qué parámetros podrá variar el usuario.

### **Tarea 3. Modelar**

- Tarea 3.1. Diseño del modelo. Durante esta fase el objetivo es en plasmar en Vensim toda la información obtenida.
- Tarea 3.2. Incorporar las variables de elección (variables que puede variar el usuario al modelo).
- Tarea 3.3. Verificar que el funcionamiento es correcto tanto bajo los históricos (2005-2018) como bajo los posibles escenarios (2018-2005).

## **5.1. Introducción a los cambios de uso del suelo**

En esta sección se realiza una introducción teórica extraída de la revisión bibliográfica llevada a cabo y gracias a la cual se ha profundizado en el conocimiento de los usos de la tierra y sus tendencias. También se presentan las categorías finales de uso del suelo que se emplearán en WILIAM así como los motivos más relevantes de su elección.

### **5.1.1. Introducción teórica**

Los cambios de uso del suelo pueden ser producidos por dos tipos de fuerzas, necesidades humanas o procesos medioambientales. Ninguna de las cuales permanece estable en el tiempo, sino que varían de forma constante. Los cambios de uso del suelo se producen en todas las escalas espaciales y temporales y son una clara representación del comportamiento dinámico del medioambiente, la actividad humana y la interacción de estos con la tierra (Briassoulis, 2019).

#### **5.1.1.1. Cambios de uso del suelo producidos por la acción humana**

En la mayoría de los casos, excepto en unas pocas excepciones, son las acciones humanas las que producen los cambios de uso del suelo y las responsables de su magnitud y severidad (Briassoulis, 2019). Se describen a continuación los cambios y efectos más relevantes.

##### **5.1.1.1.1. Bosques: deforestación y forestación**

Los bosques cubren el 30,8% de la superficie terrestre mundial y más del 50% de esta superficie se encuentra en tan solo cinco países (Rusia, Brasil, Canadá,



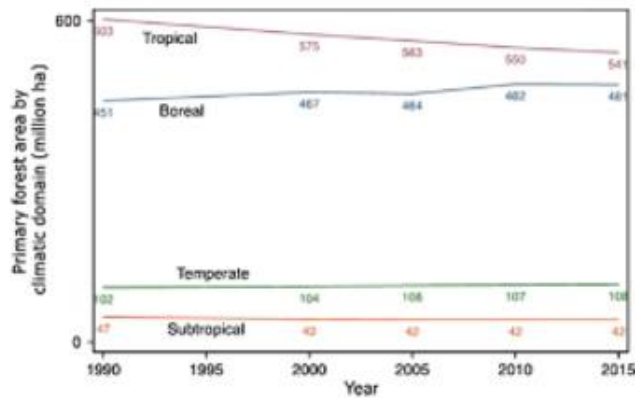


Estados Unidos y China) y dos tercios en diez. La FAO clasifica los bosques en bosques de regeneración natural que representan el 93% de la superficie mundial de bosques y que se desglosan a su vez en bosques primarios y otros bosques de regeneración natural. El 7% restante son bosques plantados que se dividen en plantaciones industriales y otros bosques plantados (forestación) (FAO and UNEP., 2020).

### Bosques primarios

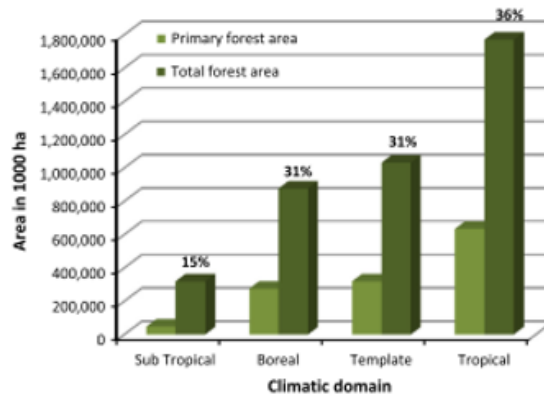
Los bosques primarios se definen como aquellos formados por especies autóctonas en los que no existen indicios claramente visibles de actividades humanas y los procesos ecológicos no han sido significativamente perturbados. El 34% de los bosques del mundo son bosques primarios, sin embargo, actualmente, solo pueden encontrarse grandes extensiones de estos en las regiones tropical y boreal (FAO and UNEP., 2020). El 61% de ellos se encuentra en Brasil, Canadá y Rusia (FAO and UNEP., 2020), el 75% si a los países anteriores se añaden la República Democrática del Congo, Estados Unidos, Perú e Indonesia (Morales-Hidalgo et al., 2015; FAO, 2020).

Entre 1990 y 2015 su superficie disminuyó un 2,5% mundialmente y un 10% en los países tropicales (Morales-Hidalgo et al., 2015), y, aunque en la última década el ritmo de pérdida se ha reducido más de la mitad, especialmente en América (FAO, 2020), los bosques primarios siguen disminuyendo (FAO and UNEP., 2020). Si bien es cierto que algunos países, mayoritariamente en Europa, notifican incrementos en su superficie de bosque primario esto se debe a cambios en los métodos de evaluación de los mismos o ajustes y variaciones en los criterios de definición y no refleja su tendencia real puesto que los bosques primarios, por definición, no pueden crecer (Morales-Hidalgo et al., 2015; FAO, 2020). Su tendencia y el porcentaje que representan respecto de la superficie forestal total en cada zona climática se muestra en Figura 5.2 y Figura 5.3 respectivamente.



**Fig. 5.** Trends in primary forest area by climatic domain (Countries that did not report in all years are excluded from the domain totals in this figure). The consistently reporting countries included in the domain totals accounted for about 88–89% of the global forest area in each year.

**Figura 5.2.** Tendencia de los bosques primarios por zona climática (Fuente: Morales-Hidalgo et al., 2015)



**Fig. 6.** Total and primary forest area and percentage of primary forest by climatic domain reported for all countries in year 2015 to FRA.

**Figura 5.3.** Porcentaje de bosques primarios respecto del total de bosques por zona climática (Fuente: Morales-Hidalgo et al., 2015)

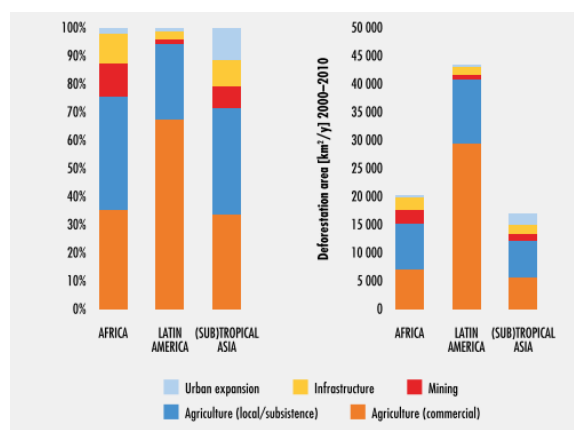
#### 5.1.1.1.1. Deforestación

La superficie forestal mundial ha disminuido del 32,5% en 1990 al 30,8% actual (en 2020). Sin embargo, el ritmo de pérdida se redujo de 7,84 Mha/año entre 1990 y 2010 a 4,74 Mha/año en la siguiente década (FAO and UNEP., 2020). La mayor tasa de pérdida entre 2010-2020 se produjo en África (3,94 Mha/año), seguida de América del Sur (2,60 Mha/año). Sin embargo, mientras que en África la tasa de pérdida ha aumentado con respecto a la de 1990-2010, en Sudamérica se ha reducido más de la mitad. Por zonas climáticas las mayores pérdidas se encuentran en los bosques de la zona tropical húmeda (África central, Amazonas, Indonesia) (FAO and UNEP., 2020).

Dado que según FAO la tala indiscriminada para la obtención de madera no causa necesariamente la pérdida de bosque sino la degradación del mismo,

(FAO, 2016) la pérdida de bosques está principalmente relacionada con la expansión agrícola (FAO, 2016). Solo Brasil e Indonesia suponen más del 44% de la pérdida de bosques debido a la expansión de agricultura y ganadería (Pendriil et al., 2019)

El estudio de Hosonuma et al. (Hosonuma et al., 2012a) sobre el porcentaje de la deforestación que causa cada uno de los siguientes impulsores: (i) agricultura y ganadería comercial (incluyendo plantaciones); (ii) agricultura y ganadería de subsistencia; (iii) minería (a cielo abierto); (iv) construcción de infraestructuras como carreteras o presas; (v) expansión urbana, indica que, mundialmente, la agricultura ha causado más del 80% de la deforestación entre 1980 y 2000. Mientras que el porcentaje que representa agricultura de subsistencia en cada región es relativamente estable, entre el 27-40%, para la agricultura comercial las diferencias son mayores pues es causa del 68% en Latino América y únicamente del 35% en África y Asia solo 35%. Respecto a la degradación, también estudiada por Hosonuma et al. (Hosonuma et al., 2012a), la tala y la extracción de madera son el impulsor del 70% de la misma. Estos porcentajes por regiones se presentan en la Figura 5.4.

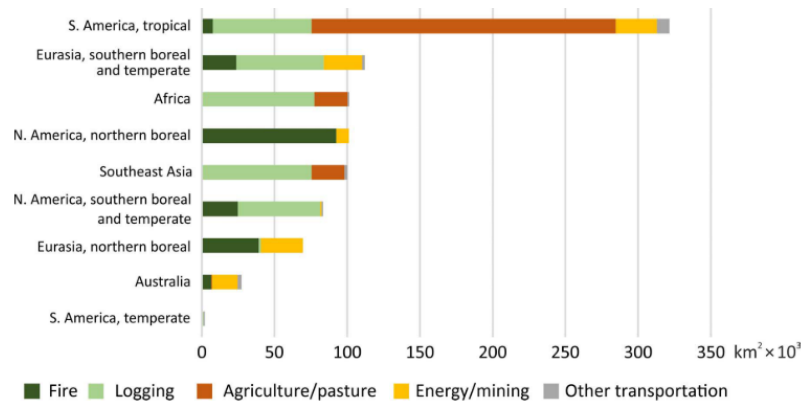


**Figura 5.4.** Porcentaje de la deforestación causada por cada factor  
(Fuente: Hosonuma et al., 2012; FAO, 2016)

Cabe destacar que, fuera de Latino América la superficie de tierras de pastoreo para el ganado se ha mantenido relativamente constante, lo que indica que en el resto del mundo la deforestación se ha debido mayoritariamente únicamente a la agricultura, excluyendo la ganadería (FAO, 2016; Gibbs et al., 2009; Pendriil et al., 2019). Por el contrario, en América del Sur la demanda de tierras para pastoreo se considera la causa del 71% de la deforestación entre 1990-2005 (FAO, 2016).

Respecto a la pérdida de bosques primarios, el 37% se relaciona con la tala para extracción de madera, que en este caso sí causa la deforestación puesto que por definición no puede perturbarse el bosque primario o dejaría de serlo, el 27.7% con la expansión de la agricultura y ganadería y el 21,2% con la expansión de fuegos. El 12.1% se considera causa de la construcción de

infraestructura para la extracción de gas y petróleo o tendidos eléctricos y el 2% con la construcción de carreteras (Potapov et al., 2017a). Estos porcentajes por regiones se presentan en la Figura 5.5.



**Figura 5.5.** Porcentaje de la deforestación de bosque primario causada por cada factor (Fuente: Potapov et al., 2017)

Otros estudios también coinciden con que gran parte de la expansión de la agricultura y ganadería que tiene lugar a partir de bosques es a costa de los bosques primarios, especialmente en las zonas tropicales (Gibbs et al., 2009; Graesser et al., 2015; Morales-Hidalgo et al., 2015).

#### 5.1.1.1.1.2. Forestación

Se ha afirmado que gran parte de la desaceleración de la tasa de pérdida neta de bosques se debe a la rápida expansión de los bosques plantados (Heilmayr, 2014).

Asia registró la mayor ganancia neta de superficie forestal en el periodo 2010-2020, seguida de Oceanía y Europa. Tanto Europa como Asia registraron tuvieron una ganancia neta las dos décadas, 1990-2010 y 2010-2020, ambas muestran una reducción sustancial de la tasa de ganancia la segunda década respecto de la primera. El aumento de la superficie forestal puede producirse a través de la expansión natural de los bosques (por ejemplo, en tierras agrícolas abandonadas), lo cual no es muy habitual (FAO, 2016), a través de la reforestación y forestación o a través del establecimiento de plantaciones.

##### a. Plantaciones

Se definen como un tipo de bosques plantados gestionados de forma intensiva, compuestos principalmente por una o dos especies, autóctonas o exóticas, cuyos árboles son de igual edad, plantados con espaciado regular y son principalmente establecidas principalmente con fines productivos. Aproximadamente un 4% de los bosques mundiales son plantaciones (FAO, 2020). El área de plantaciones ha aumentado 55,8 Mha entre 1990 y 2020.

Las plantaciones representan una amenaza para los bosques gestionados puesto que compiten con ellos por tierra y, además, son más productivas que



ellos. Aunque podría considerarse que este segundo hecho reduce la presión de tala sobre los bosques gestionados, en verdad, reduce el valor de los mismos y reduce por tanto la demanda de madera que proviene de ellos, lo que incentiva su conversión en plantaciones (Ghazoul, 2013; Heilmayr, 2014). Heilmayr demostró que la expansión de las plantaciones ha ido acompañada de una contracción de los bosques gestionados a la vez que ha contribuido a la preservación (reducción de la presión de tala) sobre los bosques no explotados, primarios (Heilmayr, 2014). Según FAO las plantaciones han causado alrededor del 7% de las pérdidas de bosques tropicales (Ghazoul, 2013).

Sin embargo, la literatura coincide en que las plantaciones deberían ubicarse en terrenos ya talados, abandonados o degradados, para ayudar a desviar la presión de los bosques naturales (Ghazoul, 2013). Es por esto que la mayoría de los estudios sobre áreas aptas para su conversión en plantaciones no consideran las superficies forestales como candidatas. Si bien es cierto que Ghazoul indica que, aunque se ha constatado que ha existido la conversión de bosques naturales en plantaciones, en la actualidad esta práctica está depreciada y es menos común (Ghazoul, 2013).

Los estudios sobre los usos de la tierra que han sido históricamente convertidos en plantaciones son escasos. Un estudio sobre este fenómeno en Chile (Nahuelhual et al., 2012), uno de los países con una de las mayores tasas de crecimiento forestal en Sudamérica entre 1995 y 2009, indica que entre 1975 y 1990 el 41,5% de las plantaciones se estableció en terrenos previamente ocupados por bosques, este porcentaje se redujo al 22,8% entre 1990 y 2007. Por su parte, el porcentaje establecido en tierras de matorrales aumentó del 46,9% entre 1975 y 1990 al 69,5% entre 1990 y 2007. En ambos periodos solo una pequeña parte, 11,7% y 7,3% respectivamente fueron situadas en tierras de cultivo y de pastoreo. Tras una revisión bibliográfica, el autor afirma que esta tendencia se repite en países como Indonesia, Australia, España y Nueva Zelanda. El estudio también revela que entre 1975 y 1990 las plantaciones se establecieron en base a factores como la inclinación del terreno, la proximidad a las ciudades o carreteras mientras que entre 1990 y 2007 lo hicieron en todas las direcciones (Nahuelhual et al., 2012), constatando que el aumento de la demanda reduce la importancia de estos factores.

### b. Forestación y reforestación

Se entiende como forestación el plantar árboles en una zona previamente desprovista de cubierta forestal mientras que, reforestación hace referencia a repoblar un área forestal que se ha degradado o ha perdido parte de sus árboles. En este proyecto, cuando se habla de bosques forestados se está haciendo referencia tanto a forestación como a reforestación.



El área de bosques forestados han aumentado 66,8 Mha entre 1990 y 2020 y al igual que sucede con las plantaciones la tasa de aumento se ha reducido entre 2010 y 2020 con respecto a las épocas anteriores. Representan la mayor parte de los bosques plantados en Europa y Norteamérica mientras que son prácticamente inexistentes en Oceanía y Sudamérica, solo un 0,01% en esta última.

Las mayores tasas de este fenómeno se encuentran en China, que tras alcanzar su mínimo histórico de cubierta forestal, 10% de su superficie, en 1949 ha logrado alcanzar el 20% a finales del siglo XX. Otros ejemplos de países que han aumentado su superficie forestal gracias a políticas gubernamentales han sido Costa Rica, la República de Corea y Vietnam.

#### **5.1.1.1.1.3. Otras consideraciones**

##### a. Efecto de los fuegos

Entre 2003 y 2012 se quemaron 67 Mha/año de bosque mientras que en 2015 98 Mha fueron afectadas por fuegos. Estos incendios ocurren mayoritariamente en los trópicos, donde afectan al 4% de los bosques. En concreto, el 66% de la superficie quemada se encuentra en América del sur y África. Solo un 10% de los fuegos no logra contenerse rápidamente, sin embargo son estos los que causan el 90% de las pérdidas por quema. Se espera que el cambio climático aumente la aparición de fuegos y la severidad de los mismos (FAO and UNEP., 2020).

##### b. Bosques protegidos

La creación de áreas protegidas ha sido históricamente un instrumento para tratar de conservar la biodiversidad. Sin embargo, se ha observado que por sí solas no son suficientes para cumplir el objetivo pues suelen ser demasiado pequeñas y siguen siendo vulnerables a factores exógenos como el cambio climático (FAO and UNEP., 2020). Además suelen situarse específicamente en zonas que no son aptas para otros usos (Morales-Hidalgo et al., 2015).

A nivel mundial, el 18% de la superficie forestal mundial se encuentra dentro de áreas protegidas, e 31% en Sudamérica y solo el 5% en Europa (FAO and UNEP., 2020), el 5,6% en Asia Central y el 8,6% en América del Norte (Morales-Hidalgo et al., 2015). Desde 1990 la superficie de bosque en áreas protegidas ha aumentado en 191 Mha, pero el ritmo de aumento ha disminuido durante la última década (FAO and UNEP., 2020). Curiosamente, a pesar de tener las tasas más altas de deforestación, el bosque tropical experimentó los niveles más altos de crecimiento de superficie forestal protegida. Por otra parte, las zonas que se sitúan en las latitudes más altas, bosque boreal, son las que tienen menor superficie forestal protegidas (FAO and UNEP., 2020).



Morales-Hidalgo et al. comprobaron que aunque el aumento de áreas protegidas impulsa el crecimiento forestal, el efecto no es grande (Morales-Hidalgo et al., 2015).

#### c. Desplazamiento de la deforestación

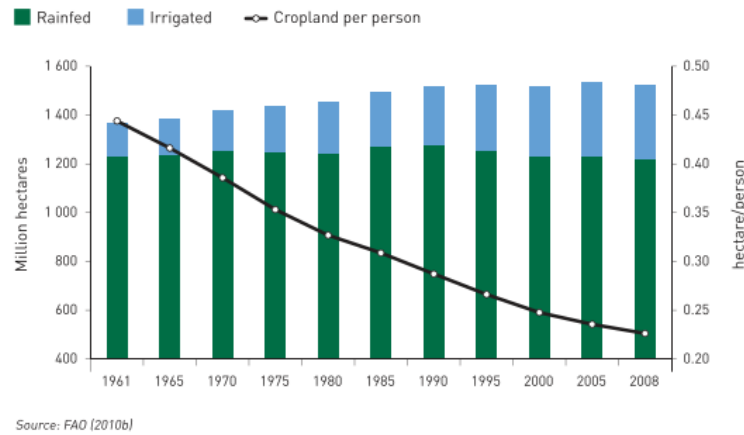
Entre 2005 y 2013 26% de la deforestación causada por expansión agrícola y ganadera fue exportada, es decir, los productos producidos en la tierra por la cual se deforestó lo fueron. Fueron exportados el 40% de cultivos y solo 11% carne, producidos en esas tierras. La tendencia es que la mayor parte de la deforestación exportada, 79%, acabe en países con poca cubierta forestal y que en los últimos años ha mostrado aumento de la misma, principalmente de Europa y Asia-Pacífico. Por lo tanto, al menos el 30% de la reforestación que se lleva a cabo en estos países se vea compensada por las importaciones de deforestación. Esto sugiere que en muchos casos, los proyectos de reforestación han sido posibles gracias a las importaciones de productos. Es decir, han sido posibles gracias a trasladar la deforestación y sus consecuencias otros países (Pendril et al., 2019).

#### d. Bosques no fragmentados

La superficie forestal más intacta se encuentra en los bosques tropicales (Amazonas y Congo) y en los bosques boreales (Canadá y Rusia), las zonas con mayor superficie forestal. Estos ecosistemas se caracterizan por las dificultades de acceso y la baja densidad de población. En la zona boreal la fragmentación está vinculada principalmente a las perturbaciones naturales (FAO and UNEP., 2020), como los incendios, y menos con factores humanos puesto que la tendencia es deforestar zonas planas, de fácil acceso y suelo fértil (FAO, 2016).

#### **5.1.1.1.2. Expansión de las tierras de cultivo**

La superficie de tierras de cultivo ha crecido un 12% en los últimos 50 años. La mayoría de este incremento se debe a la expansión de los cultivos de regadío que han duplicado su superficie, si bien es cierto que existen grandes limitaciones para su futura expansión (United Nations, 2016). La tendencia que han seguido en las últimas décadas de las tierras de regadío y secano, así como la superficie de cultivo por persona, relacionada con la productividad de las tierras puede observarse en la Figura 5.6.



**Figura 5.6.** Evolución de las tierras de cultivo de secano y regadío  
(Fuente: United Nations, 2016)

#### 5.1.1.1.2.1. Agricultura de secano

La agricultura de secano es el sistema de producción agrícola predominante, representa el 80% de la superficie mundial cultivada y genera el 60% de la producción de cultivos mundial. Los sistemas más productivos se concentran en las zonas templadas de Europa y América del Norte y en las zonas tropicales. Por el contrario, los situados en las zonas áridas y de montaña son poco productivos y suelen estar asociados a la agricultura subsistencia (United Nations, 2016).

La superficie de agricultura de secano se ha mantenido relativamente constante e incluso reducido ligeramente en los últimos años, lo cual enmascara el abandono algunas tierras de demasiado degradadas y su posterior sustitución a costa de bosques y praderas (United Nations, 2016).

#### 5.1.1.1.2.2. Agricultura de regadío

La expansión del regadío ha contribuido en gran medida a la mejora de la productividad agrícola dado que el rendimiento de estos sistemas duplica, como mínimo, el de los de secano. En la actualidad, gran parte rinden por debajo de su potencial por lo que gran margen de mejora. Históricamente, la expansión de las tierras de regadío se ha producido a partir de la conversión de tierras de secano. Aunque en las zonas áridas e hiper-áridas (desérticas), que no son aptas para la agricultura de secano, provienen de otros usos de la tierra.

El ritmo de expansión de las tierras de regadío se está desacelerando sustancialmente y es que, únicamente en África subsahariana y América Latina existe aún margen de expansión. La escasez de agua es ya muy graves y en algunas regiones se ha alcanzado o incluso superado el máximo potencial de expansión. Por ejemplo, en Asia se emplean el 50% o más de los recursos





hídricos para el riego y en el norte de África las extracciones de agua para riego superan la capacidad de los recursos naturales.

Aunque se espera que la mayor parte del aumento de producción que se espera en los próximos años sea cubierto por la agricultura de regadío, la agricultura de secano seguirá siendo un importante contribuyente.

#### 5.1.1.1.2.3. Relación con otros usos de la tierra

- Tierras urbanas: El crecimiento de las ciudades e industrias tendrá prioridad en el suministro de agua, reduciendo el agua disponible para la agricultura y causando la pérdida de tierras de cultivo, especialmente en zonas áridas (United Nations, 2016). Además, más del 60% de las tierras de cultivo de regadío del mundo se encuentran cerca de las zonas urbanas y es probable que se pierdan por la expansión de estas (UNCCD, 2017). Las tierras agrícolas perdidas suelen ser de primera calidad, incluso dos veces más productivas que las medias nacionales (UNCCD, 2017).
- Humedales y masas de agua: Las extracciones para riego han causado la pérdida, completa o parcial, reducción de grandes lagos, así como han alterado el flujo de algunos ríos. Además, en Europa y América del Norte, más de la mitad de los humedales han sido desecados para la agricultura, provocando grandes pérdidas de biodiversidad (United Nations, 2016).
- Peligro de desertización: Existen ciertas zonas en las que los sistemas agrícolas se encuentran en riesgo de desertización por mala calidad de las tierras, escasez de agua o mala gestión del agua de riego. En concreto, tanto las tierras de regadío no dedicadas al cultivo de arroz situadas en las zonas áridas, regadas tanto a partir de ríos como de aguas subterráneas como las tierras de secano ubicadas en las zonas tropicales semiáridas y la zona subtropical son susceptibles de sufrir escasez de agua y, por tanto, desertización (United Nations, 2016).

La demanda de tierras de cultivo está mayoritariamente definida por la demanda de alimentos en base a las dietas globales y el rendimiento de los cultivos (Popp et al., 2014), factores que generalmente se ven influenciados por el PIB de cada país y el volumen de población (Havlík et al., 2018). Además, el aumento de la demanda de bioenergía, biocombustibles, ha incrementado la demanda de este tipo de tierras (Popp et al., 2014). y En la actualidad la mayor parte de los biocombustibles son de primera generación, concretamente etanol (Havlík et al., 2011), generados a partir de cultivos ricos en azúcar o de cultivos oleaginosos (Popp et al., 2014), los biocombustibles de segunda generación aunque se están considerando como potenciales soluciones



futuras no representan aún en la actualidad una alternativa viable (Havlík et al., 2011).

Cabe destacar que aunque la demanda de tierras de cultivo se ve evidentemente afectada por las tendencias regionales, el mercado de alimentos es un mercado global, y la escasez de alimentos en una parte del mundo puede generar la expansión de las tierras de cultivo en otra parte del mundo diferente para abastecer esa escasez (Pendrill et al., 2019). Como ya se ha comentado, la expansión de las tierras de cultivo es una de las principales causas de la deforestación.

#### **5.1.1.1.3. Humedales**

Durante el siglo XX más del 50% de los humedales de América del Norte, Europa, Australia y Nueva Zelanda se perdieron, convirtieron o degradaron, principalmente debido al desarrollo agrícola. Otros factores han sido el uso de su agua para el riego y el desarrollo de la acuicultura. La expansión urbana también ha provocado algunas pérdidas aunque en menor medida (Wood & van Halsema, 2008). Sin embargo, aunque la pérdida los humedales costeros está mejor establecida (ej. en la última década el 35% de los manglares han desaparecido debido a la acuicultura) son los interiores los más susceptibles a los efectos de la agricultura. En las zonas semiáridas son un atractivo recurso agrícola pues representan una importante fuente de agua y suelo fértil. Por el contrario, en las zonas templadas, la humedad de su suelo se percibe como un problema lo que aumenta la probabilidad de que sufran un drenaje intensivo (Wood & van Halsema, 2008).

Por otra parte, sus efectos positivos como su capacidad para mitigar inundaciones o purificar el agua contaminada han impulsado que en los últimos años se hayan puesto en marcha proyectos de restauración y construcción de humedales artificiales. Aunque se han obtenido algunos beneficios, se prevé un aumento de la degradación de los humedales y de su conversión en tierras agrícolas, tendencias que se verán exacerbadas por el cambio climático (Wood & van Halsema, 2008).

#### **5.1.1.1.4. Masas de agua**

Durante las últimas 3 décadas más de 162.000 km<sup>2</sup> cubiertos por masas de agua considerados permanentes han probado no serlo. De ellos, 90.000 km<sup>2</sup> se han desecado completamente mientras que 72.000 km<sup>2</sup> se han convertido en temporales. Por otra parte, durante este mismo periodo 29.000 km<sup>2</sup> masas de agua consideradas temporales y 184.000 km<sup>2</sup> de zonas previamente completamente desprovistas de agua se han convertido en masas de agua permanente (Pekel et al., 2016).. Las pérdidas se encuentran más geográficamente concentradas que las ganancias. De hecho, más de 70% de las pérdidas de masas de agua se han producido en solo 5 países, todos ellos



situados en la misma zona (45° N, 60° E). La tasa de desecación alcanzó su máximo entre 1994 y 2009, desde entonces se ha reducido e incluso revertido en algunos casos (Pekel et al., 2016).

La mayor parte de las ganancias de masas de agua son causadas por la construcción presas o embalses (Pekel et al., 2016), mientras que gran parte de las pérdidas se deben al uso de su agua para riego (United Nations, 2016).

#### **5.1.1.1.5. Expansión de la superficie urbana**

Contrariamente a la expansión de las tierras de cultivo la expansión urbana se asocia únicamente a una pequeña parte de las pérdidas forestales, sin embargo, es una de las principales causas de la pérdida de tierras de cultivos. Mundialmente, entre 1992 y 2005, el 64% de las nuevas tierras urbanas se han construido a costa de tierras de cultivo y 9% a partir de bosques (van Vliet, 2019). Puesto que cuando se pierden tierras de cultivo es necesario reemplazarlas para no perder su producción y evitar la escasez de cultivos y dado que estas se expanden principalmente a costa de los bosques, se considera que la expansión urbana causa, indirectamente, la pérdida de bosques. Además, la expansión urbana suele hacerse sobre las tierras de cultivo más productivas causando que la superficie a recuperar sea superior a la perdida. En concreto van Vliet (van Vliet, 2019) señala que, mundialmente, la superficie a recuperar es un 139% mayor que la perdida. Esto es principalmente a que la expansión urbana es común en zonas de tierras de cultivo altamente productivas como China, Canadá y Estados Unidos, mientras que la producción de estas trata de ser recuperada en zonas de mucho menor rendimiento, como África subsahariana y Latino América (van Vliet, 2019).

Seto et al. (Seto et al., 2012) encontraron que, globalmente, 5.87 millones de km<sup>2</sup> tienen una probabilidad positiva de ser convertidos en superficie urbana antes de 2030, mientras que, en el 20% de esta superficie (1.2 millones de km<sup>2</sup>) la probabilidad es alta (entre el 75% y el 100%). Si todas las áreas en las que se encontró probabilidad alta se convirtiesen la superficie urbana aumentaría un 185%. El 50% de este aumento se parveé en Asia, del cual el 55% se concentraría en China e India. El mayor incremento relativo sería en África, su área urbana crecería un 590%. También se afirma que las mayores tasas de expansión se espera que se encuentren en las zonas con menores tasas de urbanización hasta la fecha (Seto et al., 2012).

#### **5.1.1.1.6. Expansión de la tierra destinada a la producción de energía solar**

Aunque en la actualidad la tierra dedicada a la producción de energía solar podría considerarse como despreciable en comparación con otros usos de la tierra se estima que en futuros escenarios en los que la energía solar produzca entre el 25 y el 80% de la electricidad pueda llegar a ocupar hasta un 2,8% de



la superficie total de Europa, 1.4% de la de India y un 5.2% de la de Japón y Corea del Sur.

Para poder situar paneles solares en una tierra, y que no resulte económicamente contraproducente es necesario que se cumplan una serie de requisitos en base a los siguientes factores (Perpiña Castillo et al., 2016):

- Radiación solar: Se consideran como poco adecuadas aquellas en las que es inferior a 900 KWh/m<sup>2</sup>.
- Factores topográficos: Se consideran la elevación, la orientación y las sombras creadas por los gradientes de insolación. Cuando la inclinación es de entre 16 y 30% se considera poco favorable y si es superior a 30% se considera inviable.
- Población: Se estiman más adecuadas las zonas situadas a más de 500 m de las ciudades para evitar la contaminación e impacto visual.
- Red de transporte: Se consideran inviables las zonas que se encuentran a más de 5.000 m de alguna carretera debido a la importancia de un fácil acceso para la construcción, operación y mantenimiento de las plantas.
- Tendido eléctrico: Cuanto más cerca se encuentre de este más favorable, pues menores son los costes de transmisión.

El estudio de (Perpiña Castillo et al., 2016) calculó el porcentaje de adecuación de las distintas zonas de Europa y lo comparó con la situación geográfica de las plantas solares actuales. Encontró que el 75% de ellas situadas en zonas cuyo valor de adecuación está entre el 79,8 y el 100%. La adecuación en Europa aumenta de norte a sur, pues la radiación solar es inversamente proporcional a la latitud (Perpiña Castillo et al., 2016). Es más, en las zonas de alta latitud de Europa, el uso de tierra por unidad de energía solar es dos veces mayor que en Japón y tres veces mayor que en India (van de Ven et al., 2021). Las diferencias también pueden llegar a ser muy grandes dentro de los límites de un mismo país (Perpiña Castillo et al., 2016)

El microclima óptimo para la producción de energía solar se encuentra en tierras de cultivo. Esto junto con otros factores imprescindibles para estas tierras, como la necesidad de terrenos planos y buena accesibilidad (ej. cercanía a carreteras o tendidos eléctricos), que también lo son también para las tierras para solar hacen que las hace muy atractivas para su conversión (Adeh et al., 2019; van de Ven et al., 2021). La expansión de las tierras para solar afecta mayoritariamente a los usos de la tierra comerciales (cultivos, plantaciones, bosques gestionados) y que los efectos sobre las vegetación natural es mayoritariamente indirecto (van de Ven et al., 2021). La literatura coincide en que las expansión debería ser a costa de tierras de cultivo o



pastoreo degradadas o en desiertos o zonas en las cuales otro uso no es posible (Adeh et al., 2019; Perpiña Castillo et al., 2016). Sin embargo en muchos casos se ha encontrado que su establecimiento en desierto se ve dificultado por la poca accesibilidad y los altos costes de transporte (van de Ven et al., 2021).

La producción sobre los tejados presenta la ventaja de no competir por tierra, sin embargo, únicamente un 2-3% de la superficie urbana resulta adecuada (Capellán-Pérez et al., 2017).

### **5.1.1.2. Cambios de usos del suelo producidos por el cambio climático**

Entre el cambio climático y los cambios de uso de la tierra se establece una retroalimentación puesto que de la misma forma en que los cambios del uso del suelo impulsan el cambio climático este puede llegar a impulsar dichos cambios. Consecuencias del cambio climático como el calentamiento global, el aumento de las precipitaciones, el aumento de la intensidad y frecuencia de las tormentas, inundaciones o sequías son procesos que favorecen la degradación de las tierras (Thapa, 2019). Se describen a continuación los principales cambios de uso del suelo impulsados por el cambio climático.

#### **5.1.1.2.1.1. Aumento del nivel del mar**

Mientras que los pantanos y manglares cuentan con mecanismos de crecimiento vertical que les permiten resistir la subida del nivel del mar los ecosistemas terrestres, por el contrario, carecen de esta capacidad (Kirwan & Gedan, 2019). Entre 1984 y 2015 la pérdida de superficie costera debido a la subida del nivel del mar se cuantifica en aproximadamente 28.000 km<sup>2</sup> mientras que el área de tierra ganada fue de 14.000 km<sup>2</sup> (Mentaschi et al., 2018). Los efectos más destacados de la subida del nivel del mar son (Kirwan & Gedan, 2019):

- Creación de bosques fantasma: El crecimiento vertical (elevación) de los bosques ha aumentado en paralelo con el aumento del nivel del mar, mientras que, las tasas de retracción lateral (desaparición de árboles) son de 2 a 14 veces más elevadas que en la era pre-industrial. Cuando comienza la salinización los árboles perecen dando paso al establecimiento de especies vegetales tolerantes a altas tasas de sal, vegetación inter-mareal, rodeadas de troncos y tocones.
- Abandonamiento de tierras de cultivo: Causado por la salinización, puesto que la mayoría de los cultivos no son capaces de tolerar tasas de salinidad superiores a 2 ppt.
- Expansión de los humedales: El crecimiento del nivel del mar favorece este fenómeno puesto que los humedales son capaces de crecer



verticalmente. De hecho, se considera que esta expansión podría llegar a compensar las pérdidas históricas existentes. Cabe destacar que la capacidad de expansión depende también en gran medida de la pendiente de las tierras que rodeen el humedal. Además, existe un límite de aumento antes de que se considere que dichos humedales se han sumergido y en muchas regiones se considera que este límite ya ha sido alcanzado.

La inmersión de la tierra es común en la zona del Atlántico medio de Estados Unidos, pero, sorprendentemente, este fenómeno no ha sido observado fuera de dicha región, en zonas donde sería predecible. Kirwan & Gedan (Kirwan & Gedan, 2019) explican esto señalando que el desarrollo costero puede impedir la conversión del terreno. La zona del Atlántico medio en Estados Unidos es una región costera mayoritariamente rural, desprovista de estructuras de control de inundaciones. Por el contrario, Europa occidental y China cuentan con diques y murallas para protegerse de subidas del nivel del mar (Bjørn et al., 2019).

#### **5.1.1.2.1.2. Deseccación de masas de agua**

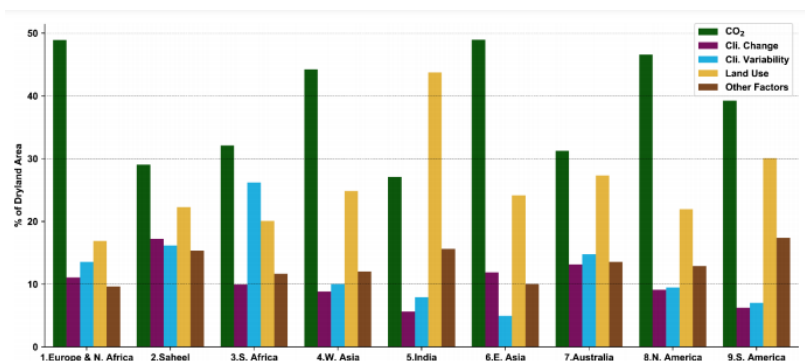
Aunque la mayor parte de los cambios que afectan a las masas de agua son debido a la acción humana y la deseccación suele ser un fenómeno característico únicamente de ciertas regiones, el cambio climático también está implicado, pues las sequías han sido una de las principales causas de deseccación en Australia y Estados Unidos implicado (Pekel et al., 2016). Por otra parte las ganancias ligadas al cambio climático son por la inundación de tierras causada por el deshielo de glaciares producido por el aumento de la temperatura y precipitaciones (Pekel et al., 2016).

#### **5.1.1.2.1.3. Desertización y reverdecimiento**

El índice de aridez global ha aumentado desde mediados del siglo XX mayoritariamente debido al rápido calentamiento causado por aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero desde finales de la década de los 70. Si la tendencia continúa el 50% de la superficie terrestre sufrirá de sequía a finales de este siglo (Odorico et al., 2013). Aunque la literatura coincide en la existencia de un aumento en la desertización en los últimos años no lo hace en el porcentaje de superficie que se ha visto afectada por este fenómeno, los porcentajes varían enormemente (Bestelmeyer et al., 2015). Además, a pesar de esta tendencia, también se ha observado un reverdecimiento en algunas zonas áridas (Odorico et al., 2013).

De acuerdo con el estudio de Burrell entre 1992 y 2015 (Burrell et al., 2015), el 6% de las tierras áridas experimentaron desertización, en el 41% se observó un reverdecimiento significativo y en el 53% restante no pareció producirse ningún cambio significativo. Mayoritariamente, el principal conductor de la desertización son las prácticas de uso del suelo insostenibles, sin embargo,

aunque el efecto del cambio climático y la variabilidad climática es menor, consecuencias como la disminución de las lluvias tienen también un importante efecto dañino. Por otra parte, el principal impulsor del reverdecimiento es el efecto fertilizante del CO<sub>2</sub>, seguido por las prácticas de gestión del uso del suelo. Los principales impulsores del reverdecimiento y de la desertización en cada región se muestran en la Figura 5.7.



Supplementary Figure 9 Primary regional drivers of vegetation change. Largest absolute driver by percentage of regional dryland area assuming a mixed C3/C4 photosynthetic mechanism. This figure is a regional breakdown of the information show in Supplementary Figure 3a.

**Figura 5.7.** Impulsores del reverdecimiento y la desertización por regiones  
(Fuente: Burrell et al., 2015)

Es importante destacar que se considera el cambio de estado a desierto como un cambio muy persistente y difícil de revertir, pues se establecen una serie de retroalimentaciones que hace al nuevo estado muy estable (Odorico et al., 2013; Bjørn et al., 2019).

#### 5.1.1.2.1.4. Cambios entre los bosques y otros usos de la tierra

La temperatura del aire en superficie (SAT), definida como la temperatura dos metros por encima de la vegetación y la precipitación se consideran impulsores de algunos cambios de uso del suelo en las diferentes zonas climáticas (Bjørn et al., 2019). En la Figura 5.8 se muestran alguno de estos cambios junto con los umbrales que los provocan.

	Forest	Savanna	Shrubland	Grassland	Desert	References
Tropical and sub-tropical	←1,500-2000 mm/year					Xu et al. (2016)
	MSI >50%					Staal et al. (2016)
	Global temperature increase >1 °C					Cowling and Shin (2006), Jones et al. (2009)
	←1,100 mm/year					Cox et al. (2004)
	>32 °C					Cox et al. (2004)
			←600 mm/year			Staal et al. (2016)
Temperate	Inconclusive SAT and precipitation thresholds					Millar and Stephenson (2015)
Boreal and tundra	>10 °C mean July temperature					Scheffer et al. (2012)
	<17 °C mean July temperature					Scheffer et al. (2012)
Drylands	Inconclusive SAT and precipitation thresholds					Geist and Lambin (2004), Peters et al. (2004), Turnbull et al. (2012)

Fig. 2. Thresholds separating five alternative land-system states in four biome categories. Each arrow starts at the original state and leads to one or more potential new states. Associated threshold values are indicated for precipitation (blue) and surface air temperature (orange). MSI = Markham's Seasonality Index, a precipitation-related measure (see SM2 for details). Additional details on each identified threshold is given in SM1. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

**Figura 5.8.** Cambios de uso del suelo debido al efecto de las precipitaciones y SAT.  
(Fuente: Bjørn et al., 2019)

- **Biomás tropicales:** En zonas como la Amazonia, África o el sudeste asiático, la reducción de las precipitaciones y el aumento de la SAT son impulsores decisivos de que una superficie que se encuentra en estado de bosque evolucione a estado de sabana o pradera. El umbral de este cambio varía según el estudio, algunos afirman que se produce cuando la precipitaciones son inferiores a 1000mm/año (la mitad de la precipitación media actual) y la SAT aumenta unos 5-6° por encima del nivel de 1990 (Cox et al. 2004), mientras que otros indican que lo hace cuando la temperatura aumenta 3°C por encima de las temperaturas preindustriales (Jones et al., 2009). Por su parte, Hirota et al., 2011 y Xu et al., 2016, observaron que por debajo del rango de 1.500-2.000 mm/año de precipitación el estado de sabana es más común, mientras que por encima lo es el estado de bosque. Otros autores (Staal et al., 2016) tienen en cuenta la estacionalidad (distribución desigual de las precipitaciones a lo largo de un año) y afirman que es más probable encontrar sabana en lugares con alta estacionalidad y que las estaciones secas se asocian a baja cobertura arbórea. Además, la estacionalidad afecta más a las zonas tropicales sudamericanas mientras que en África las precipitaciones absolutas son más determinantes.
- **Biomás boreales y de tundra:** La tundra (un tipo de matorral) y la estepa (un tipo de pastizal) constituyen estados estables alternativos al bosque boreal cuando disminuyen o aumentan las temperaturas, respectivamente. Sin embargo, dado la persistencia de los bosques boreales aumenta con las precipitaciones, se podría decir que la distribución de bosque boreal se encuentra más relacionada con la





combinación de ambos que con cualquiera de ellos por separado (Scheffer et al., 2012).

- Biomasa templada: Aunque se afirma que el aumento de las temperaturas está relacionado con el aumento de los incendios forestales, el estrés por sequía y el brote de plagas, incluso cuando las precipitaciones se mantienen o aumentan no se ha encontrado un umbral concluyente que reafirme esta teoría (Stephenson, 2021).

### 5.1.2. Categorías de uso del suelo

En una primera fase los usos de la tierra considerados para WILIAM y reflejados en el deliverable 6.1.(Pastor, 2020) fueron los siguientes:

- Tierras de cultivo de regadío (*irrigated cropland*).
- Tierras de cultivos de secano (*rainfed cropland*).
- Tierras en barbecho (*temporary fallows*).
- Tierras cubiertas por pastizales y matorrales (*grassland incl. shrubs*).
- Bosques (*forest*).
- Tierras para producción de biocombustibles de segunda generación, incluyendo plantaciones forestales (*land for biofuel 2G incl. short rotation forestry*).
- Tierra para producción de energía solar (*land for solar*).
- Superficie urbana (*urban land*).
- Otros usos de la tierra (*other land*).
- Masas de agua (*water bodies*).

Tras una revisión bibliográfica, estudio de otros modelos e investigación sobre las potenciales bases de datos, las categorías fueron adaptadas a los siguientes usos de la tierra definitivos:

- Tierras de cultivo de regadío (*irrigated cropland*).
- Tierras de cultivos de secano (*rainfed cropland*).
- Bosques gestionados (*managed forest*).
- Bosques primarios (*primary forest*).
- Bosques de plantaciones industriales (*forest plantations*).
- Tierras cubiertas por matorrales (*shrubland*).
- Tierras para pastoreo (*grassland*).
- Humedales y masas de agua (*wetland and waterbodies*).



- Superficie *urbana* (*urban land*).
- Terra para producción de energía solar (*solar land*).
- Otros usos de la tierra: desiertos, roca y hielo (*other land*).

Se detallan a continuación las razones que han llevado a esta división y otras consideraciones. Cabe destacar que algunas de las decisiones han sido tomadas junto a otros sub-módulos en base a los intereses en el modelado de estos.

#### Bosques

Se considera imprescindible la separación de estos tipos de bosques debido a las diferentes características y dinámicas de cada uno de ellos (ej. la productividad y absorción de carbono de las plantaciones es diferentes a la de los bosques naturales (Nahuelhual et al., 2012).

No se consideran bosques protegidos en base a la poca efectividad de los áreas protegidas reportada por la literatura (Morales-Hidalgo et al., 2015; FAO and UNEP., 2020).

No se considera una categoría de bosques forestados, sino que si se produce forestación la superficie se convierte directamente en bosque gestionado.

#### Tierras para la producción de biocombustibles de segunda generación

Prácticamente la totalidad de la producción actual de biocombustibles se produce a partir de biocombustibles de primera generación (Popp et al., 2014) y, aunque se estudian los biocombustibles de segunda generación como una potencial solución futura, no representan, en la actualidad, una solución viable (Havlík et al., 2011), debido su baja TRE y alta dependencia de la gestión de la tierra y los fertilizantes (Blanco-Canqui, 2016). Se descarta como uso de la tierra pero se incluye como uno de los productos que se extrae de la misma.

#### Agrupación de los humedales y masas de agua

Se considera esta agrupación en base a los criterios del IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) que en sus estudios sobre las emisiones de GHG las considera como una única categoría (IPCC, 2014).

#### Separación de las categorías matorrales y pastizales

En la línea de los observado en otros modelo (IIASA, 2014; Kyle, 2011), en la literatura y en las bases de datos se decide separar esta agrupación en dos categorías diferenciadas.

Por otra parte se decide considerar los pastizales como tierras de pastoreo en su totalidad (en línea con el enfoque de GLOBIOM) puesto que apenas hay bases de datos que incluyan las prados naturales y las que sí lo hacen los definen como poco productivos, habitualmente situados en zonas de suelo



seco y desigual que frecuentemente incluyen áreas rocosas (Velthof et al., 2014). Es decir, se da a entender que todo prado que puede ser empleado para pastoreo lo es, siendo escasos los naturales.

#### Tierras de barbecho

Se elimina esta categoría y se incluyen en las tierras de cultivo pues no se considera necesarias al no realizar ningún aporte específico al modelado.

#### Superficies urbanas

Incluyen tanto ciudades como zonas industriales y otras zonas construidas (superficies artificiales).

#### Tierra para producción de energía renovable

En la línea de lo establecido en el deliverable 7.2. (Papagianni, 2020) se considera que la ocupación de la tierra para producción de energía eólica es despreciable y compatible con otros usos de la tierra. Por el contrario, este no es el caso para la producción de energía solar, que aunque en la actualidad no ocupa una gran superficie de tierra que se prevé que lo haga en el futuro próximo (van de Ven et al., 2021). Para esta superficie, aunque existen estudios sobre el posible potencial de la agricultura combinada con la producción de energía solar (*“agrivoltaics”*) (Dinesh & Pearce, 2016) y la colocación de paneles solares sobre lagos y otras masas de agua (*“floatvoltaics”*) (Chester Energy and Policy, 2019), se consideran estas tecnologías como demasiado novedosas y no se incluyen como factibles en el proyecto.

## **5.2. Obtención de datos**

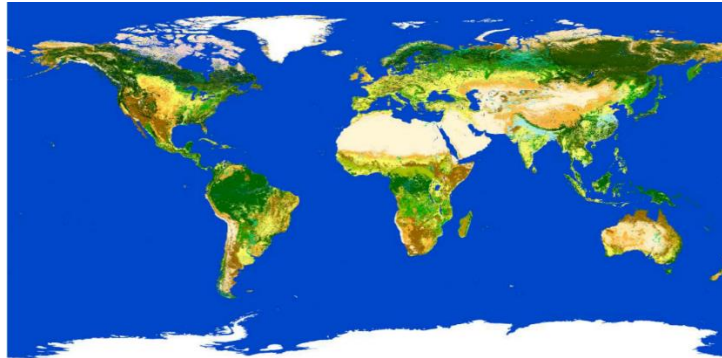
Se presenta a continuación el proceso llevado a cabo para obtener los datos necesarios para conocer qué cambios de uso del suelo son posibles, qué los provoca y para poder programar las ecuaciones. Antes de presentar dicho procedimiento se introducen las bases de datos que se han empleado para el desarrollo de esta tarea. Para cada base de datos se indica qué información se obtiene de ella.

### **5.2.1. Bases de datos**

#### **5.2.1.1. Agencia Espacial Europea (ESA)**

Con el objetivo de comprender mejor el cambio climático la Agencia Espacial Europea (ESA) puso en marcha el programa de Vigilancia Mundial de las Variables Climáticas Esenciales, mejor conocido como Iniciativa por el Cambio Climático (CCI), con el fin de desarrollar un conjunto de productos, basados en satélites, capaces de ofrecer una respuesta exhaustiva y exigente. Dado que la cubierta de la tierra y sus variaciones tienen un gran efecto en la energía, el agua y los flujos de carbono uno de los proyectos desarrollados por este

programa es el de Cubierta del Suelo (LC)<sup>1</sup> cuyo objetivo principal es desarrollar una base de datos global de cobertura terrestre.



**Figura 5.9.** Mapa del mundo dividido por tipos de cubierta terrestre con resolución espacial de 300m en el año 2017 (Fuente: ESA CCI-LC, 2017)

Se trata de un ráster que clasifica píxeles de 300 m en categorías de cubierta terrestre. Se consideran 22 categorías primarias (Tabla 5.1) subdivididas en 12 clases secundarias (Tabla 5.2). Con el objetivo de ser lo más compatible posible con otros recursos la clasificación se basa en el Sistema de Clasificación de la Cubierta Terrestre (LCCS) desarrollado por la Organización para la Agricultura y la Alimentación (FAO) de las Naciones Unidas (UN). El resultado de este trabajo son una serie de mapas anuales, como el que se muestra en la Figura 5.9, en el que a cada unidad espacial (resolución 300 m) se le asigna un tipo de cobertura terrestre.

Value	Label	Color
0	No data	Black
10	Cropland, rainfed	Yellow
20	Cropland, irrigated or post-flooding	Cyan
30	Mosaic cropland (>50%) / natural vegetation (tree, shrub, herbaceous cover) (<50%)	Light Green
40	Mosaic natural vegetation (tree, shrub, herbaceous cover) (>50%) / cropland (<50%)	Olive Green
50	Tree cover, broadleaved, evergreen, closed to open (>15%)	Dark Green
60	Tree cover, broadleaved, deciduous, closed to open (>15%)	Light Green
70	Tree cover, needleleaved, evergreen, closed to open (>15%)	Dark Green
80	Tree cover, needleleaved, deciduous, closed to open (>15%)	Dark Green
90	Tree cover, mixed leaf type (broadleaved and needleleaved)	Olive Green
100	Mosaic tree and shrub (>50%) / herbaceous cover (<50%)	Light Green
110	Mosaic herbaceous cover (>50%) / tree and shrub (<50%)	Olive Green
120	Shrubland	Brown
130	Grassland	Orange
140	Lichens and mosses	Pink
150	Sparse vegetation (tree, shrub, herbaceous cover) (<15%)	Light Green
160	Tree cover, flooded, fresh or brakish water	Teal
170	Tree cover, flooded, saline water	Teal
180	Shrub or herbaceous cover, flooded, fresh/saline/brakish water	Light Green
190	Urban areas	Red
200	Bare areas	Light Green

<sup>1</sup> <https://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/>



210	Water bodies	
220	Permanent snow and ice	

**Tabla 5.1.** Leyenda por colores de las 12 categorías de primarias de cobertura terrestre consideradas por ESA-CCI-LC (Fuente: ESA CCI-LC, 2017)

Value	Label	Color
11	Cropland, rainfed, herbaceous cover	
12	Cropland, rainfed, tree and shrub cover	
61	Tree cover, broadleaved, deciduous, closed (>40%)	
62	Tree cover, broadleaved, deciduous, open (15-40%)	
71	Tree cover, needleleaved, evergreen, closed (>40%)	
72	Tree cover, needleleaved, evergreen, open (15-40%)	
81	Tree cover, needleleaved, deciduous, closed (>40%)	
82	Tree cover, needleleaved, deciduous, open (15-40%)	
121	Evergreen shrubland	
122	Deciduous shrubland	
151	Sparse shrub (<15%)	
152	Sparse herbaceous cover (<15%)	

**Tabla 5.2.** Leyenda por colores de los 12 categorías secundarias de cobertura terrestre consideradas por ESA-CCI-LC (Fuente: ESA CCI-LC, 2017)

Los mapas fueron validados por dieciséis expertos, mediante el uso de más de 3.000 puntos de referencia, que constataron que su precisión global, para sus 22 categorías, es del 73%.

Esta base de datos se emplea para conocer la superficie inicial de cada uso de la tierra.

### 5.2.1.2. Organización para la Agricultura y la Alimentación (FAO)

Es un organismo especializado de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) que desarrolla actividades internacionales con el objetivo de erradicar el hambre. FAO cuenta con una amplia base de datos (FAOSTAT2) que ofrece acceso libre a datos estadísticos sobre alimentación, agricultura y otros sectores relacionados de más de 245 países y territorios desde el año 1961 hasta la actualidad.

FAO distingue entre cobertura del suelo (land cover) y uso del suelo (land use). Define cobertura del suelo como la cubierta biofísica observada en la superficie terrestre. Considerada en el sentido más puro y estricto podría decirse que debe limitarse a describir la vegetación y los elementos artificiales introducidos por los seres humanos. Por otra parte, el uso de la tierra se caracteriza por el tratamiento y las actividades que las personas realizan en un determinado tipo de cubierta terrestre para obtener algún beneficio (ej. producción) de la misma. La definición del uso de la tierra de este modo establece un vínculo directo entre la cobertura terrestre y las acciones de las personas en su entorno.

<sup>2</sup> <http://www.fao.org/faostat/en/#data>



En la Tabla 5.3 se presentan las categorías de cobertura terrestre consideradas por FAO junto a los niveles que incluye cada una y en la Tabla 5.4 los tipos de usos del suelo. Para cada una de ellas proporciona el valor anual de su superficie en cada país entre 1990 y 2018. Cabe destacar que muchas de estas categorías están fuera del alcance o no guardan relación con el enfoque de este proyecto y, por tanto, no serán empleadas. Además, para muchas de las categorías los datos que proporciona FAO son escasos y bastante fraccionados por lo que no resultan muy fiables.

Code	Title
<b>01</b>	<b>Artificial surfaces (including urban and associated areas)</b>
01.a	Artificial surfaces from 10 to 50 %
01.b	Artificial surfaces from 51 to 100 %
<b>02</b>	<b>Herbaceous crops</b>
02.a	Small size fields of herbaceous crops rainfed
02.b	Small size fields of herbaceous crops irrigated or aquatic (rice)
02.c	Medium to large fields of herbaceous crops rainfed
02.d	Medium to large fields of herbaceous crops irrigated or aquatic (rice)
<b>03</b>	<b>Woody crops</b>
03.a	Small size fields of woody crops
03.b	Medium to large fields of woody crops
<b>04</b>	<b>Multiple or layered crops</b>
<b>05</b>	<b>Grassland</b>
05.a	Natural grassland
05.b	Improved grassland
<b>06</b>	<b>Tree covered area</b>
06.a	Tree covered area from 10 to 30-40 %
06.b	Tree covered area from 30-40 to 70 %
06.c	Tree covered area from 70 to 100 %
<b>07</b>	<b>Mangroves</b>
<b>08</b>	<b>Shrub covered area</b>
08.a	Shrub covered area from 10 to 60 % (open)
08.b	Shrub covered area from 60 to 100 % (closed)
<b>09</b>	<b>Shrubs and/or herbaceous vegetation aquatic or regularly flooded</b>
09.a	From 2 to 4 months
09.b	More than 4 months
<b>10</b>	<b>Sparsely natural vegetated areas</b>
<b>11</b>	<b>Terrestrial barren land</b>
11.a	Loose and shifting sand and/or dunes
11.b	Bare soil, gravels and rocks
<b>12</b>	<b>Permanent snow and glaciers</b>
<b>13</b>	<b>Inland water bodies</b>
<b>14</b>	<b>Coastal water bodies and inter-tidal areas</b>
14.a	Coastal water bodies (lagoons and/or estuaries)
14.b	Inter-tidal areas (coastal flats and coral reefs)

Tabla 5.3. Tipos de cubierta terrestre considerados por FAO  
(Fuente: di Gregorio et al., 2011)



Country area
Land area
<b>Agriculture</b>
Agricultural land
Cropland
Arable land
Land under temporary crops
Land under temp. meadows and pastures
Land with temporary fallow
Land under permanent crops
Land under perm. meadows and pastures
Perm. meadows & pastures - Cultivated
Perm. meadows & pastures - Nat. growing
Land under protective cover
<b>Forest land</b>
Naturally regenerating forest
Primary Forest
Planted Forest
<b>Other land</b>
<b>Water</b>
Inland waters
Coastal waters
Exclusive Economic Zone (EEZ)
<b>Irrigation</b>
Land area equipped for irrigation
Land area actually irrigated
Agriculture area actually irrigated
Cropland area actually irrigated
Perm. meadows & pastures area actually irrig.
Forestry area actually irrigated
<b>Agricultural practices</b>
Agriculture area under organic agric.
Agriculture area certified organic
Cropland area under organic agric.
Cropland area certified organic
Perm. meadows & pastures area under organic agric.
Perm. meadows & pastures area certified organic
Cropland area under conventional tillage
Cropland area under conservation tillage
Cropland area under zero or no tillage
Farm buildings & farmyards
<b>Aquaculture and fisheries</b>
Land used for aquaculture
Inland waters used for aquac. or holding facilities
Inland waters used for capture fisheries
Coastal waters used for aquac. or holding facilities
Coastal waters used for capture fisheries
EEZ used for aquac. or holding facilities
EEZ used for capture fisheries

**Tabla 5.4.** Tipos de uso del suelo considerados por FAO  
(Fuente: FAO, 2018)



Existe otra base de datos de FAO llamada AQUASTAT3 que proporciona información sobre los recursos hídricos y la gestión del agua en la agricultura. Proporciona acceso a más de 180 variables e indicadores por país desde 1960 hasta la actualidad. Aunque la mayor parte de las categorías de esta base de datos no interesan a este proyecto sí lo hacen aquellos que corresponden a la variable “superficie de cultivo equipada para riego”.

Los datos que proporciona FAOSTAT sobre cobertura terrestre pueden ser de dos fuentes, MODIS o CCI-LC. En este proyecto se emplean los de CCI-LC.

De esta base de datos se obtienen los datos sobre la evolución histórica de cada uno de los usos de la tierra.

### **5.2.1.3. Base de datos del Banco Mundial (*World Bank Data*)**

Esta base de datos creada por el Grupo de Desarrollo de Datos<sup>4</sup> del Banco Mundial proporciona series de datos de variables de diferentes ámbitos, entre ellos el financiero, para todos los países desde 1960 hasta la actualidad. Gran parte de sus datos proceden de los sistemas estadísticos de los países miembros.

Esta base se emplea para conocer la población de cada país.

### **5.2.1.4. Agencia Internacional de la Energía (IEA)**

Esta organización internacional intergubernamental creada en 1974 nació con el objetivo de mantener la estabilidad del suministro internacional de petróleo, aunque, en los últimos años, su misión se ha ampliado hacia la promoción de las fuentes de energía renovables. Su base de datos proporciona datos sobre todo tipo de variables referentes a la energía por país. Las series temporales dependen del país y la tecnología energética.

De esta base de datos se obtienen los datos sobre la producción de energía solar y producción de electricidad.

## **5.2.2. Procedimiento**

En esta sección se detalla el proceso llevado a cabo para la obtención de los datos que serán empleados en el modelo.

### **5.2.2.1. Superficies iniciales y matrices de transición**

Conocer la superficie inicial, en 2005, de cada uso de la tierra por zona y por región es importante no solo para inicializar los stocks del modelo, sino también para poder generar las matrices que permiten la transformación entre zonas Köppen y regiones LOCOMOTION para cada uso de la tierra.

---

<sup>3</sup> <http://www.fao.org/aquastat/statistics/query/index.html>

<sup>4</sup> <https://data.worldbank.org/>





### 5.2.2.1.1. Superficies iniciales

Para obtener la superficie inicial de cada uso de la tierra en 2005 se emplean los mapas de la ESA CCI-LC (ESA, n.d.), de los cuales puede obtenerse información en forma de Sistema de Información Geográfica (GIS) sobre cada categoría de cobertura terrestre en una malla de píxeles de 300 m de resolución espacial. Estos datos fueron procesados por CARTIF, uno de los socios del proyecto LOCOMOTION, de tal manera que para cada país se conoce la superficie de cada uso de la tierra en cada zona Köppen y en cada AEZ en 2005. Aparecen zonas Köppen y zonas AEZ dado que en el momento del procesamiento aún no se había tomado una decisión firme y ambas eran consideradas como candidatas para la agregación climática. Para adecuar los datos al enfoque de LOCOMOTION, las categorías de cobertura terrestre de los datos de ESA CCI-LC fueron agrupadas en usos del suelo según se muestra en la Tabla 5.5. Un ejemplo de los datos proporcionados por CARTIF se muestra en la Tabla 5.6 para Letonia.

Value	Label (CCI-LC)	Usos del suelo en el procesado
0	No data	-
10	Cropland, rainfed	1 (Cropland, rainfed)
11	Cropland, rainfed, herbaceous cover	
12	Cropland, rainfed, tree and shrub cover	
20	Cropland, irrigated or post-flooding	2 (Cropland irrigated or post-flooding)
30	Mosaic cropland (>50%) / natural vegetation (tree, shrub, herbaceous cover) (<50%)	5 (Shrub and other vegetated land)
40	Mosaic natural vegetation (tree, shrub, herbaceous cover) (>50%) / cropland (<50%)	5 (Shrub and other vegetated land)
50	Tree cover, broadleaved, evergreen, closed to open (>15%)	3 (Forest (primary + managed + plantation))
60	Tree cover, broadleaved, deciduous, closed to open (>15%)	
61	Tree cover, broadleaved, deciduous, closed (>40%)	
62	Tree cover, broadleaved, deciduous, open (15-40%)	
70	Tree cover, needleleaved, evergreen, closed to open (>15%)	
71	Tree cover, needleleaved, evergreen, closed (>40%)	
72	Tree cover, needleleaved, evergreen, open (15-40%)	
80	Tree cover, needleleaved, deciduous, closed to open (>15%)	
81	Tree cover, needleleaved, deciduous, closed (>40%)	
82	Tree cover, needleleaved, deciduous, open (15-40%)	
90	Tree cover, mixed leaf type (broadleaved and needleleaved)	
100	Mosaic tree and shrub (>50%) / herbaceous cover (<50%)	5 (Shrub and other vegetated land)
110	Mosaic herbaceous cover (>50%) / tree and shrub (<50%)	
120	Shrubland	
121	Evergreen shrubland	
122	Deciduous shrubland	4 (Grassland)
130	Grassland	
140	Lichens and mosses	5 (Shrub and other vegetated land)
150	Sparse vegetation (tree, shrub, herbaceous cover) (<15%)	6 (Sparse vegetation and bare areas)
151	Sparse shrub (<15%)	



152	Sparse herbaceous cover (<15%)	7 (Flooded vegetation)
160	Tree cover, flooded, fresh or brakish water	
170	Tree cover, flooded, saline water	
180	Shrub or herbaceous cover, flooded, fresh/saline/brakish water	
190	Urban areas	9 (Urban areas)
200	Bare areas	6 (Sparse vegetation and bare areas)
210	Water bodies	8 (Waterbodies, Snow and ice)
220	Permanent snow and ice	

**Tabla 5.5.** Agrupación de las categorías de cobertura terrestre de ESA CCI-LC en usos de la tierra más adecuados a WILIAM (Fuente: WP6 LOCOMOTION)

Uso suelo	AEZ	Köppen	AREA (m <sup>2</sup> )	PERCENTAGE
1	9	Winter snow	365066273	2,797816236
1	10	Temperate	884487780	6,778589139
1	10	Winter snow	1,1775E+10	90,24435172
3	9	Winter snow	1298868655	3,820448137
3	10	Temperate	3959872423	11,64743422
3	10	Winter snow	2,8485E+10	83,78553425
4	9	Winter snow	80429447,1	1,739185938
4	10	Temperate	324200155	7,010421831
4	10	Winter snow	4211424673	91,06677764
5	9	Winter snow	263946190	2,627436352
5	10	Temperate	767561792	7,640647347
5	10	Winter snow	8989831897	89,48873688
6	9	Winter snow	559,773764	0,023179444
6	10	Temperate	346750,744	14,35846021
6	10	Winter snow	1768590,01	73,23482288
7	9	Winter snow	64036181,7	5,055131787
7	10	Temperate	138122755	10,90365965
7	10	Winter snow	1055956211	83,35908958
8	9	Winter snow	8261133	0,658706797
8	10	Temperate	103213735	8,229814124
8	10	Winter snow	1099718828	87,68679398
9	9	Winter snow	1070411,23	0,331394661
9	10	Temperate	12662771,5	3,920338966
9	10	Winter snow	294165338	91,07230896

**Tabla 5.6.** Datos procesados para Letonia (Uso del suelo/AEZ/Köppen)  
(Fuente: WP6 LOCOMOTION)

Estos datos fueron procesados a partir de un código de MATLAB, compuesto principalmente de bucles *for* y condicionales *if else*, que permite leer y escribir en Excel con el objetivo de conocer la siguiente información:

- Dentro de cada región LOCOMOTION, la superficie de cada uso de la tierra que se encuentran dentro de cada zona Köppen (Tabla 5.7).
- La superficie total de cada uso de la tierra dentro de cada zona Köppen y la superficie total de cada uso de la tierra dentro de cada región LOCOMOTION.

- Para cada uso de la tierra, la superficie en cada región LOCOMOTION que se encuentra dentro de cada zona Köppen (Tabla 5.8).

land uses   Köppen zone→	EU27 (m <sup>2</sup> of each land use in each Köppen zone)									
	Cold arid	Hot arid	Polar	Snow	winter snow	Temperate	Tropical	Warm		
rained cropland	34.273.332.401	159.161.575	323.994.548	22.236.685.593	101.149.378.714	844.495.522.213	0	380.942.587.322		
irrigated cropland	6.244.088.624	48.798.980	0	1.891.963	47.574.817	2.837.352.595	0	33.521.856.320		
forest(primary+managed+plantations)	2.147.912.129	0	9.622.293.167	430.555.785.708	217.563.323.435	542.746.325.798	0	154.283.581.594		
grassland	3.586.181.033	5.618.967	3.932.210.160	11.160.140.918	26.434.225.220	245.881.106.929	0	38.523.282.699		
shrubland	15.233.978.651	47.936.555	7.012.160.504	54.006.139.308	53.690.403.404	243.098.539.522	0	235.148.835.840		
sparse vegetation and bare areas	6.321.715.944	195.514.562	12.846.084.719	16.511.172.508	1.223.661.034	7.457.939.465	0	12.773.877.932		
flooded vegetation	1.119.659.958	2.882.817	963.433.082	56.637.803.122	4.418.556.200	14.974.646.445	0	1.920.797.559		
waterbodies, snow and ice	601.695.661	28.223.046	2.244.674.957	50.543.197.018	19.109.903.033	25.552.198.904	0	10.814.737.132		
urbanland	1.071.116.861	43.102.454	78.954.422	877.121.509	6.918.604.750	73.343.434.462	0	16.561.458.621		

Tabla 5.7. Superficie de cada uso de la tierra de EU27 en cada zona Köppen (Fuente: Creación propia)



Köppen zone   LOCOMOTION region →	Rainfed Cropland (m <sup>2</sup> in each zone in each region)										
	EU27	UK	EASOC	CHINA	INDIA	LATAM	RUSSIA	USMCA	ROW		
Cold arid	34.273.332.401	0	159.879.284.336	135.628.590.565	280.718.941	16.453.714.088	14.377.964.225	322.122.417.282	240.345.305.991		
Hot arid	159.161.575	0	68.432.648.210	0	447.630.923.280	89.659.350.222	0	85.408.995.947	1.435.932.599.229		
Polar	323.994.548	0	790.049	19.493.504.509	216.568.749	4.673.942.585	1.169.081.304	72.360.947	2.018.060.727		
Snow	22.238.685.593	0	2.920.227.179	14.340.295.699	820.291.905	0	77.464.632.785	43.060.494.584	20.393.252.155		
Winter snow	101.149.378.714	0	66.437.810.877	462.301.105.559	582.730.897	0	1.199.021.877.918	1.183.776.498.352	847.333.734.755		
Temperate	844.495.522.213	63.160.536.241	35.643.006.555	1.033.496.285	3.231.000.037	63.099.869.391	11.472.444.107	13.493.451.515	225.389.507.394		
Tropical	0	0	625.047.230.847	384.632.754.254	667.658.141.365	985.174.747.874	0	141.276.783.866	2.208.504.232.774		
Warm	380.942.587.322	0	224.841.548.773	177.778.066.988	61.363.682.762	519.988.904.573	103.172.908.449	467.954.171.527	611.998.908.038		

**Tabla 5.8.** Superficie de tierras de cultivo de secano en cada zona dentro de cada región  
(Fuente: Creación propia)

Para que estos datos resulten verdaderamente útiles deben adecuarse a los tipos de uso del suelo finales de WILLIAM. Además, también es importante

ordenarlos de acuerdo a una estructura fija para evitar futuras confusiones en la etapa de modelado.

Ajuste de los tipos de bosque

En las categorías usadas en el procesamiento existe una única categoría de bosque, por lo que debe incluirse la distinción entre bosque primario, gestionado y plantaciones de WILIAM. La evolución anual de estos bosques se ha obtenido de la forma en que se detalla en la sección 5.2.2.2 por lo que se conoce la superficie de cada tipo de bosque en cada región en 2005. Además FAOSTAT proporciona la superficie forestal total de cada país, que puede agruparse por regiones. Con estos datos puede calcularse el porcentaje que representa cada tipo de bosque respecto de la superficie forestal total en cada región en 2005 (Tabla 5.9).

% OF EACH WILIAM FOREST IN 2005			
2005			
LANDS_I→	FOREST_MANAGED	FOREST_PRIMARY	FOREST_PLANTATIONS
REGIONS_I↓	[%]	[%]	[%]
EU27	94,67%	2,42%	2,91%
UK	100,00%	0,00%	0,00%
CHINA	71,84%	6,03%	22,13%
EASOC	71,67%	22,96%	5,37%
INDIA	66,10%	23,19%	10,71%
LATAM	57,88%	40,68%	1,43%
RUSSIA	68,41%	31,59%	0,00%
USMCA	54,61%	43,89%	1,50%
LROW	67,27%	31,35%	1,38%

**Tabla 5.9.** Porcentaje de cada tipo de bosque WILIAM en cada región, 2005  
(Fuente: Creación propia)

Multiplicando estos porcentajes por la superficie total de bosque obtenida con los datos de la ESA CCI-LC (categoría 3) se obtiene la superficie inicial de cada tipo de bosque en cada región (Tabla 5.10).

Ga of each forest type in each LOCOMOTION region									
REGIONS_I→	EU27	UK	CHINA	EASOC	INDIA	LATAM	RUSSIA	USMCA	LROW
LANDS_I↓	[Ga]	[Ga]	[Ga]	[Ga]	[Ga]	[Ga]	[Ga]	[Ga]	[Ga]
FOREST_MANAGED	1.284,55	13,66	1.152,15	1.842,97	304,07	3.491,45	6.189,24	4.046,91	7.044,20
FOREST_PRIMARY	32,90	0,00	96,64	590,40	106,66	2.454,03	2.857,59	3.252,87	3.282,37
FOREST_PLANTATIONS	39,47	0,00	354,95	137,99	49,25	86,31	0,00	111,45	144,62

**Tabla 5.10.** Superficie de cada tipo de bosque WILIAM en cada región, 2005  
(Fuente: Creación propia)

Se asume como hipótesis que la cantidad de cada tipo de bosque dentro de cada zona Köppen en cada región, será igual que para los bosques totales. Es decir, en cada región se calcula el porcentaje de bosque que se encuentra en cada zona Köppen y ese será el porcentaje de cada tipo de bosque dentro cada zona Köppen en esa región. Con este puede calcularse la superficie de cada tipo de bosque dentro de cada zona Köppen en cada región y, a partir de la suma de todas las zonas Köppen de todas las regiones se calcula la superficie inicial de cada tipo de bosque en cada zona Köppen (Tabla 5.11).



Ga of each forest type in each Koppen zone								
ZONES_I →	TROPICAL	WARM	ARID_HOT	ARID_COLD	TEMPERATE	WINTER_SNOW	SNOW	POLAR
LANDS_I ↓	[Ga]	[Ga]	[Ga]	[Ga]	[Ga]	[Ga]	[Ga]	[Ga]
FOREST_MANAGED	11.143,65	1.727,38	562,73	202,32	1.181,89	2.668,55	7.527,27	355,40
FOREST_PRIMARY	5.649,67	864,27	285,86	116,99	364,02	1.324,20	3.883,78	184,67
FOREST_PLANTATIONS	454,96	147,36	16,95	10,92	42,76	123,62	117,46	10,00

**Tabla 5.11.** Superficie de cada tipo de bosque WILLIAM en cada zona Köppen, 2005  
(Fuente: Creación propia)

### Ajuste de las masas de agua y otros usos de la tierra

En los usos de la tierra considerados en el procesamiento de los datos aparecen las siguientes categorías: (i) humedales; (ii) masas de agua/hielo/nieve; (iii) áreas de escasa vegetación o roca. Mientras que, en WILLIAM se consideran las siguientes: (i) masas de agua y humedales; (ii) desierto, roca y hielo. Por tanto, es necesario dividir la categoría masas de agua, nieve y hielo en masas de agua por una parte y nieve y hielo por otra para hacer la agrupación de acuerdo a los criterios de WILLIAM. Para esto se emplean los datos de cobertura de la tierra de FAOSTAT que distingue entre dos categorías:

- Glaciares y zonas de nieve permanentes (*permanent snow and glaciers*): cuya persistencia debe ser de 12 meses al año.
- Masas de agua interiores<sup>5</sup> (*inland waterbodies*): cuya persistencia debe ser de 12 meses al año.

Los datos de la superficie de estas categorías en 2005 para cada país se agrupan por regiones LOCOMOTION y se suman para calcular el porcentaje que representa cada una de ellas respecto de la suma total, estos porcentaje se muestran en la Tabla 5.12.

% in 2005 by LOCOMOTION region		
Land Cover	ice and snow	waterbodies
REGIONS_I	[%]	[%]
EU27	1,06%	98,94%
UK	0,00%	100,00%
CHINA	33,46%	66,54%
EASOC	0,98%	99,02%
INDIA	13,86%	86,14%
LATAM	13,98%	86,02%
RUSSIA	8,03%	91,97%
USMCA	16,68%	83,32%
LROW	64,59%	35,41%

**Tabla 5.12.** Porcentaje de masas de agua, nieve y hielo en cada región LOCOMOTION, 2005  
(Fuente: Creación propia; FAOSTAT)

Estos porcentajes se multiplican por el valor de la categoría 8 (masas de agua, nieve y hielo) del procesamiento de datos. La superficie de masas de agua se suma a la categoría 7 (humedales), mientras que, la superficie de nieve y hielo se suma a la categoría 6 (desierto y roca). Los resultados finales se muestran

<sup>5</sup> Se ha descartado el uso de masas de agua costeras (*coastal waterbodies and intertidal areas*) debido a la escasos datos proporcionados por FAO para esta categoría.

en la Tabla 5.13 para las regiones LOCOMOTION. Se asume en las zonas Köppen de una región el porcentaje será el de la región. Se presenta la superficie inicial de estas categorías en la Tabla 5.14.

Ga of WETLAND and OTHER_LAND in each LOCOMOTION region									
REGIONS_I →	EU27	UK	CHINA	EASOC	INDIA	LATAM	RUSSIA	USMCA	LROW
LANDS_I ↓	[Ga]	[Ga]	[Ga]	[Ga]	[Ga]	[Ga]	[Ga]	[Ga]	[Ga]
WETLAND	187,78	15,23	154,29	364,59	91,12	643,68	1.360,44	1.681,53	1.579,10
OTHER_LAND	58,48	5,32	1.967,94	3.194,81	81,53	1.049,11	1.511,59	2.043,28	21.408,75

**Tabla 5.13.** Superficie de humedales y otros usos de la tierra en cada región LOCOMOTION, 2005 (Fuente: Creación propia)

Ga of WETLAND and OTHER_LAND in each Köppen zone								
ZONES_I →	TROPICAL	WARM	ARID_HOT	ARID_COLD	TEMPERATE	WINTER_SNOW	SNOW	POLAR
LANDS_I ↓	[Ga]	[Ga]	[Ga]	[Ga]	[Ga]	[Ga]	[Ga]	[Ga]
WETLAND	1.404,67	372,74	275,00	109,89	114,74	476,25	2.100,82	1.223,65
OTHER_LAND	346,29	433,89	18.669,00	5.719,29	115,59	326,01	1.882,97	3.827,79

**Tabla 5.14.** Superficie de humedales y otros usos de la tierra en cada zona Köppen, 2005 (Fuente: Creación propia)

### Tierra para solar

El cálculo de la superficie de tierra destinada a la producción de energía solar cada año en cada región LOCOMOTION se encuentra detallado en la sección 5.2.2.2.7. Esta superficie en 2005 se presenta en la Tabla 5.15.

Ga of solar land by LOCOMOTION region									
REGIONS_I	EU27	UK	CHINA	EASOC	INDIA	LATAM	RUSSIA	USMCA	LROW
LANDS_I	[Ga]	[Ga]	[Ga]	[Ga]	[Ga]	[Ga]	[Ga]	[Ga]	[Ga]
SOLAR	0,0378	0,0067	0,0019	0,0207	0,0002	0,0016	0,0000	0,0223	0,0043

**Tabla 5.15.** Superficie de tierra para solar en cada región LOCOMOTION, 2005 (Fuente: Creación propia)

Esta superficie no se calcula por zonas Köppen debido a la imposibilidad de encontrar datos que permitan este cálculo.

La superficie inicial para cada uso de la tierra en cada zona Köppen y en cada región LOCOMOTION puede encontrarse en la Tabla A2.1 y Tabla A2.2 respectivamente.

### 5.2.2.1.2. Matrices de transición

No existe matriz de transición para las tierras dedicadas a la producción de solar debido a la falta de datos para calcularlas. Para el resto de usos de la tierra se calculan como se indica a continuación.

### RtoZ

Las matrices RtoZ permiten transformar la superficie de cada uso de la tierra de las regiones LOCOMOTION a las zonas Köppen. Representan el porcentaje de la superficie total de un uso de la tierra de una región se encuentra en cada zona Köppen. Cada elemento de la matriz se calcula con la Ecuación 5.1. Se presenta a modo de ejemplo la matriz de transición para las tierras de secano



(Tabla 5.16), para el resto de usos del suelo pueden encontrarse en las Tabla A2.13 a Tabla A2.22.

$$\text{Ecuación 5.1} \quad RtoZ\_of\_U_k[i, j] = \frac{area\_of\_U_k[R_i, Z_j]}{area\_of\_U_k[R_i]}$$

De aquí en adelante, a no ser que se indique lo contrario  $U_k$  representa cada uno de los 11 usos del suelo,  $R_i$  cada una de las 9 regiones LOCOMOTION y  $Z_j$  cada una de las 8 zonas Köppen.

RtoZ RAINFED								
REGIONS_I   ZONES_J	TROPICAL	WARM	ARID_HOT	ARID_COLD	TEMPERATE	WINTER_SNOW	SNOW	POLAR
EU27	0,000	0,275	0,000	0,025	0,610	0,073	0,016	0,000
UK	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000	0,000
CHINA	0,322	0,149	0,000	0,113	0,001	0,387	0,012	0,016
EASOC	0,528	0,190	0,058	0,135	0,030	0,056	0,002	0,000
INDIA	0,565	0,052	0,379	0,000	0,003	0,000	0,001	0,000
LATAM	0,587	0,310	0,053	0,010	0,038	0,000	0,000	0,003
RUSSIA	0,000	0,077	0,000	0,011	0,009	0,846	0,058	0,001
USMCA	0,063	0,207	0,038	0,143	0,006	0,524	0,019	0,000
LOW	0,395	0,109	0,257	0,043	0,040	0,152	0,004	0,000

**Tabla 5.16.** Matriz RtoZ para las tierras de cultivo de secano  
(Fuente: Creación propia; WP6 LOCOMOTION)

El área en cada zona Köppen a partir del área en cada región se calcula a partir de la Ecuación 5.2 y Ecuación 5.3.

$$\text{Ecuación 5.2} \quad area\_of\_U_k[R_i, Z_j] = area\_of\_U_k[R_i] \cdot RtoZ\_for\_U_k[R_i, Z_j]$$

$$\text{Ecuación 5.3} \quad area\_of\_U_k[Z_j] = \sum_{i=1}^9 area\_of\_U_k[R_i, Z_j]$$

### ZtoR

Las matrices ZtoR permiten realizar la transformación de la superficie de cada uso de la tierra de las zonas Köppen a las regiones LOCOMOTION. En este caso representan qué porcentaje de la superficie total de un uso de la tierra de una zona Köppen se reparte entre las regiones LOCOMOTION. Cada elemento de la matriz se calcula con la Ecuación 5.4. Se presenta a modo de ejemplo la matriz ZtoR para las tierras de cultivo de secano (Tabla 5.17), el resto pueden encontrarse en la Tabla A2.3 a Tabla A2.12.

$$\text{Ecuación 5.4} \quad ZtoR\_of\_U_k[j, i] = \frac{area\_of\_U_k[R_i, Z_j]}{area\_of\_U_k[Z_j]}$$

ZtoR RAINFED									
ZONES_I   REGIONS_J	EU27	UK	CHINA	EASOC	INDIA	LATAM	RUSSIA	USMCA	LOW
TROPICAL	0,0000	0,0000	0,0767	0,1247	0,1332	0,1965	0,0000	0,0282	0,4406
WARM	0,1495	0,0000	0,0698	0,0882	0,0241	0,2041	0,0405	0,1837	0,2402
ARID_HOT	0,0001	0,0000	0,0000	0,0322	0,2104	0,0421	0,0000	0,0402	0,6750
ARID_COLD	0,0371	0,0000	0,1469	0,1731	0,0003	0,0178	0,0156	0,3489	0,2603
TEMPERATE	0,6697	0,0501	0,0008	0,0283	0,0026	0,0500	0,0091	0,0107	0,1787
WINTER_SNOW	0,0266	0,0000	0,1216	0,0175	0,0002	0,0000	0,2996	0,3114	0,2231
SNOW	0,1227	0,0000	0,0791	0,0161	0,0045	0,0000	0,4274	0,2377	0,1125
POLAR	0,0116	0,0000	0,6970	0,0000	0,0077	0,1671	0,0418	0,0026	0,0722

**Tabla 5.17.** Matriz ZtoR para las tierras de cultivo de secano  
(Fuente: Creación propia; WP6 LOCOMOTION)

El área de cada uso de la tierra en cada región se calcula a partir de la Ecuación 5.5 y Ecuación 5.6.

$$\text{Ecuación 5.5} \quad area\_of\_U_k[Z_j, R_i] = area\_of\_U_k[Z_j] \cdot ZtoR\_for\_U_k[Z_j, R_i]$$



**Ecuación 5.6** 
$$area\_of\_U_k[R_i] = \sum_{j=1}^8 area\_of\_U_k[Z_j, R_i]$$

### 5.2.2.2. Evolución histórica de cada uso de la tierra

A excepción de para la tierra para solar, los datos de la evolución histórica de los stocks se obtienen de FAO. Estos se encuentran por país, para calcular la superficie anual de cada uso de la tierra por región se suma la superficie de dicho uso en los n países que agrupa la región (Ecuación 5.7).

**Ecuación 5.7** 
$$area\_of\_U_k[R_i] = \sum_{j=1}^n area\_of\_U_k[country_j]$$

Para evitar introducir los menores errores posibles para LROW se han considerado los mismos países que en el procesamiento de datos de ESA CCI-LC excluyendo aquellos para los cuales en dicho procesamiento no fue posible obtener datos (estos países se encuentran en el anexo 1). Para transformar estos datos a las zonas Köppen emplea la matriz RtoZ de cada uso de la tierra, gracias a la cual se calcula, en cada región, la superficie del uso de la tierra que se encuentra en cada zona Köppen (Ecuación 5.8). Para calcular la superficie total del uso de la tierra en cada zona Köppen se suma la superficie del uso de la tierra que se encuentra en esa zona Köppen en cada una de las 9 regiones (Ecuación 5.9).

**Ecuación 5.8** 
$$area\_of\_U_k[R_i, Z_j] = RtoZ\_of\_U_k[R_i, Z_j] \cdot area\_of\_U_k[R_i]$$

**Ecuación 5.9** 
$$area\_of\_U_k[Z_j] = \sum_{i=1}^9 area\_of\_U_k[R_i, Z_j]$$

En los apartados siguientes se indica con qué categoría de FAO se identifica cada uso de la tierra, para cada uno de ellos este es el procedimiento que se emplea para conocer su tendencia histórica por regiones y por zonas.

No se calcula la evolución histórica de la categoría de humedales o vegetación inundada y masas de agua pues en el modelo será contante.

Para la energía solar no se calcula la evolución por zonas sino únicamente por regiones.

#### 5.2.2.2.1. Tierras de cultivo

Para obtener los datos de la evolución de las tierras de cultivo se emplean:

- La categoría de tierras de cultivo (*cropland*) de FAOSTAT definida como la suma de tierra arable (*arable land*), todas las superficies dedicadas a cultivos temporales, y la superficie dedicada a cultivos permanentes (*land under permanent crops*), como cacao y café (FAO, 2018).
- La categoría de superficie equipada para regadío (*area equipped for irrigation*) de AQUASTAT, que incluye la superficie equipada para

suministrar agua a los cultivos mediante cualquier tecnología de riego (FAO, 2007).

La superficie de tierras de regadío se corresponde con la categoría de superficie equipada para regadío, mientras que la superficie de tierras de secano se calcula como la superficie de tierras de cultivo menos la equipada para regadío.

La superficie de tierras equipadas para regadío no se proporciona anualmente sino que solo para algunos años, 1997, 2002, 2007, 2012, 2017. En primer lugar los datos se agrupan por regiones LOCOMOTION y se calcula el crecimiento o decrecimiento anual por periodos (1997-2002, 2002-2007, 2007-2012, 2012-2017) con la Ecuación 5.10. Este se presenta en la Tabla 5.18.

Ecuación 5.10

$$trend\_of\_U_k[R_i]_{period\_x\_to\_y} = \frac{area\_of\_U_k[R_i]_{t=x} - area\_of\_U_k[R_i]_{t=y}}{(y - x)}$$

IRRIGATED EVOLUTION BY REGION				
Period	1997-2002	2002-2007	2007-2012	2012-2017
REGIONS_I	[Kha/year]	[Kha/year]	[Kha/year]	[Kha/year]
EU27	-245,76	-107,67	-60,08	17,05
UK	-23,68	15,06	-1,85	-1,48
CHINA	982,09	1.135,42	989,21	197,84
EASOC	602,43	411,83	-44,05	30,80
INDIA	1.362,41	635,69	763,09	162,64
LATAM	871,68	519,86	139,08	3,57
RUSSIA	-231,92	-149,84	178,44	33,87
USMCA	-15,11	149,51	-80,50	127,14
LOW	1.153,33	925,20	897,50	114,04

**Tabla 5.18.** Tendencia anual de tierras de regadío, 1997-2002, 2002-2007, 2007-2012, 2012-2017, por región LOCOMOTION (Fuente: Creación propia; FAOSTAT)

La superficie anual por región se calcula con la Ecuación 5.11:

Ecuación 5.11

$$area\_of\_U_k[R_i]_{t=j} = area\_of\_U_k[R_i]_{t=j-1} + trend\_of\_U_k[R_i]_{period\_x\_to\_y}$$

para  $j \in [x, y]$

### 5.2.2.2. Bosques

Aunque FAOSTAT solo presenta datos para bosques primarios, bosques plantados y bosques regenerados naturalmente, en sus informes sobre el estado de los bosques diferencia entre los siguientes tipos (FAO and UNEP., 2020):

- Bosques de regeneración natural (*Naturally regenerating forests*) divididos en:
  - Bosques primarios (*primary forest*) definidos como zonas formadas por especies arbóreas autóctonas en las que no



existen indicios claramente visibles de actividades humanas y en las cuáles los proceso ecológicos no han sido significativamente perturbados.

- Otros bosques de regeneración natural (*other naturally regenerating forests*).
- Bosques plantados (*Planted forests*) divididos en:
  - Plantaciones (*plantations*) definidas como bosques gestionados de forma intensiva, compuestos principalmente por una o dos especies, autóctona o exótica, cuyos árboles son de igual edad y plantados con espaciado regular y son establecidas principalmente con fines productivos.
  - Otros bosques plantados (*other planted forests*) que son aquellos que pueden llegar a parecerse a un bosque natural una vez alcanzada la madurez, incluyen los bosques plantados para la restauración del ecosistema y la protección del suelo y agua. De aquí en adelante se hará referencia a ellos como bosques forestados.

De FAOSTAT se obtiene la superficie anual de bosques regenerados naturalmente y bosques primarios y, por tanto, puede conocerse la superficie de los otros bosques regenerados naturalmente a partir de la resta de los dos anteriores (Ecuación 5.12):

**Ecuación 5.12**

$$area_{other\_naturally\_regenerated} = area_{naturally\_regenerated} - area_{primary}$$

La información sobre la evolución histórica de las plantaciones y bosques forestados puede calcularse a partir de los datos del informe “Global Forest Assessment Resources 2020. Main report” (FAO, 2020). Este presenta el porcentaje que representan las plantaciones y los bosques forestados respecto del total de bosques plantados en los años 1990, 2000, 2010 y 2020 para cada país (Figura 5.10)<sup>6</sup>.

---

<sup>6</sup> Dada la elevada extensión de estas tablas se muestra únicamente una parte de las mismas, en la que pueden verse los datos de los primeros países por orden alfabético.



Country/territory	Plantation forest (% of planted forest)				Other planted forest (% of planted forest)			
	1990	2000	2010	2020	1990	2000	2010	2020
Afghanistan	-	-	-	-	-	-	-	-
Albania	0	0	100	0	0	0	0	0
Algeria	0	0	0	0	100	100	100	100
American Samoa	-	-	-	-	-	-	-	-
Andorra	-	-	-	-	-	-	-	-
Angola	100	100	100	100	0	0	0	0
Anguilla	0	0	0	0	0	0	0	0
Antigua and Barbuda	0	0	0	0	0	0	0	0
Argentina	100	100	100	100	0	0	0	0
Armenia	0	0	0	0	100	100	100	100
Aruba	-	-	-	-	-	-	-	-
Australia	100	100	93	81	0	0	7	19
Austria	0	0	0	0	100	100	100	100

**Figura 5.10.** Porcentaje de plantaciones y bosques forestados respecto del total de bosques plantados, 1990, 2000, 2010 y 2020, por país (Fuente: FAO, 2020)

Multiplicando estos porcentajes por los datos de FAOSTAT sobre la superficie anual de bosques plantados en cada país se obtiene la superficie de plantaciones y bosques forestados en cada país en los años 1990, 2000, 2010 y 2020 (Ecuación 5.13).

**Ecuación 5.13**

$$area_{type\ planted\ year} = area_{planted\ year} * \%_{type\ planted\ year}$$

Estos datos se agrupan por regiones LOCOMOTION y, aplicando la Ecuación 5.10 se calcula el crecimiento o decrecimiento anual de la superficie de plantaciones y bosques forestados en los periodos 1990-2000, 2000-2010 y 2010-2020, en cada región (Tabla 5.19).

TYPES OF PLANTED FOREST TREND BY REGION (1990-2020)									
Type of planted forest (FAO) →	Planted forests			Plantations			Other planted forests		
Period →	1990-2000	2000-2010	2010-2020	1990-2000	2000-2010	2010-2020	1990-2000	2000-2010	2010-2020
REGIONS ↓	[Kha/year]	[Kha/year]	[Kha/year]	[Kha/year]	[Kha/year]	[Kha/year]	[Kha/year]	[Kha/year]	[Kha/year]
EU27	386,60	479,50	272,20	92,36	27,11	-18,38	294,24	452,40	290,38
UK	17,60	10,50	13,10	0,00	0,00	0,00	17,60	10,50	13,10
CHINA	1.067,80	1.849,40	1.137,20	360,77	359,86	320,79	707,03	1.489,54	816,41
EASOC	598,90	329,80	293,60	594,50	318,22	274,07	4,40	11,58	19,53
INDIA	365,30	341,10	49,00	372,72	249,87	37,24	-7,42	91,23	11,76
LATAM	157,70	482,90	468,40	157,70	482,90	468,40	0,00	0,00	0,00
RUSSIA	270,90	425,30	-73,30	0,00	0,00	0,00	270,90	425,30	-73,30
USMCA	939,10	766,10	613,70	269,61	375,55	152,20	669,49	390,55	461,50
LROW	258,90	447,00	285,10	153,64	315,75	219,09	105,27	131,25	67,01

**Tabla 5.19.** Tendencia anual de bosques plantados, plantaciones y bosques forestados, 1990-2000, 2000-2010 y 2010-2020, por región LOCOMOTION (Fuente: Creación propia)

Con estos datos y la Ecuación 5.11 se obtiene la superficie anual de plantaciones y bosques forestados en cada región.

Como las categorías de FAO no coinciden con las categorías de WILIAM se hace una correspondencia de la forma en que se muestra en la Tabla 5.20 y se obtiene la superficie anual de cada tipo de bosque WILIAM en cada región LOCOMOTION. En WILIAM no se incluye una categoría de bosque forestado sino

que se considera que cuando se foresta en una superficie esta se convierte en bosque gestionado.

Tipos de bosque de FAO	Tipos de bosque LOCOMOTION
Bosques primarios ( <i>primary forests</i> )	Bosques primarios ( <i>primary forests</i> )
Otros bosques naturalmente regenerados ( <i>other naturally regenerated forests</i> )	Bosques gestionados ( <i>managed forests</i> )
Otros bosques plantados ( <i>other planted forests</i> )	
Plantaciones ( <i>plantations</i> )	Bosque de plantación ( <i>plantations forests</i> )

**Tabla 5.20.** Correspondencia entre los tipos de bosque de FAO y LOCOMOTION  
(Fuente: Creación propia)

### 5.2.2.2.3. Matorrales

Para la evolución de las tierras de matorrales se emplea la categoría de cobertura del suelo de FAOSTAT “área cubierta por arbustos” (*shrub-covered areas*).

### 5.2.2.2.4. Tierras de pastoreo

Para la evolución de las tierras de pastoreo se emplea la categoría de uso del suelo de FAOSTAT “prados y pastos permanentes” (*permanent meadows and pastures*) definida como tierras utilizadas de forma permanente (cinco años o más) para alimentar al ganado, se incluye cualquier zona, independientemente de su vegetación, que se empleó para el pastoreo (FAO, 2018).

### 5.2.2.2.5. Superficie urbana

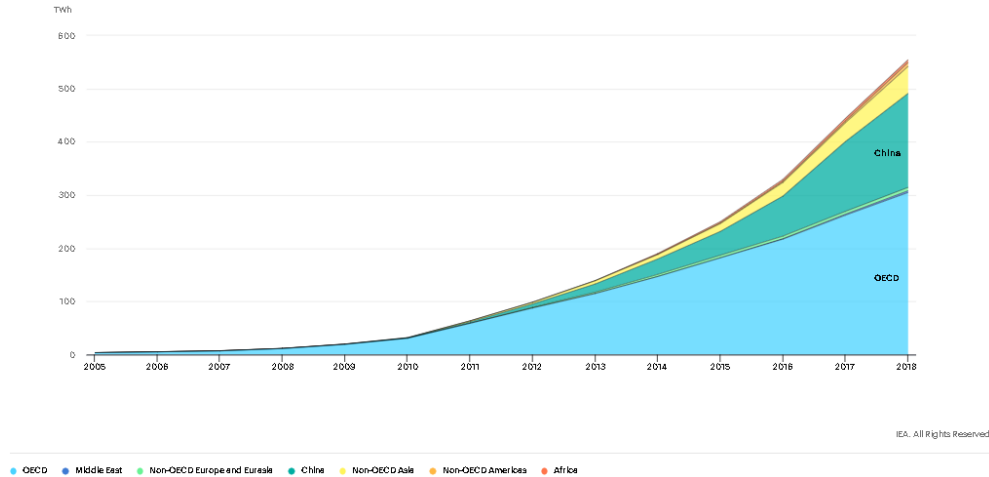
Para la evolución de las superficies urbanas se emplea la categoría de cobertura del suelo de FAOSTAT “áreas artificiales” (*artificial surfaces*), que incluye las zonas urbanas y asociadas (FAO, 2018).

### 5.2.2.2.6. Superficie destinada a la producción de energía solar

Cuantificar la superficie destinada a la producción de energía solar en cada región cada año presenta un desafío pues no es una categoría considerada ni en FAOSTAT ni en ESA CCI-LC, ni existe una base de datos al respecto. En este proyecto se calcula a partir de la energía solar producida en cada región cada año y la superficie que habría sido necesaria para generar esa producción.

#### Producción de energía solar por región

IEA proporciona los datos de la producción anual de electricidad por plantas fotovoltaicas entre 2005 y 2018 para las siguientes regiones (Figura 5.11): países pertenecientes a la OECD, Oriente Medio (*Middle East*), países de Europa y Eurasia no pertenecientes a la OECD, China, países de Asia no pertenecientes a la OECD, países de América no pertenecientes a la OECD y África.



**Figura 5.11.** Producción anual de electricidad por plantas PV entre 2005 y 2018  
(Fuente: IEA, 2020)

Además, en esta base de datos se proporciona también la producción de energía solar de plantas PV para cada país. Para calcular la producción de energía solar por región LOCOMOTION se compara qué países agrupa cada región y se obtiene el porcentaje de la producción de cada región IEA proviene de cada región LOCOMOTION, estos porcentajes se muestran en la Tabla 5.21. Aunque habitualmente para realizar este tipo de cálculos se emplean los datos del año base, en este caso se emplean los datos de 2018, puesto que se considera que, al ser una tecnología aún nueva, los datos son más precisos, más realistas y de mejor calidad que los datos que podrían obtenerse de 2005.

% of the solar energy production of each IEA region that is produced in each LOCOMOTION region									
LOCOMOTION regions	EU27	UK	CHINA	EASOC	INDIA	LATAM	RUSSIA	USMCA	LROW
IEA regions	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
OECD	34,96%	4,22%	-	26,87%	-	1,72%	-	27,27%	3,71%
Middle East	-	-	-	-	-	-	-	-	100,00%
Non-OECD Europe and Eurasia	58,76%	-	-	-	-	-	11,82%	-	29,41%
China	-	-	100%	-	-	-	-	-	-
Non-OECD Asia	-	-	-	13,31%	78,42%	-	-	-	8,27%
Non-OECD America	-	-	-	-	-	60,52%	-	-	39,48%
Africa	-	-	-	-	-	-	-	-	100%

**Tabla 5.21.** Porcentaje de la producción de energía solar de cada región IEA producida en cada región LOCOMOTION (Fuente: Creación propia)

Con estos porcentajes puede calcularse la producción anual de energía solar en cada región LOCOMOTION gracias a la Ecuación 5.14, en la que  $RIEA_j$  es cada una de las 7 regiones IEA y  $RLOC_i$  es cada una de las 9 regiones LOCOMOTION. La producción se muestra, en las unidades usadas en el proyecto, en la Tabla 5.22.

**Ecuación 5.14**  $production\_of\_solar\_energy[RLOC_i] =$

$$\sum_{j=1}^7 \%\_of\_RIEA_j\_solar\_energy\_from\_RLOC_i \cdot solar\_production[RIEA_j]$$



Annual solar energy production [MW*year] by LOCOMOTION region														
Year	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
REGIONS_i	[MW*year]	[MW*year]	[MW*year]	[MW*year]	[MW*year]	[MW*year]	[MW*year]	[MW*year]	[MW*year]	[MW*year]	[MW*year]	[MW*year]	[MW*year]	[MW*year]
EU27	141,76	204,94	279,20	453,61	771,18	1.226,84	2.360,76	3.582,49	4.750,34	6.113,56	7.570,25	8.986,29	10.820,56	12.571,04
UK	17,10	24,72	33,67	54,71	92,99	147,85	283,63	422,54	553,34	707,16	875,97	1.045,72	1.262,53	1.467,49
CHINA	9,59	10,84	13,01	17,35	31,85	79,79	297,37	725,00	1.763,93	3.332,88	5.112,21	8.597,72	14.988,24	20.194,18
EASOC	109,24	157,84	215,74	350,01	594,22	945,09	1.832,82	2.738,05	3.614,34	4.630,56	5.802,88	7.052,05	8.579,35	10.117,89
INDIA	1,97	2,24	7,34	8,95	10,92	19,34	153,62	273,23	527,03	741,54	1.312,71	2.301,78	3.163,10	4.535,16
LATAM	11,11	14,29	18,14	27,13	43,28	64,25	117,44	180,19	246,90	316,41	440,96	568,51	739,55	1.097,63
RUSSIA	0,01	0,01	0,03	0,04	0,09	0,30	2,02	16,18	33,04	50,83	62,42	64,27	71,78	82,19
USMCA	110,50	159,77	217,63	353,59	601,04	955,60	1.833,19	2.731,08	3.576,49	4.570,65	5.661,77	6.758,89	8.160,21	9.484,99
LCOW	19,71	26,95	35,88	56,47	93,05	174,60	306,30	489,81	687,77	1.039,26	1.449,69	1.934,53	2.571,83	3.301,65

**Tabla 5.22.** Producción anual de electricidad por plantas PV por región LOCOMOTION, 2005-2018 (Fuente: Creación propia; IEA, 2020)

### Eficiencia de la tierra para solar por región

Para calcular la superficie de tierra necesaria para generar esta energía solar ( $m^2/MW\cdot a\tilde{n}o$ ), es decir, la eficiencia energética del uso de la tierra para solar se emplea el enfoque de Capellán-Pérez et al. (Capellán-Pérez et al., 2017) y de Castro et al. (De Castro et al., 2013) para el cálculo de la densidad de energía solar neta en cada país  $i$  ( $\rho_e^i$ ), que se define como la potencia media entregada a la red ( $W_e/m^2$ ) por una planta fotovoltaica (PV) en cada país durante la vida media de la planta y se calcula a partir de la Ecuación 5.15:

**Ecuación 5.15** 
$$\rho_e^i = I^i \cdot f_1 \cdot f_2^i \cdot f_3^i$$

Donde  $I^i$  representa la irradiación solar media anual para el país  $i$  ( $W_e/m^2$ ) y los factores  $f_1, f_2^i, f_3^i$  representan las pérdidas relacionadas con el factor de eficiencia de las obleas, el coeficiente de rendimiento medio durante la vida media de la planta y el coeficiente de ocupación del suelo, respectivamente.

Capellán-Pérez et al. (Capellán-Pérez et al., 2017) estima la irradiación solar media de cada país ( $I^i$ ) superponiendo, gracias a una herramienta GIS, los datos de irradiación solar media anual de la base de datos SSE (Surface meteorology and Solar Energy) de la NASA con la superficie de cada país. Los países para los que se proporciona este dato se muestran en la Tabla 5.23.

El factor de eficiencia de las obleas ( $f_1$ ) se encuentra actualmente entre el 10% y 12% para obleas de silicio mono y policristalino. Aunque las tecnologías futuras apuntan a mejorar las eficiencias actuales no es claro que lleguen a superar el 20%, además, es probable que surjan futuras restricciones en la disponibilidad de materiales (Capellán-Pérez et al., 2017). En base a estas consideraciones Capellán-Pérez et al. estima que este factor se encuentra entre el 15-25%. En este proyecto se considera 20% como el valor de este parámetro.

Para calcular el rendimiento medio durante la vida útil de la planta ( $f_2$ ) deben considerarse factores como la degradación media de las obleas, las pérdidas eléctricas desde el contador hasta la red, las pérdidas por fallos, la corrosión y los problemas de cableado o el autoconsumo de energía para el mantenimiento (Capellán-Pérez et al., 2017). Siguiendo los cálculos de y de Castro et al. Capellán-Pérez et al. considera 0.65 como el valor de este



parámetro excepto en los climas más cálidos (tropical) donde se toma 0.60 pues el calor reduce la eficiencia de las obleas (Capellán-Pérez et al., 2017).

El ratio de ocupación del suelo es la cuantificación del espacio que debe dejarse libre entre los módulos para evitar el sombreado o para permitir el mantenimiento incluyendo las vías de acceso o los edificios de servicio. El sombreado es inevitable, sin embargo, para este parámetro la latitud y el clima son factores clave. En las regiones de baja latitud, es decir, los trópicos, los módulos pueden colocarse a una distancia menor pues el sol tiende a estar más alto en el cielo (Capellán-Pérez et al., 2017). De nuevo, en base al estudio de de Castro et al. Capellán-Pérez et al. estima este parámetro como se muestra en la Figura 5.12:

Geographical region		SBR	$f_3$
Tropics	$< 23.5^\circ$	2:1	0.34
Temperate1	$23.5^\circ < x < 51^\circ$	3:1	0.23
Temperate2	$51^\circ < x < 56^\circ$	4:1	0.17
Temperate3	$> 56^\circ$	6:1	0.11

**Figura 5.12.** Estimación del factor de cobertura del suelo por zona geográfica<sup>7</sup>  
(Fuente: Capellán-Pérez et al., 2017)

Para los países para los cuales Capellán-Pérez et al. proporciona la irradiancia anual media se calcula su densidad de energía solar neta ( $\rho_e^i$ ), gracias a la Ecuación 5.15. En la Tabla 5.23 se muestra el dato calculado para cada país junto a los datos de (Capellán-Pérez et al., 2017). La latitud de cada país se ha obtenido de internet y se considera el dato del centro de cada país.

<sup>7</sup> SBR se define como la separación entre filas dividida entre la distancia entre el borde más alto del panel y el suelo. No es empleado en el cálculo realizado en este proyecto.





Country	Latitude [°]	ZONE	Solar irradiance [ $W_g \cdot year/m^2$ ]	$f_1$ [Dmnl]	$f_2$ [Dmnl]	$f_3$ [Dmnl]	Solar power density [ $W_g \cdot year/m^2$ ]	REGIONS_I
Australia	25,00	TEMPERATE1	235	0,2	0,65	0,23	7,027	EASOC
Austria	47,70	TEMPERATE1	132	0,2	0,65	0,23	3,947	EU27
Belgium	50,50	TEMPERATE2	119	0,2	0,65	0,17	2,630	EU27
Brazil	14,24	TROPICAL	209	0,2	0,6	0,34	8,527	LATAM
Bulgaria	42,73	TEMPERATE1	155	0,2	0,65	0,23	4,635	EU27
Canada	62,23	TEMPERATE3	117	0,2	0,65	0,11	1,673	USMCA
China	35,00	TEMPERATE1	179	0,2	0,65	0,23	5,352	CHINA
Cyprus	35,10	TEMPERATE1	248	0,2	0,65	0,23	7,415	EU27
Czech Republic	49,49	TEMPERATE1	120	0,2	0,65	0,23	3,588	EU27
Denmark	55,94	TEMPERATE2	122	0,2	0,65	0,17	2,696	EU27
Estonia	59,00	TEMPERATE2	118	0,2	0,65	0,17	2,608	EU27
Finland	64,00	TEMPERATE3	104	0,2	0,65	0,11	1,487	EU27
France	47,00	TEMPERATE1	140	0,2	0,65	0,23	4,186	EU27
Germany	51,17	TEMPERATE2	118	0,2	0,65	0,17	2,608	EU27
Greece	31,00	TEMPERATE1	173	0,2	0,65	0,23	5,173	EU27
Hungary	47,00	TEMPERATE1	138	0,2	0,65	0,23	4,126	EU27
India	20,59	TROPICAL	210	0,2	0,65	0,34	9,282	INDIA
Indonesia	6,18	TROPICAL	203	0,2	0,65	0,34	8,973	EASOC
Ireland	53,14	TEMPERATE2	104	0,2	0,65	0,17	2,298	EU27
Italy	41,87	TEMPERATE1	161	0,2	0,65	0,23	4,814	EU27
Japan	36,20	TEMPERATE1	150	0,2	0,65	0,23	4,485	EASOC
Latvia	56,94	TEMPERATE3	120	0,2	0,65	0,11	1,716	EU27
Lithuania	55,17	TEMPERATE2	120	0,2	0,65	0,17	2,652	EU27
Luxembourg	49,61	TEMPERATE1	117	0,2	0,65	0,23	3,498	EU27
Malta	35,92	TEMPERATE1	238	0,2	0,65	0,23	7,116	EU27
Mexico	23,63	TROPICAL	226	0,2	0,65	0,34	9,989	USMCA
Netherlands	52,23	TEMPERATE2	119	0,2	0,65	0,17	2,630	EU27
Poland	51,92	TEMPERATE2	118	0,2	0,65	0,17	2,608	EU27
Portugal	38,46	TEMPERATE1	185	0,2	0,65	0,23	5,532	EU27
Romania	46,00	TEMPERATE1	140	0,2	0,65	0,23	4,186	EU27
Russia	61,52	TEMPERATE3	113	0,2	0,65	0,11	1,616	RUSSIA
Slovakia	48,40	TEMPERATE1	124	0,2	0,65	0,23	3,708	EU27
Slovenia	46,07	TEMPERATE1	141	0,2	0,65	0,23	4,216	EU27
South Korea	37,53	TEMPERATE1	166	0,2	0,65	0,23	4,963	EASOC
Spain	40,46	TEMPERATE1	178	0,2	0,65	0,23	5,322	EU27
Sweden	62,20	TEMPERATE3	104	0,2	0,65	0,11	1,487	EU27
Taiwan	25,11	TEMPERATE1	190	0,2	0,65	0,23	5,681	CHINA
Turkey	38,96	TEMPERATE1	181	0,2	0,65	0,23	5,412	LROW
United Kingdom	53,55	TEMPERATE2	108	0,2	0,65	0,17	2,387	UK
USA	38,00	TEMPERATE1	160	0,2	0,65	0,23	4,784	USMCA

**Tabla 5.23.** Densidad de energía solar y parámetros de cálculo por país  
(Fuente: Creación propia; Capellán-Pérez et al., 2017)

A partir de los valores obtenidos para estos países se calcula el valor medio de este parámetro en cada una de las zonas geográficas que considera el artículo. Calculando la media aritmética de la densidad de energía solar de todos los países que se encuentran dentro de la zona (Tabla 5.24).

ZONE	Solar power density [ $W_g \cdot year/m^2$ ]
TROPICAL	9,193
TEMPERATE1	4,962
TEMPERATE2	2,553
TEMPERATE3	1,596

**Tabla 5.24.** Densidad de energía solar por zona geográfica  
(Fuente: Creación propia)

Puesto que se conocen los países de cada región LOCOMOTION y gracias a su latitud se conoce también la zona geográfica en la que se encuentra cada uno, a partir de los datos de la producción solar anual de cada país puede calcularse el porcentaje de la producción de cada región LOCOMOTION que se produce en cada una de las zonas geográficas (Tabla 5.25). Para calcular la eficiencia energética de cada región LOCOMOTION se hace una media ponderada en base a estos porcentajes como se muestra en la Ecuación 5.16. Para LROW se asume que un 25% viene de cada zona, por su alto número de países y heterogeneidad. Los resultados se presentan en la Tabla 5.26.

% of solar production of each LOCOMOTION region from each paper ZONE									
REGIONS_I	EU27	UK	CHINA	EASOC	INDIA	LATAM	RUSSIA	USMCA	LROW
ZONE	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
TROPICAL	-	-	-	8%	100%	45%	-	2%	25%
TEMPERATE1	50%	-	100%	92%	-	55%	-	93%	25%
TEMPERATE2	50%	100%	-	-	-	-	-	-	25%
TEMPERATE3	0%	-	-	-	-	-	100%	4%	25%

**Tabla 5.25.** Porcentaje de la producción de energía solar de cada región LOCOMOTION producida en cada zona del estudio (Fuente: Creación propia)

Ecuación 5.16

$$solar\_power\_density_{RLOC_i} =$$

$$\sum_{j=1}^4 \%_{RLOC_i\_solar\_production\_from\_Zone_j} \cdot solar\_power\_density_{Zone_j}$$

Para  $RLOC_i$  cada una de las 9 regiones LOCOMOTION y  $Zone_j$  cada una de las 4 zonas geográficas que considera el estudio (Capellán-Pérez et al., 2017).

Solar power density	
REGIONS_I	$[W_h \cdot year/m^2]$
EU27	3,749
UK	2,553
CHINA	4,962
EASOC	5,283
INDIA	9,193
LATAM	6,849
RUSSIA	1,596
USMCA	4,947
LROW	4,576

**Tabla 5.26.** Densidad de energía solar por región LOCOMOTION (Fuente: Creación propia)

La eficiencia energética del uso de la tierra para solar ( $m^2/MW \cdot año$ ) se calcula como la inversa de la densidad de energía solar, se presentan en la Tabla 5.27 los resultados finales en las unidades empleadas en el proyecto.

Solar land efficiency	
REGIONS_I	[G <sub>a</sub> /MW · year]
EU27	0,000267
UK	0,000392
CHINA	0,000202
EASOC	0,000189
INDIA	0,000109
LATAM	0,000146
RUSSIA	0,000627
USMCA	0,000202
LROW	0,000219

**Tabla 5.27.** Eficiencia de la tierra para producir energía solar por región LOCOMOTION  
(Fuente: Creación propia)

Con esta información puede calcularse la superficie existente cada año en cada región LOCOMOTION con la Ecuación 5.17.

**Ecuación 5.17**

$$solar\_land_{R_i} = production\_of\_solar\_energy_{R_i} \cdot solar\_land\_efficiency_{R_i}$$

Esa superficie es muy pequeña, lo que está en línea con la literatura (van de Ven et al., 2021). En el periodo histórico 2005-2018 se considera que no existió producción solar en los tejados de las superficies urbanas, debido a que el pequeño porcentaje de tierra necesaria indica que aún no hay mucha producción de energía solar.

**5.2.2.2.7. Otros usos de la tierra**

Para la evolución de la categoría otros usos de la tierra se emplean la suma de las categorías de FAOSTAT “tierra estéril” (*terrestrial barren land*) que incluye zonas cubiertas por arena, grava, roca y suelo desnudo y “áreas con poca vegetación natural” (*sparsely natural vegetated areas*) (FAO, 2018).

**5.2.2.3. Cambios de uso del suelo**

En esta sección se presentan los procesos que se consideran como desencadenantes de los usos del suelo así como los cambios de uso del suelo que cada uno de ellos produce.

**Primeras hipótesis:**

Se descarta modelar los cambios de uso del suelo provocados por el cambio climático. Se considera que en comparación con los cambios debidos a la acción humana son de menor magnitud, es decir causan la transformación de una superficie menor y son menos habituales. Además, no existe literatura que cuantifique estos cambios de manera precisa e incluso si se encontrase un umbral que impulse el cambio estos son lentos y progresivos (ej. el proceso de desertización toma años de degradación progresiva, lo mismo ocurre en la transformación de bosque a matorrales), algo que no sucede en los cambios por acción humana (ej. en un periodo corto de tiempo se tala bosque y se establece una tierra de cultivo).



El stock de humedales permanece constante. Esta decisión se toma debido a la escasez de literatura que cuantifique de manera precisa los cambios sufridos por este tipo de tierras. Es el enfoque que adopta GLOBIOM.

La superficie terrestre permanecerá constante en todo momento:

- No se considera posible la pérdida de tierra y ganancia de masas de agua debido a la construcción de presas hidráulicas. Este es un trabajo que desarrollará el sub-módulo de agua de WILIAM en el futuro. Para el desarrollo de este proyecto las masas de agua permanecen constantes.
- No se considera posible la pérdida de tierra debido a la subida del nivel del mar. Este es un trabajo que desarrollará el sub-módulo de clima de WILIAM en el futuro.

### 5.2.2.3.1. Expansión urbana

Para cuantificar la cantidad de nueva superficie urbana que se obtiene del resto de usos de la tierra se emplea el estudio de van Vliet (van Vliet, 2019), quien proporciona el porcentaje de nuevas tierras urbanas que se obtuvo de cada uso de tierra entre 1992 y 2015 en cada una de las regiones que se muestran en el mapa de la Figura 5.14, las cuales de aquí en adelante se denominan regiones van Vliet. Estos porcentajes se presentan en la Figura 5.13. Cabe destacar que para llevar a cabo este estudio van Vliet emplea los datos y categorías de la ESA CCI-LC.

**Supplementary Table 1:** Land cover change as a result of built-up area expansion between 1992 and 2015. Percentages indicate the percentage relative to all built-up area expansion within each region. Values are rounded to the nearest percent, hence row-totals might not exactly add to 100%. MENA indicates Middle East and Northern Africa.

Region	Cropland		Forest		Shrubland		Grassland		Other	
	[Mha]	[%]	[Mha]	[%]	[Mha]	[%]	[Mha]	[%]	[Mha]	[%]
Canada and USA	2.3	39%	1.2	19%	1.3	21%	1.2	19%	0.1	1%
China	6.7	76%	0.2	3%	0.5	6%	1.2	14%	0.1	2%
Europe	6.3	75%	0.7	8%	0.4	4%	0.5	6%	0.5	6%
India	2.0	84%	0.1	3%	0.2	7%	0.1	5%	0.0	1%
Latin America	1.4	45%	0.3	11%	1.1	35%	0.2	8%	0.1	2%
MENA	0.7	40%	0.0	1%	0.2	10%	0.0	1%	0.8	48%
Oceania	0.1	16%	0.1	22%	0.2	49%	0.1	11%	0.0	3%
Russia	1.5	67%	0.2	8%	0.3	12%	0.2	9%	0.1	4%
Southeast Asia	2.5	85%	0.2	6%	0.2	5%	0.0	1%	0.1	3%
Sub-Saharan Africa	0.7	38%	0.3	16%	0.6	33%	0.2	10%	0.1	3%
World total	24.3	64%	3.3	9%	4.9	13%	3.7	10%	1.9	5%

**Figura 5.13.** Porcentaje de nuevas tierras urbanas obtenidas de cada uso de la tierra por región van Vliet (Fuente: van Vliet, 2019)

El problema que presentan estos datos es que las regiones van Vliet, no coinciden con las regiones LOCOMOTION, si bien es cierto que, en algunos casos, existe gran similitud entre los países que agrupan. Para poder emplear estos porcentajes en el modelo se adaptan a las regiones LOCOMOTION a través del siguiente procedimiento:

1. Primeramente se desagregan los porcentajes a nivel de país. Esto significa obtener para cada país el porcentaje de nuevas tierras urbanas que viene de cada uso de la tierra. Se asume que para los países de cada región los porcentajes son iguales a los de la región. Por ejemplo, si en Europa el 75% de las nuevas tierras urbanas proviene de tierras

de cultivo, en España y Francia, países agrupados dentro de Europa, el 75% de las nuevas tierras urbanas se obtienen de tierras de cultivo.

2. A continuación se compara en que región LOCOMOTION y en qué región van Vliet se encuentra cada país. Las regiones van Vliet se encuentran en la Figura 5.14 y las regiones LOCOMOTION puedes verse en la Figura 4.2. Para esto, se llevó a cabo una búsqueda de los países incluidos en cada una de las regiones van Vliet a partir del mapa de la Figura 5.14, puesto que en el artículo no se proporciona ningún listado.

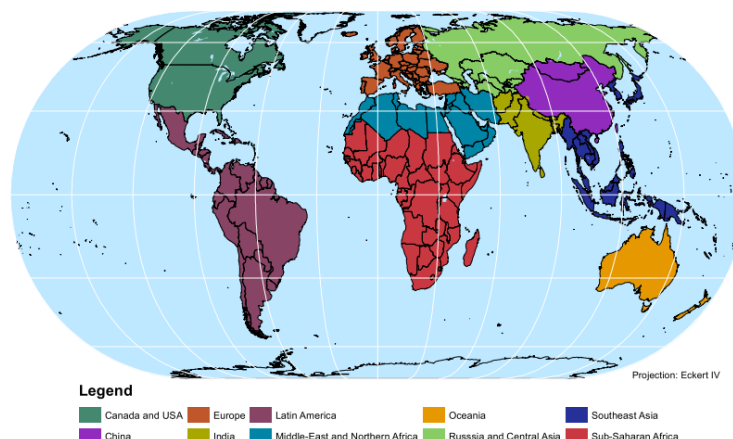


Figura 5.14. Regiones van Vliet (Fuente: van Vliet, 2019)

3. Se calcula el porcentaje de población de cada región LOCOMOTION que se encuentra en cada región van Vliet a partir de la población de cada país (Ecuación 5.18) (Tabla 5.28). Como se comentaba al inicio en algunos casos las agrupaciones son muy similares.

Ecuación 5.18

$$\%_{of\_RLOC_i\_population\_in\_RVliet_j} = \frac{population\_of\_countries\_in\_both\_RLOC_i\_and\_RLOC_j}{RLOC_i\_total\_population}$$

% of POPULATION of each LOCOMOTION region from each VAN VLIET region (1992-2015 average POPULATION)									
LOCOMOTION Regions →	EU27	UK	CHINA	EA5DC	INDIA	LATAM	RUSSIA	USMCA	LATAM
Van Vliet Regions ↓	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
EUROPE	100%	100%	-	-	-	-	-	-	8%
CHINA	-	-	100%	-	-	-	-	-	1%
INDIA	-	-	-	-	100%	-	-	-	18%
LATIN AMERICA	-	-	-	-	-	100%	-	24%	7%
CANADA & USA	-	-	-	-	-	-	-	76%	-
OCEANIA	-	-	-	3%	-	-	-	-	0%
SOUTHEAST ASIA	-	-	-	97%	-	-	-	-	3%
RUSSIA AND CENTRAL ASIA	-	-	-	-	-	-	100%	-	4%
MENA	-	-	-	-	-	-	-	-	18%
SUB-SAHARAN AFRICA	-	-	-	-	-	-	-	-	40%

Tabla 5.28. Porcentaje de población de cada región LOCOMOTION en cada región van Vliet (Fuente: Creación propia)

4. A partir de la media ponderada en base a los porcentajes de población calculados en el paso 3, se calcula el porcentaje de nuevas tierras



urbanas que se obtiene de cada uso de la tierra en cada región LOCOMOTION aplicando la Ecuación 5.19, en la cual  $RLOC_i$  cada una de las 9 regiones LOCOMOTION y  $RVliet_j$  cada una de las 10 regiones van Vliet. Esto puede hacerse dado que, como se explicó en el paso 1, todos los países de una misma región van Vliet siguen los mismos porcentajes.

**Ecuación 5.19**

$$\begin{aligned} \%_{new\_urban\_from\_other\_lands}[U_k, RLOC_j] \\ = \sum_{i=1}^{10} \%_{new\_urban\_from\_other\_lands}[U_k, RVliet_i] \\ \cdot \%_{of\_RLOC_i\_population\_in\_RVliet_j} \end{aligned}$$

En algunas regiones los porcentajes son idénticos, al encontrarse el 100% de la población de la región LOCOMOTION dentro de una región van Vliet, es el caso de EU27 y Europe. Sin embargo, en otras regiones, la población de la región LOCOMOTION se encuentra repartida entre varias regiones van Vliet. Por ejemplo, en USMCA encontramos que Canadá y Estados Unidos son países de Canada & USA y mientras que México lo es de Latin America. Por lo tanto, el porcentaje de superficie urbana que procede de cada uso de la tierra será 76% (Tabla 5.28) el de Canada & USA y 24% el de Latin America. Los resultados para cada región LOCOMOTION se muestran en la Tabla 5.29.

_MATRIX: HISTORICAL_SHARE_OF_NEW_URBAN_FORM_OTHER_LANDS_BY_REGION (REGIONS_I, LANDS_J)											
LANDS_I	RAINFED	IRRIGATED	FOREST_MANAGED	FOREST_PRIMARY	FOREST_PLANTATIONS	SHRUBLAND	GRASSLAND	WETLAND	URBAN	SOLAR	OTHER_LAND
REGIONS_J	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
EU27	75,00%	0,00%	8,00%	0,00%	0,00%	4,00%	6,00%	0,00%	0,00%	0,00%	6,00%
UK	75,00%	0,00%	8,00%	0,00%	0,00%	4,00%	6,00%	0,00%	0,00%	0,00%	6,00%
CHINA	76,00%	0,00%	3,00%	0,00%	0,00%	6,00%	14,00%	0,00%	0,00%	0,00%	2,00%
EASOC	82,95%	0,00%	6,48%	0,00%	0,00%	6,31%	1,30%	0,00%	0,00%	0,00%	3,00%
INDIA	84,00%	0,00%	3,00%	0,00%	0,00%	7,00%	5,00%	0,00%	0,00%	0,00%	1,00%
LATAM	45,00%	0,00%	11,00%	0,00%	0,00%	35,00%	8,00%	0,00%	0,00%	0,00%	2,00%
RUSSIA	67,00%	0,00%	8,00%	0,00%	0,00%	12,00%	3,00%	0,00%	0,00%	0,00%	4,00%
USMCA	40,47%	0,00%	17,05%	0,00%	0,00%	24,42%	16,31%	0,00%	0,00%	0,00%	1,24%
LDOW	53,57%	0,00%	9,09%	0,00%	0,00%	19,74%	6,60%	0,00%	0,00%	0,00%	10,98%

**Tabla 5.29.** Porcentaje de nuevas tierras urbanas que proviene de cada uso de la tierra por regiones LOCOMOTION (Fuente: Creación propia)

Se emplea la media ponderada por la población porque como se ha mencionado y como se verá también más adelante, el crecimiento de la superficie urbana está estrechamente ligado con el crecimiento de la población (Marshall, 2007) que es quien demanda esta superficie, por lo tanto, se considera como válido otorgar mayor peso a las tendencias de aquellas regiones con mayor volumen de población. Por coherencia, dado que el artículo proporciona los porcentajes relativos a la expansión de las tierras urbanas entre 1992 y 2015, para calcular los porcentajes de población de cada región LOCOMOTION dentro de cada región van Vliet (Tabla 5.28) se emplea la media de la población anual de cada país entre 1992 y 2015. Los datos de población fueron proporcionados por el WP5, módulo de demografía, y obtenidos de *World Bank Data*.

Aplicando los porcentajes (Ecuación 5.20) a la demanda de superficie urbana en cada región LOCOMOTION puede calcularse la superficie de cada uso de la

tierra que se pierde debido a la expansión urbana en cada región. Esta pérdida debe transformarse a zonas Köppen pues la distribución de usos de la tierra se hace por zonas, esto se hace en Vensim con las matrices RtoZ para cada uso de la tierra y la función *SUM*.

**Ecuación 5.20** 
$$loss\_due\_to\_urban[U_k, R_i] = \%\_new\_urban\_from\_other\_lands[U_k, R_i] \cdot demand\_of\_urban[R_i]$$

#### Hipótesis y consideraciones referentes a la expansión urbana

- Partimos de la hipótesis de que las ciudades tienden a ganar terreno expandiéndose y no es habitual que se creen de cero núcleos urbanos. Por lo tanto, se considera que la superficie de otros usos de la tierra que se pierden se encuentra rodeando o próxima a las ciudades.
- En su estudio, van Vliet no diferencia entre tipos de bosques (primario, gestionado, plantaciones) sino que considera una única categoría “bosque”. Se toma como hipótesis que todas las nuevas tierras urbanas que se obtienen de los bosques lo hacen de bosques gestionados, ya que se considera que no es posible que sustituyan a superficie de plantaciones, puesto que sería contraproducente económicamente y estas suelen estar más alejadas de los núcleos urbanos (Nahuelhual et al., 2012). Tampoco pueden obtenerse de los bosques primarios ya que, lo pocos bosques que aún existen como intactos se encuentran en zonas más profundas y de difícil acceso (Potapov et al., 2017; FAO and UNEP., 2020).
- Van Vliet tampoco diferencia entre tierras de cultivo de regadío o de secano sino que considera únicamente “tierras de cultivo”. De las tierras de cultivo que rodean las ciudades (agricultura peri-urbana) el 35% son de regadío y el 65% restante son de secano. De las que se encuentran a menos de 10 km de estas el 32% son de regadío y el 68% de secano y, a menos de 20 km, el 28,5% son de regadío y el 71,5% de secano (Thebo et al., 2014). Por lo tanto, es de esperar que al expandirse las ciudades lo hagan a costa tanto de tierras de secano como de tierras de regadío. Sin embargo, el propio van Vliet indica que cuando una tierra de cultivo es remplazada por tierra urbana es más tarde recuperada en algún otra parte para compensar la pérdida de producción (van Vliet, 2019), y especialmente con las tierras de regadío dada su alta productividad (United Nations, 2016). Puesto que las tierras de regadío obtienen prácticamente en su totalidad a partir tierras de secano (United Nations, 2016), es de esperar que, al perderse tierras de regadío estas se recuperaren a costa de tierras de secano, siempre que exista disponibilidad de agua, como se verá más adelante. Es decir, en ambos casos lo que se pierden realmente son tierras de secano, por este motivo se toma como simplificación que la expansión de tierras

urbanas a partir de tierras de cultivo es únicamente a costa de cultivos de secano.

### 5.2.2.3.2. Expansión de las tierras de cultivo

#### Cambios de uso del suelo

##### Tierras de cultivo de secano

El estudio de van Vliet (van Vliet, 2019) además de tratar la expansión urbana estudia también la expansión de las tierras de cultivo entre 1992 y 2015 y proporciona, para cada región van Vliet, el porcentaje de nuevas tierras de cultivo que se obtiene de cada uso de la tierra, los cuales se presentan en la Figura 5.15.

Region	Built-up		Forest		Shrubland		Grassland		Other	
	[Mha]	[%]	[Mha]	[%]	[Mha]	[%]	[Mha]	[%]	[Mha]	[%]
Canada and USA	0	0%	2.4	39%	1.5	25%	2.2	36%	0.0	0%
China	0	0%	5.7	44%	2.1	16%	3.3	25%	2.0	16%
Europe	0	0%	6.0	80%	0.9	12%	0.4	6%	0.2	2%
India	0	0%	1.8	48%	0.9	24%	0.7	18%	0.4	11%
Latin America	0	0%	30.6	81%	6.9	18%	0.2	1%	0.2	0%
MENA	0	0%	0.3	5%	4.6	75%	0.0	1%	1.2	20%
Oceania	0	0%	0.7	20%	2.8	77%	0.1	2%	0.0	1%
Russia	0	0%	3.4	20%	8.7	52%	4.2	25%	0.6	4%
Southeast Asia	0	0%	12.7	86%	1.9	13%	0.1	1%	0.1	1%
Sub-Saharan Africa	0	0%	15.9	49%	12.3	38%	3.9	12%	0.2	1%
World total	0	0%	79.5	56%	42.5	30%	15.1	11%	5.0	3%

**Figura 5.15.** Porcentaje de nuevas tierras de cultivo obtenidas de cada uso de la tierra por región van Vliet (Fuente: van Vliet, 2019)

El procedimiento que se sigue para transformar los porcentajes a las regiones LOCOMOTION es el mismo que se ha explicado para la expansión urbana. Se considera que la media ponderada por la población es también válida para las tierras de cultivo dado que uno de los factores determinantes en la demanda de alimentos de cada país es el volumen de población del mismo (Indufor, 2012), también la demanda de biocombustibles aumenta en base a la población (más población más energía es necesaria) (Indufor, 2012). Los porcentajes para cada región LOCOMOTION se muestran en la Tabla 5.30.

% OF NEW CROPLAND RAINFED FROM OTHER LAND USES									
LANDS_I →	RAINFED	IRRIGATED	FOREST	SHRUBLAND	GRASSLAND	WETLAND	URBAN	SOLAR	OTHER LAND
REGIONS_I ↓	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
EU27	0%	0%	80%	12%	6%	0%	0%	0%	2%
UK	0%	0%	80%	12%	6%	0%	0%	0%	2%
CHINA	0%	0%	44%	16%	25%	0%	0%	0%	16%
EASOC	0%	0%	84%	15%	1%	0%	0%	0%	1%
INDIA	0%	0%	48%	24%	18%	0%	0%	0%	11%
LATAM	0%	0%	81%	18%	1%	0%	0%	0%	0%
RUSSIA	0%	0%	20%	52%	25%	0%	0%	0%	4%
USMCA	0%	0%	49%	23%	27%	0%	0%	0%	0%
LROW	0%	0%	46%	38%	10%	0%	0%	0%	7%

**Tabla 5.30.** Porcentaje de nuevas tierras de cultivo obtenidas de cada uso de la tierra (sin tipos de bosques) por región LOCOMOTION (Fuente: Creación propia)

En la Tabla 5.30 no se ha desagregado en los distintos tipos de bosque puesto pues van Vliet no lo incluye, sin embargo, a diferencia de para la expansión urbana, la literatura indica que parte de las tierras de cultivo se han obtenido





a partir de la expansión en bosques primarios (Potapov et al., 2017), especialmente en las zonas tropicales (Gibbs et al., 2009).

Gibbs et al. (Gibbs et al., 2009) llevaron a cabo un estudio sobre los usos de la tierra a costa de los cuales se han expandido las tierras de agricultura, definidas como tierras de pastoreo y tierras de cultivo, en las zonas tropicales. En concreto el estudio se centra en América Central, América del Sur, oeste de África, África central, este de África, Asia del sur y sudeste asiático, de aquí en adelante regiones Gibbs, y proporciona el porcentaje de tierras de agricultura obtenido a partir de tierras de matorrales, de bosques perturbados y de bosques intactos entre 1980 y 1990 y entre 1990 y 2000, estos se presentan en la Figura 5.16.

Region	Land source	Weighted average		Sampling unit average	
		1980s	1990s	1980s	1990s
Pan-Tropical	Forest	53	59	58	57
	Disturbed forest	29	25	27	26
	Shrubland	15	13	11	10
Central America	Forest	73	67	65	61
	Disturbed forest	17	22	18	20
	Shrubland	7	4	15	8
South America	Forest	50	63	61	63
	Disturbed forest	24	13	18	17
	Shrubland	25	20	17	15
West Africa	Forest	53	30	48	38
	Disturbed forest	42	64	45	52
	Shrubland	2	4	4	7
Central Africa	Forest	75	64	83	78
	Disturbed forest	20	29	16	20
	Shrubland	0	4	0	1
East Africa	Forest	43	61	47	51
	Disturbed forest	44	27	36	25
	Shrubland	11	12	16	24
Total Africa	Forest	61	55	63	60
	Disturbed forest	32	36	29	29
	Shrubland	4	7	6	10
South Asia	Forest	35	35	45	46
	Disturbed forest	61	59	29	28
	Shrubland	2	3	10	4
Southeast Asia	Forest	57	59	46	43
	Disturbed forest	33	33	39	38
	Shrubland	8	4	10	10

**Figura 5.16.** Porcentaje de nuevas tierras de cultivo obtenidas de cada uso de la tierra por región Gibbs (Fuente: Gibbs et al., 2009)

Puesto que de este artículo se busca conocer el porcentaje de nuevas tierras de cultivo que se ha obtenido históricamente de cada tipo de bosque (primario o gestionado) se calcula el porcentaje total de nuevas tierras de cultivo que se han obtenido de bosques, y qué porcentaje de este ha sido de bosque primario y cuál de bosque gestionado en las regiones Gibbs (Tabla 5.31).

% from each forest type of agriculture from forest			
Period →		1980-1990	1990-2000
Gibbs regions ↓	Type of forest ↓	[%]	[%]
Central America	Primary forest	78%	75%
	Managed forest	22%	25%
South America	Primary forest	77%	79%
	Managed forest	23%	21%
West Africa	Primary forest	52%	42%
	Managed forest	48%	58%
Central Africa	Primary forest	84%	80%
	Managed forest	16%	20%
East Africa	Primary forest	57%	67%
	Managed forest	43%	33%
South America	Primary forest	61%	62%
	Managed forest	39%	38%
South Asia	Primary forest	54%	53%
	Managed forest	46%	47%
Southeast Asia	Primary forest	68%	67%
	Managed forest	32%	33%

**Tabla 5.31.** Porcentaje que proviene de cada tipo de bosque de las tierras de agricultura que vienen de bosques por región Gibbs (Fuente: Creación propia; Gibbs et al., 2009)

Para realizar la transformación de las regiones Gibbs a las regiones LOCOMOTION se utiliza el mismo método que para el estudio de van Vliet, una media ponderada en base al porcentaje de población de cada región LOCOMOTION que se encuentra en cada región Gibbs (Tabla 5.32).

% of POPULATION of each LOCOMOTION region in each GIBBS region									
LOCOMOTION region →	EU27	UK	CHINA	EASOC	INDIA	LATAM	RUSSIA	USMCA	LROW
Gibbs region ↓	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Central America	-	-	-	-	-	1,64%	-	100%	2,69%
South America	-	-	-	-	-	98,36%	-	-	4,73%
West Africa	-	-	-	-	-	-	-	-	24,70%
Central Africa	-	-	-	-	-	-	-	-	7,13%
East Africa	-	-	-	-	-	-	-	-	27,20%
South Asia	-	-	-	-	100%	-	-	-	28,89%
Southeast Asia	-	-	-	100%	-	-	-	-	4,66%

**Tabla 5.32.** Porcentaje de población de cada región LOCOMOTION en cada región Gibbs (Fuente: Creación propia)

A continuación se calculan los porcentajes para cada región LOCOMOTION en base a la Ecuación 5.18 adaptada para las regiones y porcentajes Gibbs. Dado que se calculan los porcentajes para las décadas de los ochenta y los noventa, el porcentaje definitivo para cada región se calcula como la media de ambos. Para las regiones LOCOMOTION que no guardan ninguna relación con las regiones Gibbs se asume que el porcentaje que viene de bosques primarios es 0 y que todas las tierras de agricultura que se obtienen de bosques provienen de bosques gestionados.

% from each type of forest of agriculture from forest		
LANDS_I →	FOREST_PRIMARY	FOREST_MANAGED
REGIONS_I ↓	[%]	[%]
EU27	0,00%	100,00%
UK	0,00%	100,00%
CHINA	0,00%	100,00%
EASOC	77,96%	22,04%
INDIA	61,49%	38,51%
LATAM	77,96%	22,04%
RUSSIA	0,00%	100,00%
USMCA	76,81%	23,19%
LROW	60,26%	39,74%

**Tabla 5.33.** Porcentaje que proviene de cada tipo de bosque de las tierras de agricultura que vienen de bosques por región LOCOMOTION (Fuente: Creación propia)

Multiplicando estos porcentajes por el porcentaje de nuevas tierras de cultivo que se obtiene del bosque calculado a partir del estudio de van Vliet y que se encuentra en la Tabla 5.30, se obtienen los porcentajes definitivos que se muestran en la Tabla 5.34.

% OF NEW CROPLAND RAINFED FROM OTHER LAND USES BY REGION												
LANDS_I →	RAINFED	IRRIGATED	FOREST_MANAGED	FOREST_PRIMARY	FOREST_PLANTATIONS	SHRUBLAND	GRASSLAND	WETLAND	URBAN	SOLAR	OTHER_LAND	
REGIONS_I ↓	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	
EU27	0%	0%	80%	0%	0%	12%	6%	0%	0%	0%	2%	
UK	0%	0%	80%	0%	0%	12%	6%	0%	0%	0%	2%	
CHINA	0%	0%	44%	0%	0%	16%	25%	0%	0%	0%	16%	
EASOC	0%	0%	19%	66%	0%	15%	1%	0%	0%	0%	1%	
INDIA	0%	0%	18%	30%	0%	24%	18%	0%	0%	0%	11%	
LATAM	0%	0%	18%	63%	0%	18%	1%	0%	0%	0%	0%	
RUSSIA	0%	0%	20%	0%	0%	52%	25%	0%	0%	0%	4%	
USMCA	0%	0%	11%	38%	0%	23%	27%	0%	0%	0%	0%	
LROW	0%	0%	18%	28%	0%	38%	10%	0%	0%	0%	7%	

**Tabla 5.34.** Porcentaje de nuevas tierras de cultivo obtenidas de cada uso de la tierra por región LOCOMOTION (Fuente: Creación propia)

Puesto que interesa conocer la pérdida de otros usos de la tierra por zonas, se transforman estos porcentajes a las zonas Köppen. Para ello se emplean las matrices RtoZ para cada uso de la tierra, de esta forma se obtiene, para cada uso de la tierra, la cantidad (de su porcentaje) que se obtiene de cada zona dentro de cada región. Al sumar los porcentajes por zonas y usos de la tierra los datos se han descuadrado y ahora la suma de todos los usos ya no es uno. Para corregir esto se calcula el porcentaje que representa cada uso de la tierra respecto de la suma total por zona, obteniendo, tras este proceso, los resultados que se muestran en la Tabla 5.35.

_MATRIX_HISTORICAL_SHARE_OF_NEW_RAINFED_FROM_OTHER_LANDS_BY_ZONE(ZONES_I,LANDS_I)												
LANDS_I	RAINFED	IRRIGATED	FOREST_MANAGED	FOREST_PRIMARY	FOREST_PLANTATIONS	SHRUBLAND	GRASSLAND	WETLAND	URBAN	SOLAR	OTHER_LAND	
ZONES_I	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	
TROPICAL	0,00%	0,00%	26,33%	52,49%	0,00%	18,65%	2,06%	0,00%	0,00%	0,00%	0,47%	
WARM	0,00%	0,00%	35,37%	25,55%	0,00%	24,53%	13,66%	0,00%	0,00%	0,00%	0,89%	
ARID_HOT	0,00%	0,00%	5,02%	11,11%	0,00%	56,61%	15,13%	0,00%	0,00%	0,00%	12,14%	
ARID_COLD	0,00%	0,00%	2,90%	6,53%	0,00%	24,20%	38,46%	0,00%	0,00%	0,00%	27,91%	
TEMPERATE	0,00%	0,00%	71,95%	7,15%	0,00%	12,28%	7,15%	0,00%	0,00%	0,00%	1,46%	
WINTER_SNOW	0,00%	0,00%	36,61%	16,97%	0,00%	22,86%	22,46%	0,00%	0,00%	0,00%	1,09%	
SNOW	0,00%	0,00%	38,07%	13,45%	0,00%	26,61%	15,17%	0,00%	0,00%	0,00%	4,69%	
POLAR	0,00%	0,00%	4,82%	2,79%	0,00%	29,46%	44,25%	0,00%	0,00%	0,00%	18,67%	

**Tabla 5.35.** Porcentaje de nuevas tierras de cultivo obtenidas de cada uso de la tierra por zona Köppen (Fuente: Creación propia)



Puede calcularse la pérdida de cada uso de la tierra debido a la expansión de los cultivos de secano en cada zona Köppen con la Ecuación 5.21.

$$\text{Ecuación 5.21} \quad \text{loss\_due\_to\_rainfed}[U_k, Z_j] = \\ \%\_new\_rainfed\_from\_other\_lands[U_k, Z_j] \cdot \text{demand\_of\_rainfed}[Z_j]$$

Se muestra el resumen de este proceso en la Figura 5.18:

#### Tierras de cultivo de regadío

Se considera que toda la demanda de tierras de cultivo de regadío se cubre con la transformación de tierras de cultivo de secano (United Nations, 2016).

#### Límites de la expansión de las tierras de cultivo

##### Tierras de cultivo de secano

La disponibilidad global real de superficie de otros usos de la tierra que puede convertirse en tierras de cultivo de secano está determinada por la calidad y productividad de esta para el cultivo de los principales productos agrícolas. (G Fischer et al., 2011) llevó a cabo un estudio con el objetivo de conocer qué porcentaje de la superficie de pastizales, tierras de matorrales y bosques que puede convertirse en tierras de cultivo, se considera como excelente, buena y marginal en cada región FAO. Se entiende como excelente aquella en la que los rendimientos de los cultivos alcanzan el 80% de los rendimientos potenciales, buena si los rendimientos reales están entre el 40-80% de los máximos alcanzables y marginal si estos no superan el 40% de los potenciales. Los resultados del estudio se muestran en la Figura 5.17.



**TABLE 6: LAND SUITABILITY FOR RAINFED CROPS AT MIXED INPUTS CURRENT CULTIVATED LAND, UNPROTECTED GRASSLAND/WOODLAND ECOSYSTEMS AND UNPROTECTED FOREST ECOSYSTEMS**

**Mixed inputs - RAINFED CROPS**

Region	Cultivated land				Unprotected grassland/woodland				Unprotected forest land			
	Total	Prime land	Good land	Marginal land	Total	Prime land	Good land	Marginal land	Total	Prime land	Good land	Marginal land
	Million ha		%		Million ha		%		Million ha		%	
North America	230	39	52	9	593	3	20	77	562	11	27	62
Easter Europe & Russia	205	37	56	6	543	7	12	81	763	11	16	73
Northern Europe	20	34	44	22	53	4	11	85	63	3	8	90
Southern Europe	44	18	43	39	28	9	13	79	31	6	11	83
Western Europe	35	48	39	12	28	19	21	59	26	11	20	69
Caribbean	7	40	56	4	7	23	41	37	4	22	37	41
Central America	36	24	51	24	92	7	22	71	77	13	21	66
South America	129	32	60	8	608	15	37	49	686	17	47	36
Australia & NZ	51	8	51	41	468	2	13	85	76	10	36	54
Melanesia	1	31	55	14	15	13	24	63	33	15	25	60
Eastern Africa	83	36	49	14	408	17	34	49	105	24	43	33
Central Africa	38	20	75	5	198	13	56	31	275	10	68	22
Northern Africa	19	16	49	35	33	4	29	68	5	7	30	64
Southern Africa	18	34	54	11	150	4	22	74	12	15	38	47
Western Africa	86	31	57	12	184	13	23	64	49	13	33	54
Western Asia	40	7	58	35	56	1	21	77	11	3	18	79
South-East Asia	97	28	55	17	93	13	18	69	171	16	17	67
Southern Asia	229	25	42	33	106	3	12	85	74	10	19	72
Eastern Asia	151	17	48	35	319	2	17	81	204	7	15	78
Central Asia	41	3	74	23	121	2	42	56	8	5	36	59
More developed	590	34	52	14	1 716	5	15	80	1 543	10	21	69
Less developed	969	25	53	22	2 386	11	31	59	1 694	14	40	46
World total	1 559	28	52	19	4 102	8	24	68	3 237	12	31	57

**Figura 5.17.** Superficie de otros usos de la tierra que puede convertirse en tierras de cultivo y su calidad por regiones FAO (Fuente: Fischer et al., 2011)

En este proyecto se considera que las únicas tierras que es posible transformar a tierras de cultivos son aquellas consideradas como excelentes. Para calcular la cantidad de tierra excelente de cada uso de la tierra en las regiones Locomotion se considera que la cantidad de tierra excelente de cada región FAO en cada región Locomotion será proporcional a la cantidad de superficie total de cada región FAO en cada región Locomotion (Ecuación 5.22), este último porcentaje se muestra en la Tabla 5.36. Es decir, si por ejemplo, un 81,33% de la superficie total de South America se encuentra en LATAM, el 81,33% de la superficie de tierras clasificadas como excelentes en South America se considera que se encuentran en LATAM. Los datos de la superficie total de un país se obtienen de FAOSTAT (FAO, 2018). Los pastizales y las tierras de matorrales se han separado en base al porcentaje que representa cada uso respecto de la suma de la superficie de ambos en el año base, 2005, en cada región. Es decir, de nuevo se reparte de manera proporcional a la superficie. Los resultados totales para cada región Locomotion se calculan con la Ecuación 5.23 y se muestran en la Tabla 5.37.



Ecuación 5.22

$$\%\_of\_RFAO_j\_area\_in\_RLOC_i = \frac{area\_of\_countries\_in\_both\_RFAO_j\_and\_RLOC_i}{total\_area\_of\_RFAO_j}$$

% of each FAO region in each LOCOMOTION region									
LOCOMOTION regions	EU27	UK	CHINA	EASOC	INDIA	LATAM	RUSSIA	USMCA	LROW
FAO regions	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Eastern Africa	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
Middle Africa	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
Northern Africa	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
Southern Africa	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
Western Africa	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
North America	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	97,96%	2,04%
Central America	0%	0%	0%	0%	0%	79,00%	0%	2,06%	18,95%
Caribbean	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
South America	0%	0%	0%	0%	0%	81,33%	0%	0%	18,67%
Central Asia	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
Eastern Asia	0%	0%	81,31%	5,09%	0%	0%	0%	0%	13,60%
Southern Asia	0%	0%	0%	2,37%	52,79%	0%	0%	0%	44,84%
Southern-East Asia	0%	0%	0%	79,41%	0%	0%	0%	0%	20,59%
Western Asia	12,86%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	99,81%
Eastern Europe	4,69%	0%	0%	0%	0%	0%	1,27%	0%	4,49%
Northern Europe	52,50%	11,91%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0,14%
Southern Europe	84,56%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	15,44%
Western Europe	99,98%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0,31%
Australia and New Zealand	0%	0%	0%	100,00%	0%	0%	0%	0%	0%
Melanesia	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%

Tabla 5.36. Porcentaje de superficie de cada región FAO en cada región LOCOMOTION (Fuente: Creación propia)

Ecuación 5.23

$$cropland\_expansion\_limits[RLOC_i] = \sum_{j=1}^{20} \%\_of\_RFAO_j\_area\_in\_RLOC_i \cdot cropland\_expansion\_limits[RLOC_i]$$

Prime land by LOCOMOTION region [Ga]			
Land use	SHRUBLAND	GRASSLAND	FOREST_MANAGED
REGIONS_I	[Ga]	[Ga]	[Ga]
EU27	67,57	36,61	94,04
UK	0,79	1,73	2,25
CHINA	15,53	36,34	116,10
EASOC	139,16	54,44	302,28
INDIA	13,03	3,76	39,06
LATAM	665,97	126,62	1.027,52
RUSSIA	3,31	1,51	10,63
USMCA	125,31	50,28	607,65
LROW	1.099,69	484,21	1.076,74

Tabla 5.37. Límites de la expansión de tierras de cultivo de secano por región LOCOMOTION (Fuente: Creación propia)

Para transformar estas tierras a las zonas Köppen se utilizan las matrices RtoZ para cada uso de la tierra. Los resultados se muestran en la Tabla 5.38.

Prime land by LOCOMOTION region [Ga]			
Land use	SHRUBLAND	GRASSLAND	FOREST
REGIONS_I	[Ga]	[Ga]	[Ga]
EU27	67,57	36,61	94,04
UK	0,79	1,73	2,25
CHINA	15,53	36,34	116,10
EASOC	139,16	54,44	302,28
INDIA	13,03	3,76	39,06
LATAM	665,97	126,62	1.027,52
RUSSIA	3,31	1,51	10,63
USMCA	125,31	50,28	607,65
LROW	1.099,69	484,21	1.076,74

**Tabla 5.38.** Límites de la expansión de tierras de cultivo de secano por zona Köppen  
(Fuente: Creación propia)

Incorporar estos límites supone que la pérdida de cada uso de la tierra ya no es calculada según la Ecuación 5.21, sino que ahora debe tenerse en cuenta que una vez superado el límite no es posible extraer más tierra de ese uso del suelo para la conversión en tierras de secano. La pérdida es ahora calculada con la Ecuación 5.24, esta permite que se alcance el límite de manera gradual y no brusca. Es decir, a medida que se aproxima el límite cada vez puede extraerse menos tierra hasta que se alcanza momento a partir del cual no puede extraerse nada. Es importante que para los límites en el caso de los bosques deben sumarse las pérdidas de bosques primarios y bosques gestionados.

**Ecuación 5.24**  $actual\_loss\_due\_to\_rainfed[U_k, Z_i] =$

$$loss\_due\_to\_rainfed[U_k, Z_i] \cdot \left(1 - \frac{land\_loss[U_k, Z_i]}{limit\_rainfed\_expansion[U_k, Z_i]}\right)$$

para  $\frac{land\_loss[U_k, Z_i]}{limit\_rainfed\_expansion[U_k, Z_i]} > 0$

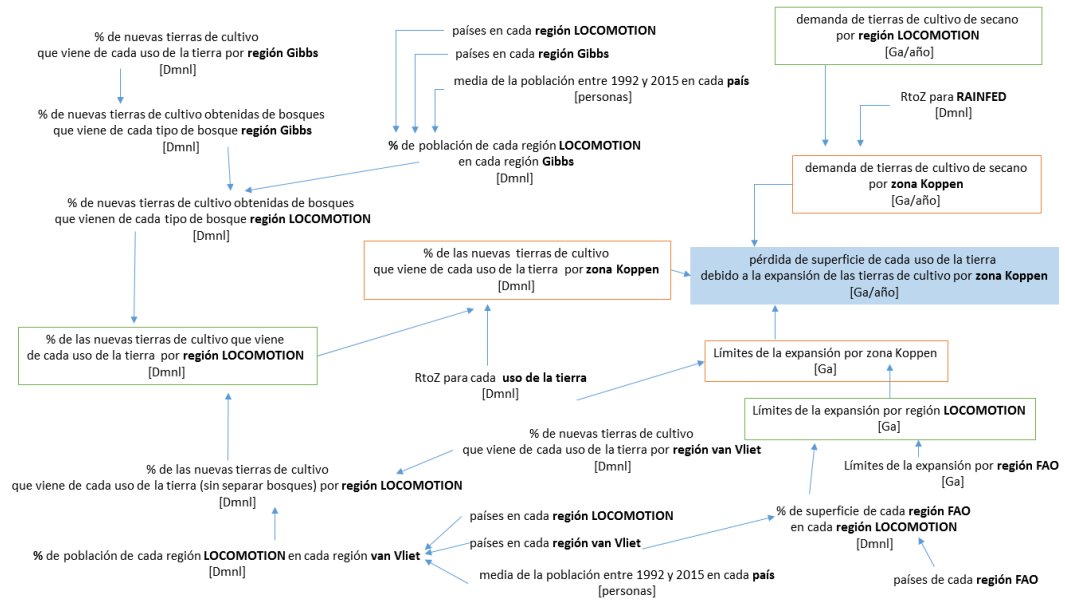
La tierra perdida de cada uso de la tierra se calcula con la Ecuación 5.25.

**Ecuación 5.25**

$$land\_loss[U_k, Z_i] = INITIAL\_LAND[U_k, Z_i] - land\_of\_U_k[Z_i]$$

para  $INITIAL\_LAND[U_k, Z_i] > land\_of\_U_k[Z_i]$

El resumen del proceso llevado a cabo para la obtención de datos y cálculo de la tierra perdida por la expansión de las tierras de cultivo se muestra en la Figura 5.18.



**Figura 5.18.** Resumen del proceso para la obtención de datos sobre los cambios de uso del suelo causados por la expansión de las tierras de cultivo de secano (Fuente: Creación propia)

### Tierras de cultivo de regadío

La agricultura de regadío es altamente dependiente de la existencia de un adecuado suministro de riego así como de que el agua proporcionada por este sea de calidad. Prácticamente todo el agua de buena calidad está siendo actualmente usada, lo que significa que, los nuevos sistemas de regadío que surjan deberán obligados a emplear suministros de peor calidad (FAO, 1994). Puesto que más del 70% del uso humano de los recursos hídricos naturales es destinado al riego (Günther Fischer et al., 2007), es de esperar que, la disminución de la capacidad de estos recursos afecte negativamente a la agricultura de regadío.

En este proyecto se considera que una disminución de la disponibilidad de agua conlleva una pérdida de tierras de regadío.

### Hipótesis y consideraciones referentes a la expansión de tierras de cultivo

- Se considera que la expansión de las tierras de cultivo a costa de otros usos de la tierra es completamente para la expansión de las tierras de cultivos de secano. Las tierras de cultivo de regadío se obtienen exclusivamente a partir de las tierras de cultivo de secano (United Nations, 2016). Se descarta que en las zonas árida puede aumentar a partir de otros usos de la tierra (United Nations, 2016) por la imposibilidad de cuantificar de manera exacta esta tendencia.
- Se tienen en cuenta límites de expansión en las tierras de cultivo puesto que la calidad de la tierra así como la disponibilidad de agua son factores determinantes para los rendimientos de los cultivos. La



expansión en peores tierras supone consecuencias económicas pues la producción obtenida de las mismas será inferior y serán necesarias aún más tierras de cultivo para cubrir la misma demanda (van Vliet, 2019), lo mismo sucede en el caso de no existir suficiente agua para el riego.

- Para los límites se considera la pérdida total de otros usos de la tierra y no únicamente la debida a la expansión de la las tierras de cultivo en base a los estudios que indican que es habitual que los usos de la tierra como (solar o urbana) se expandan a costa de las tierras de cultivo más productivas (van de Ven et al., 2021; van Vliet, 2019).

### 5.2.2.3.3. Expansión de las tierras de pastoreo

Según FAO, a excepción de en América del Sur, las tierras de pastoreo se han mantenido constantes por lo tanto solo allí su expansión ha contribuido a la deforestación (Gibbs et al., 2009; FAO, 2016). Graesser et al. (Graesser et al., 2015) llevaron a cabo un estudio sobre las tendencias en la expansión de las tierras de cultivo y las tierras de agricultura en América Latina entre 2001 y 2013 (Figura 5.19).

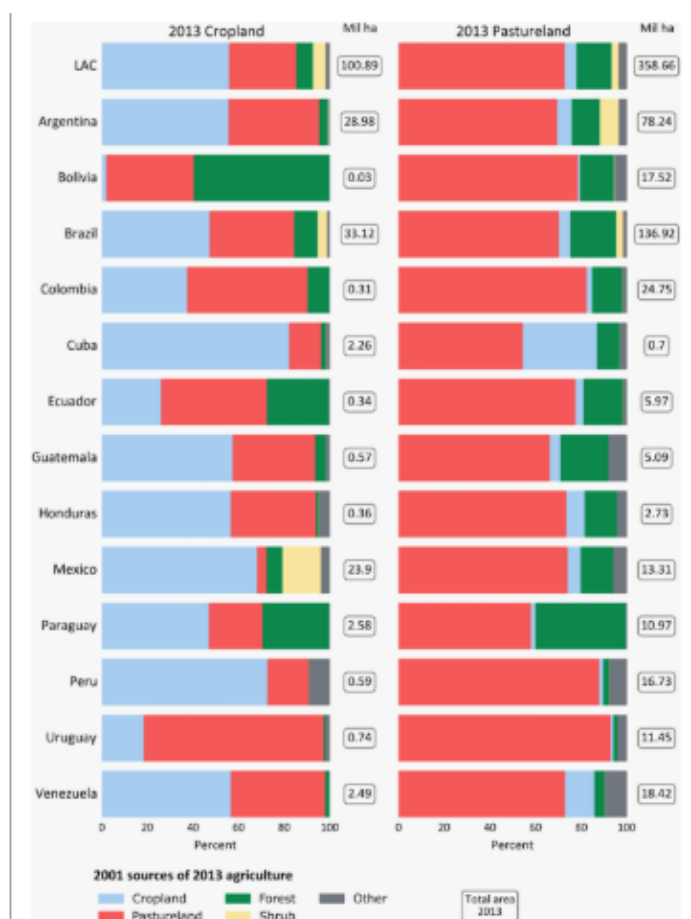


Figura 5.19. Cantidad de nuevas tierras de cultivo y de pastoreo de otros usos de la tierra en países de Latino América (Fuente: Graesser et al., 2015)

El estudio no proporciona directamente los porcentajes de la cantidad de nuevas tierras de pastoreo que provienen de cada uso de la tierra sino que presenta una matriz de confusión o matriz de transformación (Figura 5.20) de la cual pueden obtenerse estos porcentajes.

High-res. label	Cropland	Pastureland	Forest	Shrub	Other	total	accuracy
Cropland	<b>340</b>	150	18	8	2	518	66%
Pastureland	99	<b>700</b>	88	68	36	998	71%
Forest	63	247	<b>567</b>	34	1	912	62%
Shrub	23	16	6	<b>93</b>	8	146	64%
Other	13	24	1	8	<b>149</b>	195	76%
Row total	538	1,137	680	211	196		
User's accuracy	63%	62%	83%	44%	76%		

Total pixels assessed: 2,642  
Overall accuracy: 67%

**Figura 5.20.** Matriz de transición entre usos de la tierra para LATAM  
(Fuente: Graesser et al., 2015)

El propio artículo indica que la tendencia histórica ha sido que las nuevas tierras de pastoreo se expandan mayoritariamente a costa de los bosques primarios o intactos (Graesser et al., 2015), sin embargo, en la matriz no se diferencia entre tipos de bosque. Para hacer la distinción se emplean los porcentajes obtenidos en la sección anterior (Tabla 5.39) a partir del estudio de Gibbs et al. (Gibbs et al., 2009), que coinciden con esta tendencia, pues, en LATAM, el 78% de los pastos que se obtienen de bosques (el 60%) lo hacen de bosques primarios. Se considera como válida la media ponderada por la población para las tierras de pastoreo puesto que la demanda de estas aumenta si lo hace a demanda de carne (FAO, 2016), que al ser un alimento, aumenta, al igual que los cultivos, en función de la población.

% OF NEW GRASSLAND FROM OTHER LANDS BY REGION											
LANDS_I →	RAINFED	IRRIGATED	FOREST_MANAGED	FOREST_PRIMARY	FOREST_PLANTATIONS	SHRUBLAND	GRASSLAND	WETLAND	URBAN	SOLAR	OTHER_LAND
REGIONS_I ↓	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
LATAM	34%	0	12%	44%	0	4%	0	0	0	0	5%

**Tabla 5.39.** Porcentaje de nuevas tierras de pastoreo obtenidas de cada uso de la tierra en LATAM (Fuente: Creación propia)

Se transforman estos porcentajes a las zonas Köppen de la misma forma que se hizo para la expansión de las tierras de cultivo. Los porcentajes finales por zona se muestran en la Tabla 5.40.

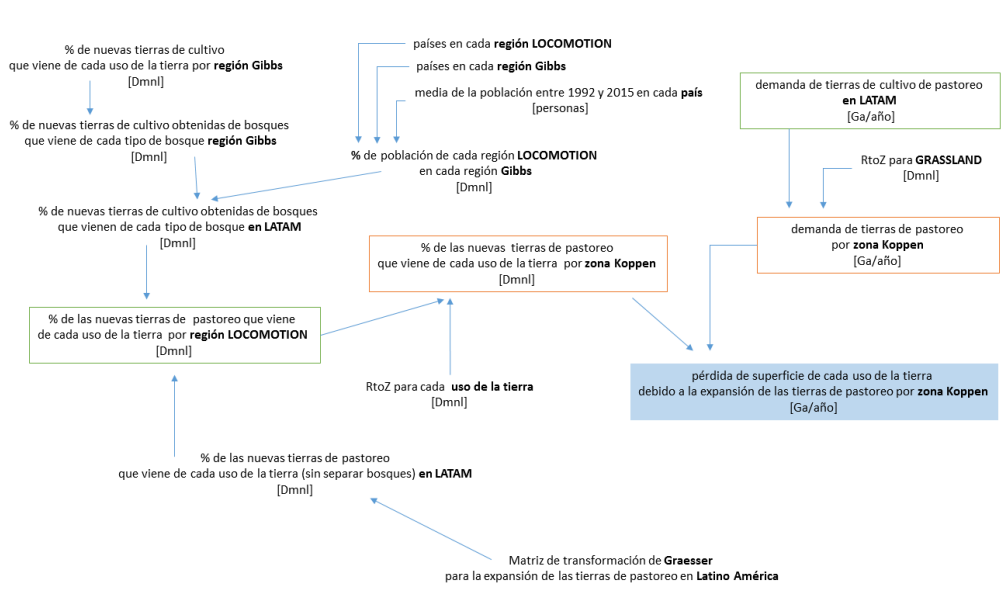
MATRIX: HISTORICAL SHARE OF NEW GRASSLAND FROM OTHER LANDS BY_ZONE (ZONES_I, LANDS_I)											
LANDS_I	RAINFED	IRRIGATED	FOREST_MANAGED	FOREST_PRIMARY	FOREST_PLANTATIONS	SHRUBLAND	GRASSLAND	WETLAND	URBAN	SOLAR	OTHER_LAND
ZONES_I	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
TROPICAL	27,80%	0,00%	15,21%	53,80%	0,00%	2,74%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,45%
WARM	74,56%	0,00%	3,96%	14,02%	0,00%	3,88%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	3,58%
ARID_HOT	52,27%	0,00%	5,64%	19,96%	0,00%	11,21%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	10,92%
ARID_COLD	8,98%	0,00%	0,37%	1,29%	0,00%	12,42%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	76,95%
TEMPERATE	29,98%	0,00%	13,03%	46,09%	0,00%	3,69%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	7,21%
WINTER_SNOW	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
SNOW	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
POLAR	5,47%	0,00%	5,85%	20,71%	0,00%	6,05%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	61,91%

**Tabla 5.40.** Porcentaje de nuevas tierras de pastoreo obtenidas de cada uso de la tierra por zona Köppen (Fuente: Creación propia)

Puede calcularse la pérdida de cada uso de la tierra debido a la expansión de los cultivos en cada zona Köppen con la Ecuación 5.26.

**Ecuación 5.26**  $loss\_due\_to\_grassland[U_k, Z_j] = \%\_new\_grassland\_from\_other\_lands[U_k, Z_j] \cdot demand\_of\_grasslands[Z_j]$

El resumen de este proceso se presenta en la Figura 5.21:



**Figura 5.21.** Resumen del proceso para la obtención de datos sobre los cambios de uso del suelo causados por la expansión de las tierras de pastoreo (Fuente: Creación propia)

### Hipótesis y consideraciones referentes a la expansión de las tierras de pastoreo

- Aunque como puede observarse en la Figura 5.19, el estudio incluye países que no entran dentro de la región LATAM de LOCOMOTION sino que pertenecen a USMCA o LROW, en este proyecto se considera únicamente la demanda de tierras de pastoreo de LATAM para representar de forma clara la tendencia que indica la literatura (Gibbs et al., 2009; FAO, 2016). Además, el 75% de las tierras de pastoreo para las cuales se realiza el estudio se encuentran en LATAM. Esta tendencia se ha comprobado a partir de la evolución histórica de los stocks, que muestra que únicamente en LATAM ha existido, entre 2005 y 2018, un aumento continuado de los pastos.

#### 5.2.2.3.4. Expansión de las plantaciones

Aunque el crecimiento de las plantaciones está claramente establecido y existen estudios que comentan su efecto sobre los bosques naturales (Ghazoul, 2013; Heilmayr, 2014), sobre las tierras de cultivo y otros usos de la tierra (Nahuelhual et al., 2012; Indufor, 2012), no existe, o al menos no ha sido posible encontrar, ningún estudio que cuantifique los cambios de uso de la tierra que han causado históricamente las plantaciones. Esto bien podría ser por su carácter aún reciente pero también debido a que representan porcentaje reducido de los bosques mundiales (Indufor, 2012) y podría considerarse que los cambios que producen son menos significativos. Sin embargo, en este



proyecto se considera importante tener en cuenta las plantaciones como un tipo de bosque individual debido a su previsión de crecimiento (Indufor, 2012), su elevada productividad en comparación con los bosques naturales (Paquette & Messier, 2010) y puesto que sus singulares características hacen que sean estudiadas de forma independiente en el módulo de emisiones y bosques en LOCOMOTION.

Para cuantificar los cambios se toma como referencia la metodología<sup>8</sup> de GLOBIOM (Havlík et al., 2011) que se basa en el estudio de Zomer et al. (Zomer et al., 2008). Este último estudia la cantidad de superficie de cada uso de la tierra que sería adecuada para el establecimiento de plantaciones o forestación en diferentes regiones. El estudio excluye como candidatas las zonas áridas o semiáridas (índice de aridez<sup>9</sup> inferior a 0,65), las zonas elevadas (más de 3.500 m), los masas de agua, áreas urbanas, tundra, tierras de cultivos de regadío (por su alta productividad), bosques y otras tierras inelegibles debido a criterios legales. Los resultados del estudio se muestran en la Figura 5.22, en ellos destaca que, a excepción de en África subsahariana, la tierra de cultivo es el uso de la tierra más adecuado y que, el 46% de la tierra potencial para plantaciones se encuentra en Latino América, lo cual coincide con otras fuentes que reportan la gran superficie de plantaciones en la región (FAO, 2020).

Region	Existing land use type								Total Mha
	Cropland		Mixed shrubland/ grassland		Savanna		Barren/sparsely vegetated		
	Mha	%	Mha	%	Mha	%	Mha	%	
Central America	18	74	3	13	3	13	0	0.1	24
East Asia	59	63	20	21	14	15	0	0.1	93
Sub-Saharan Africa	54	28	8	4	132	68	1	0.4	195
South America	172	52	29	9	132	40	1	0.2	333
South Asia	48	76	3	5	12	18	0	0.1	63
SouthEast Asia	31	76	3	8	6	16	0	0.2	41
Global	364	50	63	9	296	41	2	0.2	749

**Figura 5.22.** Tierra adecuada para plantaciones/forestación por uso de la tierra y región  
(Fuente: Zomer et al., 2008)

GLOBIOM, siguiendo el enfoque y las restricciones de Zomer et al., calcula su propia estimación sobre la superficie de cada uso de la tierra adecuada para el establecimiento de nuevos bosques (Havlík et al., 2011). En concreto encuentra tierra apta en cuatro categorías derivadas del Global Land Cover 2000 Project (GLC 2000), un mapa de la cobertura y vegetación terrestre en el año 2000. Sus resultados se muestran en la Figura 5.23.

<sup>8</sup> Más detalles del procedimiento pueden encontrarse para Zomer et al. (Zomer et al., 2008) y para GLOBIOM (Havlík et al., 2011).

<sup>9</sup>  $aridity\_index = \frac{mean\_annual\_precipitation}{mean\_annual\_evotranspiration}$  (Fuente: Zomer et al., 2008)



Category	GLC classes	Afforestation potential (Mha)
Forest	All forest categories of GLC-2000 including the mosaic forest/natural vegetation	3151
Agriculture/cropland	All managed and cultivated areas including mosaics cultivated managed/natural vegetation, cultivated managed/forest cover	1171
Grassland	Herbaceous cover	299
Other natural vegetation	Shrubland and sparse shrubs/sparse grass	510

Figura 5.23. Superficie de cada uso de la tierra adecuada para forestación (Fuente: Havlík et al., 2011)

Se toman como punto de partida estos valores estimados por GLOBIOM y se considera que el porcentaje de nuevas plantaciones que vendrá de cada uso de la tierra es proporcional a la cantidad de tierra adecuada para plantaciones en cada uso de la tierra (Ecuación 5.27), de tal forma que los porcentajes resultan como se muestra en la Tabla 5.41. En este caso, debido a la escasez de información no se diferencia por zonas o regiones, sino que se consideran porcentajes a nivel global.

$$\text{Ecuación 5.27} \quad \%_{\text{plantation\_from\_other\_lands}}[U_k, Z_j] = \frac{\text{suitable\_land\_for\_plantations}[U_k, Z_j]}{\sum_{k=1}^4 \text{suitable\_land\_for\_plantations}[U_k, Z_j]}$$

MATRIX: HISTORICAL SHARE OF NEW PLANTATIONS FROM OTHER LANDS BY_ZONE (ZONES_I, LANDS_I)											
LANDS_I	RAINFED	IRRIGATED	FOREST_MANAGED	FOREST_PRIMARY	FOREST_PLANTATIONS	SHRUBLAND	GRASSLAND	WETLAND	URBAN	SOLAR	OTHER_LAND
ZONES_I	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
TROPICAL	23.00%	0.00%	61.00%	0.00%	0.00%	10.00%	6.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
WARM	23.00%	0.00%	61.00%	0.00%	0.00%	10.00%	6.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
ARID_HOT	23.00%	0.00%	61.00%	0.00%	0.00%	10.00%	6.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
ARID_COLD	23.00%	0.00%	61.00%	0.00%	0.00%	10.00%	6.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
TEMPERATE	23.00%	0.00%	61.00%	0.00%	0.00%	10.00%	6.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
WINTER_SNOW	23.00%	0.00%	61.00%	0.00%	0.00%	10.00%	6.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
SNOW	23.00%	0.00%	61.00%	0.00%	0.00%	10.00%	6.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
POLAR	23.00%	0.00%	61.00%	0.00%	0.00%	10.00%	6.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%

Tabla 5.41. Porcentaje de nuevas plantaciones que viene de cada uso de la tierra (Fuente: Creación propia)

**Hipótesis y consideraciones referentes a la expansión de las plantaciones:**

- Se toma como referencia la estimación de GLOBIOM en lugar de la Zomer et al. porque se considera importante cuantificar las pérdidas de bosque debido al crecimiento de las plantaciones, un fenómeno claramente establecido en la literatura. También debido a que los usos de la tierra son más coincidentes y la aproximación a realizar es menor y más precisa.
- En este caso no se incluyen límites al crecimiento porque se considera que es interesante considerar estos cuando se requiere un determinado nivel de calidad o productividad de la tierra. Las plantaciones se establecen o se considera que es adecuado que se establezcan (Ghazoul, 2013) en tierras de cultivo que se descartan debido a la sobreexplotación o en áreas forestales degradadas debido a la tala, es decir, de productividad media o baja (Zomer et al., 2008). Se considera que siempre existirá suministro de este tipo de tierras puesto que las



tierras de cultivo seguirán explotándose y los bosques talándose mientras haya demanda de alimentos y demanda de energía (madera, biocombustibles), que existirá mientras haya población que lo demande.

- No se obtiene tierra para plantaciones de los bosques primarios. Dado que las plantaciones se establecen en tierras de boques de menor productividad (Zomer et al., 2008), ya degradadas, se considera que solo pueden situarse en superficie forestal de bosque gestionado, ya que el bosque primario, por definición, no puede haber sido talado y seguir siendo primario. El proceso sería, el bosque primario se tala, se convierte en gestionado, el bosque gestionado se transforma en plantaciones.

#### **5.2.2.3.5. Expansión de la forestación**

Tanto el enfoque de Zomer et al. (Zomer et al., 2008) como el de GLOBIOM (Havlík et al., 2011) consideran la tierra adecuada para plantaciones pero también para forestación y reforestación, por eso motivo se toman como válidos los mismos porcentajes de la Tabla 5.41 para forestación.

#### **Hipótesis y consideraciones referentes a la forestación:**

- No se incluyen límites, en base a las mismas consideraciones que se explicaron para las plantaciones.
- Se considera un 61% de reforestación en los bosques gestionados debido a la tala para extracción de madera y un 39% de forestación.
- Los porcentajes coinciden con las informaciones de otras fuentes de la literatura (Bastin et al., 2019).

#### **5.2.2.3.6. Expansión de la tierra para producción de energía solar**

##### **Cambios de uso de la tierra**

Existen escasos estudios sobre los usos de la tierra que han sido históricamente sustituidos para establecer plantas de producción de energía solar. El estudio más destacado al respecto es el artículo de van de Ven et al. (van de Ven et al., 2021) en el que se presenta, en el material suplementario, para la Unión Europea, India y Japón y Corea del Sur, qué cantidad de la producción de energía solar (MW) del país se genera en cada categoría de cobertura terrestre de ESA CCI-LC. Sin embargo, los datos se refieren únicamente a una pequeña parte de la producción real de energía solar de las regiones (20% para Europa, 14% para India y solo 4% para Japón y Corea del Sur). Además, tampoco se encuentran representados todos los países de Europa solo los nueve para los que se pudo obtener datos. Por estos motivos los autores indican que estos datos no deben ser interpretados como la distribución absoluta de las plantas de energía solar en otros usos de la tierra.



Sin embargo, aunque estos datos no van a emplearse directamente debido a la imposibilidad de hacer a partir de ellos una estimación para todas las regiones, sí van a utilizarse para comprobar si están en línea con las tendencias que indica la literatura. Para ello se agrupan las categorías de ESA-CCI-LC en base a las categorías de WILIAM y se obtienen los resultados de la Tabla 5.42. Existen más datos de los que se pueden obtener del artículo dado que han sido proporcionados por los autores.

% of capacity installed in each land use												
Country	ESP		JAP		EU		South Korea		GBR		India	
Land use	[MW]	[%]	[MW]	[%]	[MW]	[%]	[MW]	[%]	[MW]	[%]	[MW]	[%]
Irrigated cropland	149,70	7%	-	0%	173,20	1%	-	-	-	-	968,40	38%
Rainfed cropland	323,89	16%	906,90	46%	3.337,25	29%	16,00	17%	3.185,30	39%	173,80	7%
Forest	-	0%	282,70	14%	1.724,89	15%	4,00	4%	17,94	0%	5,00	0%
Grassland	-	0%	-	0%	19,58	0%	-	0%	-	-	-	0%
Shrubland	1.039,92	51%	392,10	20%	5.023,81	43%	28,50	30%	4.633,50	57%	969,50	38%
Flooded vegetation	-	0%	-	-	96,50	1%	-	0%	-	0%	-	0%
Water bodies	-	0%	406,80	20%	51,30	0%	25,00	26%	70,68	1%	20,00	1%
Urban land	-	0%	-	0%	522,73	5%	-	0%	187,84	2%	32,00	1%
Desert	519,30	26%	-	0%	622,57	5%	21,10	22%	5,00	0%	360,80	14%
Total capacity installed [MW]	2.032,81		1.988,50		11.571,83		94,60		8.100,26		2.529,50	

**Tabla 5.42.** Porcentaje de la capacidad instalada para producción de energía solar en cada uso de la tierra para cada país (Fuente: Creación propia; van de Ven et al., 2021)

Para los países europeos los datos coinciden con la literatura (Perpiña Castillo et al., 2016), además esto tiene sentido desde el punto de vista económico pues la literatura (Adeh et al., 2019) que las tierras de cultivo son las tierras más productivas para producir energía solar. También coinciden con la tendencia a situarse sobre tierras no productivas, desiertos y tierras de matorrales (Hernandez et al., 2016).

Para cuantificar el porcentaje de nuevas tierras para solar que se han obtenido históricamente de otros usos de la tierra se ha empleado como punto de partida el trabajo realizado por el WP7 del LOCOMOTION (Papagianni, 2020). Este grupo calculó, mediante un enfoque GIS, la superficie potencial existente de cada uso de la tierra para situar plantas fotovoltaicas (PV) sobre ellas. Para calcular dicho potencial se establecieron una serie de criterios de exclusión siguiendo el enfoque de (Dupont et al., 2020). En base a una revisión bibliográfica se excluyen las zonas de nieve y hielo permanente, las zonas urbanas, las masas de agua urbanas y también las zonas de vegetación inundada o humedales, los bosques, las tierras de cultivo de regadío y las zonas protegidas. Además no se incluyen las zonas con una altitud superior a 2.000 m debido a la dificultad de instalar y mantener plantas solares en estas zonas, ni tampoco en zonas con una pendiente del 20% (Papagianni, 2020). El porcentaje de superficie de cada uso de la tierra en el cual sería adecuado situar plantas de producción de energía solar se muestran en la Tabla 5.43.



% of each land use area suitable for solar PV	
Land use	[%]
Rainfed cropland	10%
Irrigated cropland	0%
Forest	0%
Grassland	10%
Shrubland	10%
Sparse vegetation and bare areas	50%
Flooded vegetation	0%
Water bodies, snow and ice	0%
Urban areas	0%

**Tabla 5.43.** Porcentaje de cada uso de la tierra adecuado para situar plantas de producción de energía solar (Fuente: WP7 LOCOMOTION)

De la misma forma que se hizo para las plantaciones se considera que el porcentaje de la nueva tierra para solar que se obtiene de cada uso de la tierra es proporcional a la superficie de tierra adecuada para solar de cada uso de la tierra (Ecuación 5.27). Los porcentajes finales se muestran en la Tabla 5.44.

MATRIX: HISTORICAL_SHARE_OF_NEW_SOLAR_FORM_OTHER_LANDS_BY_REGION (REGIONS_I, LANDS_I)											
LANDS_I	RAINFED	IRRIGATED	FOREST_MANAGED	FOREST_PRIMARY	FOREST_PLANTATIONS	SHRUBLAND	GRASSLAND	WETLAND	URBAN	SOLAR	OTHER_LAND
REGIONS_I	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
EU27	12.50%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	12.50%	12.50%	0.00%	0.00%	0.00%	62.50%
UK	12.50%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	12.50%	12.50%	0.00%	0.00%	0.00%	62.50%
CHINA	12.50%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	12.50%	12.50%	0.00%	0.00%	0.00%	62.50%
EASOC	12.50%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	12.50%	12.50%	0.00%	0.00%	0.00%	62.50%
INDIA	12.50%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	12.50%	12.50%	0.00%	0.00%	0.00%	62.50%
LATAM	12.50%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	12.50%	12.50%	0.00%	0.00%	0.00%	62.50%
RUSSIA	12.50%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	12.50%	12.50%	0.00%	0.00%	0.00%	62.50%
USMCA	12.50%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	12.50%	12.50%	0.00%	0.00%	0.00%	62.50%
LOW	12.50%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	12.50%	12.50%	0.00%	0.00%	0.00%	62.50%

**Tabla 5.44.** Porcentaje de tierra para solar que viene de cada uso de la tierra por región LOCOMOTION (Fuente: Creación propia)

A partir de la Ecuación 5.28 puede calcularse la pérdida de superficie de otros usos de la tierra debido a la expansión de la tierra para solar en cada región. Tal y como se hizo para la expansión urbana se transforma esta pérdida a las zonas Köppen en Vensim con las matrices RtoZ para cada uso de la tierra y la función SUM.

**Ecuación 5.28**

$$loss\_due\_to\_solar[U_k, R_i] = \%\_new\_solar\_from\_other\_lands[U_k, R_i] \cdot demand\_of\_solar[R_i]$$

En cuanto a la superficie urbana disponible para situar en la cubierta de sus edificios paneles fotovoltaicos, se considera como máximo el 2.5% de esta (de Blas Sanz, I. et al., 2018) y se permitirá al usuario que introduzca la tasa de aumento de este porcentaje que desee.

### Límites de la expansión

Como se ha mostrado en la Tabla 5.43 solo un determinado porcentaje de cada uso de la tierra se considera apto para la expansión de las tierras de producción de energía solar. Pues que no se tienen datos a nivel regional se asume que los porcentajes son iguales en cada región LOCOMOTION (Tabla 5.45). Estos porcentajes se consideran por regiones en lugar de zonas Köppen debido a la imposibilidad de transformar la tierra para solar de zona a región.





_MATRIX: LIMITS_OF_SOLAR_EXPANSION_BY_REGION(LANDS_I,REGIONS_I)									
REGIONS_I	EU27	UK	CHINA	EASOC	INDIA	LATAM	RUSSIA	USMCA	LOW
LANDS_I	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
RAINFED	10,00%	10,00%	10,00%	10,00%	10,00%	10,00%	10,00%	10,00%	10,00%
SHRUBLAND	10,00%	10,00%	10,00%	10,00%	10,00%	10,00%	10,00%	10,00%	10,00%
GRASSLAND	10,00%	10,00%	10,00%	10,00%	10,00%	10,00%	10,00%	10,00%	10,00%
OTHER_LAND	50,00%	50,00%	50,00%	50,00%	50,00%	50,00%	50,00%	50,00%	50,00%

**Tabla 5.45.** Límites de la expansión de la tierra para solar por región LOCOMOTION  
(Fuente: Creación propia; WP7)

La tierra de cada uso de la tierra perdida debido a la expansión solar teniendo en cuenta los límites se calcula ahora con las Ecuación 5.29 y Ecuación 5.30.

**Ecuación 5.29**

$$land\_lost[U_k, R_i] = INITIAL\_LAND[U_k, R_i] - land\_for\_U_k[R_i]$$

**Ecuación 5.30**

$$actual\_loss\_due\_to\_solar[U_k, R_i] = loss\_due\_to\_solar[U_k, R_i] \cdot (1 - \frac{land\_lost[U_k, R_i]}{LIMITS\_OF\_SOLAR\_EXPANSION[U_k, R_i] \cdot INITIAL\_LAND[U_k, R_i]})$$

En este caso para calcular la superficie perdida de cada uso de la tierra por zona Köppen no se emplean las matrices RtoZ empleadas en el resto de casos sino que se hace uso de unas matrices de transición adaptadas a la expansión solar. Se estima necesario crear estas matrices para evitar la expansión de las tierras para solar en zonas en las que no tiene sentido debido a la latitud que las caracteriza (POLAR, SNOW). Además, en estas zonas, dado gran cantidad de hielo permanente, existe también gran superficie de “otras tierras” lo que el modelo podría interpretar como gran capacidad de expansión de tierra para solar sin ser esto cierto. También se estima que, aunque en las zonas ARID\_COLD y WINTER\_SNOW la expansión es posible el potencial o la probabilidad de esta expansión es inferior que en el resto de zonas (TROPICAL, WARM, ARID\_HOT, TEMPERATE).

Se calculan estas matrices para los cuatro usos de la tierra que pueden convertirse en tierra para solar (tierras de matorrales, de pastoreo, de cultivo y otras tierras) mediante el procedimiento que se describe a continuación. En primer lugar, en las matrices RtoZ de cada uno de estos cuatro usos de la tierra se suma el porcentaje de superficie de cada región que se encuentra en las zonas POLAR y SNOW. A continuación se suman los porcentajes de superficie de TROPICAL, WARM, ARID\_HOT y ARID\_COLD y se calcula el porcentaje que representa cada uno de ellos respecto de esa suma total. Este porcentaje se multiplica por la suma del porcentaje superficie de la región que se encuentra en POLAR y SNOW y se suma al porcentaje de esa zona en la región. El resultado es una matriz en la que no existe superficie en SNOW y POLAR, en la que el porcentaje de superficie de cada región en WINTER\_SNOW y ARID\_COLD no ha aumentado, para representar la menor probabilidad de expansión en estas zonas, y en la que existe un mayor porcentaje de la región en el resto de zonas.



Se trabaja con estas matrices como si fueran matrices RtoZ normales. Se presenta como ejemplo la para las tierras de cultivo de regadío (Tabla 5.46) que puede compararse con la original de la Tabla 5.16. El resto se encuentran en las Tabla A2.23 a Tabla A2.26.

RtoZ for solar expansion RAINFED								
REGIONS_I   ZONES_I	TROPICAL	WARM	ARID_HOT	ARID_COLD	TEMPERATE	WINTER_SNOW	SNOW	POLAR
EU27	0,000	0,280	0,000	0,025	0,622	0,073	0,000	0,000
UK	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000	0,000
CHINA	0,341	0,158	0,000	0,113	0,001	0,387	0,000	0,000
EASDC	0,530	0,191	0,058	0,135	0,030	0,056	0,000	0,000
INDIA	0,565	0,052	0,379	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000
LATAM	0,588	0,311	0,054	0,010	0,038	0,000	0,000	0,000
RUSSIA	0,000	0,123	0,000	0,011	0,014	0,846	0,000	0,000
USMCA	0,066	0,220	0,040	0,143	0,006	0,524	0,000	0,000
LRDW	0,397	0,110	0,258	0,043	0,041	0,152	0,000	0,000

**Tabla 5.46.** Matriz RtoZ en el caso de la expansión de tierra para solar para las tierras de cultivo de secano (Fuente: Creación propia)

### Hipótesis y consideraciones referentes a la expansión de tierra para producir solar:

- Las centrales termosolares (CSP) son una solución menos universal que las fotovoltaicas (PV), ya que únicamente utilizan la irradiación directa (PV también utiliza la difusa), requieren niveles más altos de irradiación para ser económicamente óptimos (+50%) y se adaptan peor a las irregularidades del terreno (Capellán-Pérez et al., 2017), es más, necesitan situarse en superficies relativamente planas de menos de 3% de inclinación (PV puede hasta 20%), lo que reduce enormemente sus posibilidades de establecimiento (Papagianni, 2020). En este proyecto no se incluyen estudio las plantas CSP, por su menor potencial pero especialmente, debido a la dificultad para encontrar datos para la energía solar, en general, pero aún mayor para las soluciones menos universales.
- Aunque puede producirse energía solar en la superficie urbana no se considera pérdida de tierras urbanas debido a la expansión de la tierra para producción de energía solar puesto que, al colocarse los paneles sobre el tejado de los edificios de las ciudades, no existe competencia por la tierra.
- Aunque en este caso también es habitual situar las plantas solares en tierras de cultivo o pastoreo de baja productividad, degradadas (Papagianni, 2020) en este caso sí se incorporar límites a la expansión puesto que no cualquier tierra es apta para el establecimiento de paneles solares, existen importantes restricciones referentes a la irradiación solar, la latitud o la inclinación, entre otras (Perpiña Castillo et al., 2016), que si no son tenidas en cuenta reducen en gran medida la eficiencia energética.
- Se considera imposible la expansión de tierra para solar en zonas de muy alta latitud (POLAR y SNOW) y menos probable en zonas de alta

latitud (WINTER\_SNOW y ARID\_COLD). Para esto se calculan unas nuevas matrices RtoZ adaptadas. Se descarta establecer como límite de pérdida del stock de otras tierras el porcentaje de la superficie de este que es hielo puesto que la problemática es la misma, al tener los datos por regiones y calcularlos por zonas con las matrices RtoZ aparecen resultados que no resultan lógicos. Por ejemplo, Groenlandia se encuentra agrupada dentro de LROW y prácticamente la totalidad de su superficie es hielo y se encuentra en la zona POLAR sin embargo, por las heterogeneidad de LROW, que se refleja en su matriz, ese hielo acabará distribuido entre todas las zonas.

### 5.2.2.3.7. Pérdida de tierras de regadío

La superficie de tierras de regadío disminuirá únicamente si lo hace el agua disponible para riego (sección 5.2.2.3.7), cuando esto suceda la totalidad de las tierras perdidas se transformará en tierras de regadío a excepción de en las zonas áridas (ARID\_HOT y ARID\_COLD) en las cuales se considera que la agricultura de regadío no es viable (United Nations, 2016) y por tanto se considera la posibilidad de desertización (Tabla 5.47).

_MATRIX: SHARE_OF_LOSS_OF_IRRIGATED_TO_OTHER_LANDS_BY_ZONE (ZONES_I LANDS_I)												
LANDS_I	RAINFED	IRRIGATED	FOREST_MANAGED	FOREST_PRIMARY	FOREST_PLANTATIONS	SHRUBLAND	GRASSLAND	WETLAND	URBAN	SOLAR	OTHER_LAND	
ZONES_I	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	
TROPICAL	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
WARM	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
ARID_HOT	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	
ARID_COLD	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	
TEMPERATE	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
WINTER_SNOW	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
SNOW	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
POLAR	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	

Tabla 5.47. Porcentaje de la superficie de tierras de regadío que va a otros usos de la tierra por zona Köppen (Fuente: Creación propia)

### Hipótesis y consideraciones referentes a la pérdida de tierras de cultivo de regadío

- Se adopta una simplificación de las transiciones en base a los informes de las Naciones Unidas (United Nations, 2016).

### 5.2.2.4. Impulsores de los cambios

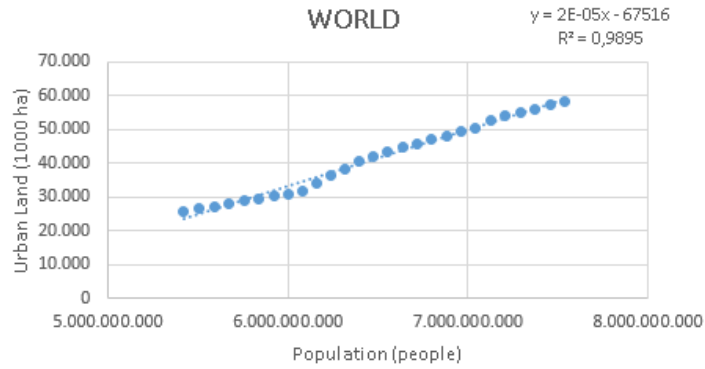
En este apartado se estudian los impulsores de los procesos que se han descrito en la sección anterior. Es decir, esta sección detalla las variables que generan la demanda de los usos de la tierra y que en definitiva, provocan los cambios de uso de la tierra.

#### 5.2.2.4.1. Población

En la literatura la expansión urbana aparece estrechamente ligada al crecimiento de la población (Marshall, 2007) y a los patrones de urbanización (Oakes, 2020).

Se busca encontrar la relación histórica entre el crecimiento de la superficie urbana (datos de FAO) y la población (datos de World Bank Data) para cada

región LOCOMOTION. En todos los casos se encuentra una relación En la Figura 5.24 se muestra la gráfica de la relación entre la superficie urbana y la población mundial. En todas la regiones LOCOMOTION se obtiene una relación relativamente lineal y, a excepción de en RUSSIA, de crecimiento proporcional. En la Tabla 5.48 se muestran los parámetros de estas relaciones, donde  $r$  es el coeficiente de correlación,  $r^2$  el coeficiente de determinación y  $b$  la pendiente.



**Figura 5.24.** Relación entre la superficie urbana y la población, mundial  
(Fuente: Creación propia)

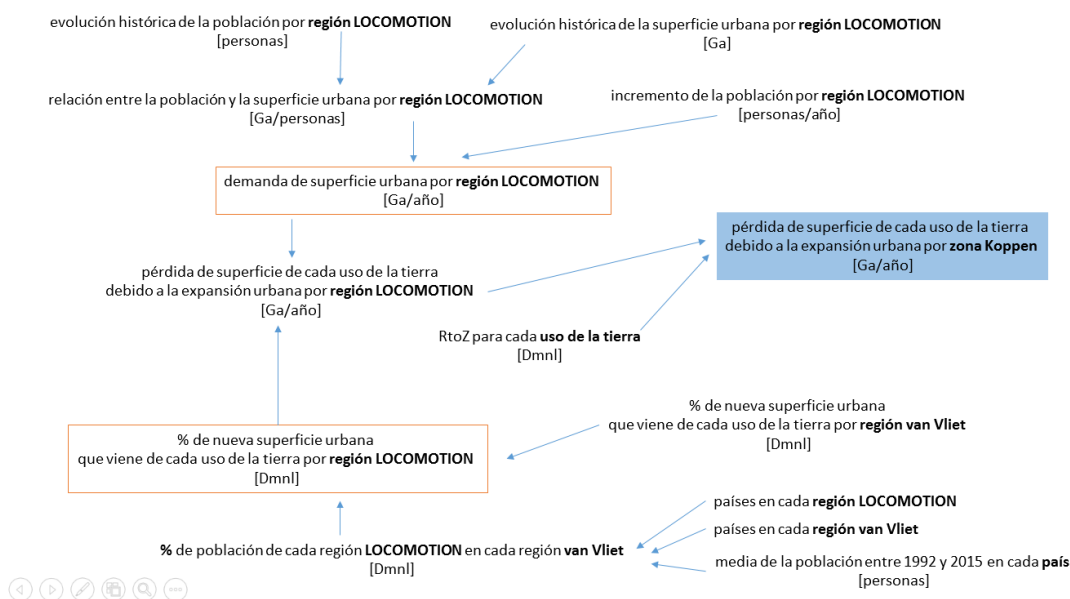
RELATION URBAN LAND AND POPULATION BY REGION										
REGIONS_I	EU27	UK	CHINA	EASOC	INDIA	LATAM	RUSSIA	USMCA	LR0W	WORLD
$r$	0,963	0,826	0,947	0,982	0,977	0,992	-0,909	0,999	0,995	0,995
$r^2$	0,927	0,682	0,897	0,965	0,955	0,984	0,827	0,997	0,989	0,990
$b$	2,13585E-06	3,56766E-07	3,6911E-07	1,4725E-07	3,8151E-08	1,6318E-07	-1,746E-06	5,0535E-07	7,7779E-08	1,6822E-07

**Tabla 5.48.** Parámetros de la relación entre la tierra urbana y la población por regiones  
(Fuente: Creación propia)

Gracias a esta relación puede calcularse la demanda anual de superficie urbana según la Ecuación 5.31, donde  $b$  es la pendiente.

$$\text{Ecuación 5.31 } demand\_of\_urban[R_i] = b[R_i] \cdot increase\_of\_population[R_i]$$

Se muestra el resumen del proceso de la expansión urbana y sus cambios asociados en la Figura 5.25.



**Figura 5.25.** Resumen del proceso para la obtención de datos sobre los cambios de uso del suelo causados por la expansión urbana (Fuente: Creación propia)

**Hipótesis y consideraciones:**

- Aunque en algunas ocasiones el crecimiento urbano aparece también relacionado con el PIB (Marshall, 2007) y puesto que la tierra urbana incluye superficies industriales, se ha estudiado su relación con el porcentaje del PIB en la industria. No se han encontrado resultados concluyentes debido a los complicados patrones de industrialización, que se encuentran fuera del alcance de este proyecto. Es por esto que se toma como hipótesis el rechazo de la relación entre la expansión urbana y el PIB.
- En el caso de la expansión urbana no se lleva a cabo calibración para ajustar el parámetro de relación entre superficie urbana y población puesto que se considera que los errores existentes se deben a las tendencias de urbanización de las regiones. Estas diferencias no introducen errores significativos en los resultados del modelo dado que la superficie urbana no es demasiado grande.
- Se considera que la demanda de superficie urbana tiene prioridad por lo que en este caso toda la demanda de superficie urbana se traduce en incremento de la superficie de cada región, sin incluir límites de crecimiento.



#### 5.2.2.4.2. Tierras de cultivo y tierras de pastoreo

No se incluye en el modelo ningún impulsor ni de la demanda de las tierras de cultivo ni de las de pastoreo, sino que esta demanda es una variable exógena del modelo que dependerá de los escenarios o políticas. La demanda de estas tierras depende de varios factores, competencia de diferentes módulos de LOCOMOTION, como la evolución de las dietas, el PIB, la población, el rendimiento de los cultivos, la demanda de biocombustibles o la inversión en los mismos, además del carácter global del mercado de alimentos. El número de variable, así como la incertidumbre en la interrelación de las mismas, dificulta realizar una simplificación en este caso, por ese motivo se toma la decisión de introducir la demanda de forma exógena en base a escenarios definidos a partir de todas estas variables.

##### Tierras de cultivo de secano

Al existir límites de expansión para las tierras de cultivo de secano el aumento de estas no se considera igual a la demanda, sino que se considera igual a la suma de la pérdida de todos los usos de la tierra debido a la expansión de las tierras de cultivo de secano en esa zona climática (Ecuación 5.32).

Ecuación 5.32

$$increase\_of\_rainfed[Z_j] = \sum_{k=1}^{11} actual\_loss\_due\_to\_rainfed[U_k, Z_j]$$

##### **Tierras de cultivo de regadío**

En este caso su incremento dependerá de la disponibilidad de agua, que se detalla en la sección 5.2.2.4.6.

#### 5.2.2.4.3. Demanda de madera

Se considera la demanda de madera como el impulsor de la necesidad de tierra para plantaciones así como de parte de la pérdida de bosques primarios (Potapov et al., 2017), en concreto de la transformación de bosque primario en bosque gestionado. A partir de los datos de FAOSTAT puede obtenerse la demanda de productos forestales, madera en rollo (*industrial roundwood*) y leña (*wood fuel*), por años en cada país obtenida a partir de árboles coníferas y no coníferas. Los datos históricos de esta demanda, agrupados por regiones, fueron proporcionados por el grupo de trabajo de bosque y emisiones de LOCOMOTION.

##### Plantaciones

Históricamente, aproximadamente el 15% de la producción de madera se ha obtenido de las plantaciones (Gaveau et al., 2016). Considerando esto puede calcularse la producción de madera obtenida de las plantaciones en cada región cada año (Ecuación 5.33) entre 2005 y 2018.



**Ecuación 5.33**  $production\_of\_wood\_from\_plantations[R_i] =$

$$\%\_of\_wood\_production\_from\_plantations[R_i] \cdot production\_of\_wood[R_i]$$

Transformando estos datos a las zonas Köppen, mediante la matriz RtoZ de los bosques, que debido a cómo fue calculada coincide para todos los tipos de bosques, y, puesto que se conoce la superficie anual de plantaciones por zona Köppen, puede conocerse la eficiencia (m³/Ga) de las plantaciones en cada zona cada año (Tabla 5.49) (Ecuación 5.34). Esta eficiencia es varía anualmente, ya que depende de todos los factores que afectan la productividad de las plantaciones. En WILIAM esto será calculado endógenamente por otros sub-módulos, sin embargo, en este proyecto debido a la dificultad de este cálculo, se adopta como eficiencia estimada la media aritmética de la eficiencia de las plantaciones entre 2005 y 2018, se presenta esta en la Tabla 5.50

**Ecuación 5.34**

$$forest\_plantations\_efficiency_{z_j} = \frac{production\_of\_wood\_from\_plantations_{z_j}}{forest\_plantations\_land_{z_j}}$$

HISTORICAL_FOREST_PLANTATIONS_EFFICIENCY_BY_ZONE(ZONES_I)														
Year	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
ZONES_I	[m³/Ga]	[m³/Ga]	[m³/Ga]	[m³/Ga]	[m³/Ga]	[m³/Ga]	[m³/Ga]	[m³/Ga]	[m³/Ga]	[m³/Ga]	[m³/Ga]	[m³/Ga]	[m³/Ga]	[m³/Ga]
TROPICAL	574.809	561.862	554.618	545.053	528.806	528.187	526.863	528.956	525.280	520.054	509.435	509.452	506.109	507.227
WARM	357.952	342.152	334.646	318.899	300.766	317.332	318.448	313.230	315.506	311.955	304.483	312.252	310.080	318.906
ARID_HOT	820.254	799.975	780.349	758.018	726.563	729.509	723.965	727.203	724.780	722.420	714.217	713.711	709.859	712.158
ARID_COLD	490.377	465.570	442.517	412.321	374.773	396.512	400.839	393.081	398.160	395.245	388.070	396.695	395.938	402.695
TEMPERATE	1.009.220	947.468	983.184	909.725	834.964	891.047	890.693	878.001	879.525	883.444	872.441	880.681	879.607	913.727
WINTER_SNOW	457.176	437.748	430.296	396.627	369.293	396.147	400.020	393.342	396.647	395.349	388.896	400.420	397.455	413.691
SNOW	880.624	843.009	828.465	720.316	653.290	713.059	728.554	717.112	722.429	727.499	722.844	748.823	742.824	783.902
POLAR	517.674	500.426	491.541	444.713	417.296	443.507	451.428	445.868	446.843	445.017	437.199	450.779	445.853	464.779

**Tabla 5.49.** Eficiencia histórica anual de las plantaciones por zona Köppen (Fuente: Creación propia)

ESTIMATED_FOREST_PLANTATIONS_EFFICIENCY_BY_ZONE(ZONES_I)	
ZONES_I	[m³/Ga]
TROPICAL	530.479
WARM	319.758
ARID_HOT	740.213
ARID_COLD	410.914
TEMPERATE	903.838
WINTER_SNOW	405.222
SNOW	752.339
POLAR	457.352

**Tabla 5.50.** Eficiencia estimada de las plantaciones por zona Köppen (Fuente: Creación propia)

Gracias a esta eficiencia se calcula la tierra para plantaciones necesaria para cubrir la demanda de madera cada año (Ecuación 5.35).

**Ecuación 5.35**  $needed\_plantations\_land[Z_j] =$

$$\frac{1}{(plantations\_efficiency[Z_j])} \cdot production\_of\_wood\_from\_plantations[Z_j]$$



Sin embargo, dado que las plantaciones son capaces de producir la misma cantidad de madera cada año, es necesario comparar la superficie de plantaciones necesaria con la existente en año anterior para conocer la demanda real de tierra para plantaciones cada año (Ecuación 5.36).

$$\text{Ecuación 5.36} \quad \text{demand\_of\_plantations\_land}[Z_j] = \text{needed\_plantations\_land}[Z_j] - \text{plantations\_land\_previous\_year}[Z_j]$$

### Bosques primarios

Puesto que el 15% de la producción de madera mundial se obtiene de las plantaciones, que representan menos del 5% de la superficie forestal (Gaveau et al., 2016), podría considerarse que estas son incluso tres veces más productivas que los bosques naturales. Lo que respalda la literatura que indica que las plantaciones son más productivas que los bosques naturales (Heilmayr, 2014), por lo tanto se considera que la eficiencia de los bosques naturales es tres veces inferior (Tabla 5.51) .

FOREST_NATURAL_EFFICIENCY_BY_ZONE(ZONES_I)	
ZONES_I	[m <sup>3</sup> /Ga]
TROPICAL	176.826
WARM	106.586
ARID_HOT	246.738
ARID_COLD	136.971
TEMPERATE	301.279
WINTER_SNOW	135.074
SNOW	250.780
POLAR	152.451

**Tabla 5.51.** Eficiencia estimada de los bosques naturales por zona Köppen (Fuente: Creación propia)

Aunque existen estudios que indican que parte de los bosques primarios se pierden a causa de la tala indiscriminada (Potapov et al., 2017), no se cuantifica el porcentaje de la demanda de madera que han cubierto históricamente. Hasta este punto, en el modelo, los bosques primarios se pierden debido a la expansión de las tierras de cultivo y las tierras de pastoreo. Para cuantificar qué porcentaje de la producción de madera se ha obtenido de los bosques primarios se calcula la cantidad de bosque primario que se ha transformado en bosque gestionado. Para ello se calcula la cantidad de bosques primarios que no se ha perdido ni por expansión de tierras de cultivo ni de pastoreo a partir de la comparación de los datos obtenidos al simular el modelo y los datos históricos de evolución de los bosques primarios.

Para cada año se multiplica la diferencia entre las series de datos por la eficiencia de los bosques naturales y se calcula la cantidad madera obtenida gracias a esa superficie cada año. Como se conoce la demanda total de madera de cada año se calcula el porcentaje de la demanda total de madera que se ha obtenido a partir del bosque primario en esa zona Köppen (Ecuación 5.37). La



demanda de madera por zona Köppen se ha calculado con las matrices RtoZ para bosques.

**Ecuación 5.37**

$$\%_{wood\_demand\_from\_primary}[Z_j] = \frac{(primary\_forest_{HISTORIC}[Z_j] - primary\_forest_{MODEL}[Z_j]) \cdot \frac{1}{forest\_natural\_efficiency}[Z_j]}{demand\_of\_wood}[Z_j]}$$

El valor definitivo se toma como la media de los porcentajes entre 2005 y 2018 (Tabla 5.52).

% OF WOOD FROM FOREST PRIMARY	
ZONES_I	[%]
TROPICAL	0,54%
WARM	0,03%
ARID_HOT	0,45%
ARID_COLD	0,08%
TEMPERATE	0,53%
WINTER_SNOW	0,06%
SNOW	0,24%
POLAR	0,01%

**Tabla 5.52.** Porcentaje de la demanda de madera que se extrae de los bosques primarios por zona Köppen (Fuente: Creación propia)

Para obtener estos porcentajes con una mayor precisión se lleva a cabo su ajuste con la herramienta de optimización de Vensim. Los porcentajes definitivos se presentan en la Tabla 5.53.

% OF WOOD FROM FOREST PRIMARY (OPTIMIZED)	
ZONES_I	[%]
TROPICAL	0,056%
WARM	0,027%
ARID_HOT	0,074%
ARID_COLD	0,000%
TEMPERATE	0,033%
WINTER_SNOW	0,000%
SNOW	0,030%
POLAR	0,008%

**Tabla 5.53.** Porcentajes ajustados de demanda de madera que se extrae de los bosques primarios por zona Köppen (Fuente: Creación propia).

La cantidad de superficie de bosque primario que se transforma en bosque gestionado cada año, puede calcularse ahora para cada zona con la Ecuación 5.38.

**Ecuación 5.38**

$$primary\_to\_managed[Z_j] = \frac{\%_{of\_wood\_production\_from\_primary}[Z_j] \cdot demand\_of\_wood[Z_j]}{forest\_natural\_efficiency[Z_j]}$$

**Hipótesis adoptadas:**

- Las plantaciones son más productivas que los bosques naturales (Heilmayr, 2014).



- Aunque se considera que la demanda de madera causa pérdidas de bosque primario, en realidad la madera no se extrae del bosque primario, puesto que por la definición de bosque primario resulta imposible. Lo que causa es la transformación de bosque primario en bosque gestionado.
- No se tiene en cuenta el tiempo de maduración de las plantaciones. Dado que se estudian los usos de la tierra solo se considera como relevante la cobertura de la tierra. El efecto de estas variables en el estado de los bosques corresponde al modelado del sub-módulo de bosques de LOCOMOTION.
- De acuerdo con lo que indica FAO (FAO, 2016) se considera que la tala indiscriminada no conlleva necesariamente un cambio de uso del suelo, sino que simplemente deja una superficie forestal (de bosque gestionado) más degradada. Esta superficie es favorable para la reforestación.

#### 5.2.2.4.4. Políticas de forestación

La tierra demandada para forestación será una variable exógena.

#### 5.2.2.4.5. Demanda de energía solar

El procedimiento que se sigue para calcular la demanda de tierra solar es el mismo que se siguió para calcular la tierra destinada a la producción de energía solar cada año entre 2005 y 2018. La única diferencia es que se introduce la posibilidad de incorporar, a partir políticas, el porcentaje de superficie urbana cubierta por paneles solares para la producción de energía solar, siempre dentro del límite de 2,5% establecido por el WP7. Por lo tanto, ahora para calcular la tierra para solar necesaria en cada región para cubrir la demanda de energía solar debe restarse tierra a esta demanda la energía producida en los tejados de la superficie urbana, la cual se verá más adelante (Ecuación 5.39). La tierra para solar demanda cada año será la tierra necesaria para cubrir la demanda menos la tierra existente el año anterior en la región (Ecuación 5.40).

Ecuación 5.39

$$\begin{aligned} \text{needed\_solar\_land}[R_i] = \\ (\text{demand\_solar\_energy}[R_i] - \text{rooftop\_solar\_energy\_production}[R_i]) \\ \cdot \text{solar\_land\_efficiency}[R_i] \end{aligned}$$

Ecuación 5.40

$$\begin{aligned} \text{demand\_of\_solar\_land}[R_i] \\ = \text{solar\_land\_needed}[R_i] \cdot \text{solar\_land\_previous\_year}[R_i] \end{aligned}$$

Puesto que se han incorporado límites a la expansión solar el incremento no tiene por qué ser igual a la demanda sino que será la suma de lo que puedan

perder los otros usos de la tierra, si no se ha alcanzado el límite será igual a la demanda pero será inferior si lo ha alcanzado (Ecuación 5.41).

**Ecuación 5.41**

$$increase\_of\_solar[R_i] = \sum_{k=1}^{11} actual\_loss\_due\_to\_solar[U_k, R_i]$$

La producción de la energía solar en los dejados se calcula como, la superficie de tierra urbana cubierta por paneles solares, limitada mediante un IF THEN ELSE a 2.5%, por el factor de eficiencia de la tierra para solar y, multiplicada también por un factor de eficiencia de los paneles solares situados en los tejados (Ecuación 5.42). Este factor 0.5 y fue obtenido del estudio de (Capellán-Pérez et al., 2017) que realizaron una comparación entre la eficiencia de aquellos países en los que la mayor parte de la producción solar proviene de superficies urbanas y de aquellos en los que viene de plantas situadas en superficies terrestres.

**Ecuación 5.42**

$$\begin{aligned} production\_of\_solar\_energy\_rooftop[R_i] \\ = \%\_of\_urban\_covered\_by\_rooftop\_PV[R_i] \\ \cdot efficiency\_of\_solar\_land[R_i] \\ \cdot productivity\_rooftop\_PV[R_i] \end{aligned}$$

#### 5.2.2.4.6. Disponibilidad de agua

En WILIAM la disponibilidad de agua así como la forma en que esta afecta a las tierras de regadío será modelada por el sub-módulo de agua, sin embargo, en este proyecto, para representar este fenómeno, se introduce una representación simplificada del mismo.

La literatura indica no solo que el potencial para la expansión de la agricultura de regadío es muy escaso a excepción de Rusia, África subsahariana y Latino América (United Nations, 2016) sino que también hace referencia a la sobreexplotación actual de los recursos hídricos y la creciente escasez de agua (United Nations, 2016; Pastor, n.d.).

Para representar todo esto se incluye un indicador del “estés hídrico” (*water stress*) existente en cada región. En el modelo, una vez este indicador alcanza 1 se prohíbe la expansión, tal como se muestra en la Ecuación 5.43 y Ecuación 5.44.

**Ecuación 5.43**

$$possible\_irrigated\_demand[R_i] = \begin{cases} demand\_of\_irrigated[R_i] & \text{if } water\_stress\_indicator[R_i] < 1 \\ 0 & \text{if } water\_stress\_indicator[R_i] \geq 1 \end{cases}$$

**Ecuación 5.44**

$$rainfed\_to\_irrigated[R_i] = possible\_irrigated\_demand[R_i]$$

Si este factor continúa aumentando significa que la escasez de agua está aumentando, es decir, la disponibilidad de agua para riego está disminuyendo. Se considera que disminuir el agua disponible para riego en la superficie de este tipo de tierras debe disminuir y que esta disminución es proporcional al aumento de la escasez de agua (Ecuación 5.45).

**Ecuación 5.45**

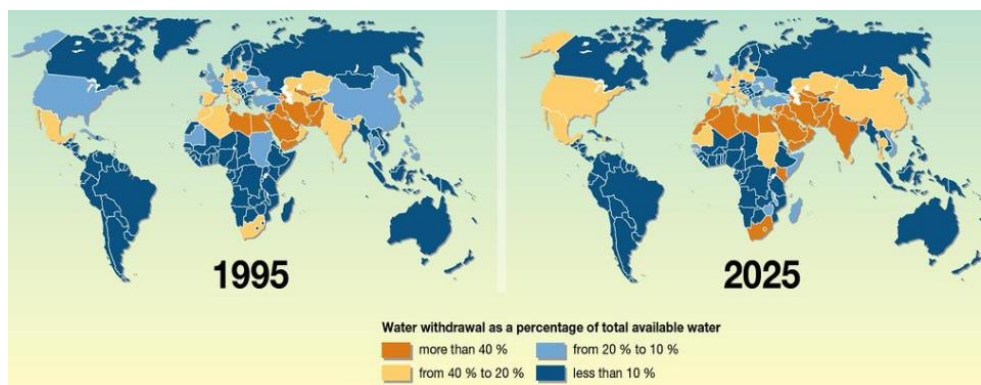
$$loss\_of\_irrigated[R_j] = \begin{cases} 0 & \text{if } water\_stress\_indicator[R_i] < 1 \\ \Delta water\_stress\_indicator[R_i] \cdot land\_for\_irrigated[R_i] & \text{if } water\_stress\_indicator[R_i] \geq 1 \end{cases}$$

para  $\Delta water\_stress\_indicator[R_i] =$

$$(water\_stress\_indicator[R_i] - water\_stress\_indicator\_previous\_year[R_i])$$

En este caso el proceso se hace por regiones en lugar de por zonas debido a los datos encontrados sobre la capacidad de agua en cada región y la dificultad de adaptar el índice de escasez de agua de regiones a zonas. Para todas las regiones excepto RUSSIA, LROW y LATAM el indicador comienza en el máximo, es decir no se permite la expansión. Si se hiciese la distribución directamente por zonas, al tratar de obtener los datos por regiones con las matrices de transición la expansión de las tierras de agricultura se repartiría entre todas las regiones sin tener en cuenta aquellas en la que se ha superado el máximo de explotación de los recursos hídricos.

El valor inicial del factor de escasez de agua se elige de acuerdo con el estudio de (Rekacewicz, 2009) que presenta los mapas de la Figura 5.26.



**Figura 5.26.** Estrés de los recursos hídricos por país  
(Fuente: Rekacewicz, 2009)

Se considera que Rusia y Latinoamérica son las dos regiones con menor estrés hídrico, en LROW se adopta un punto medio la dada la diferencia entre el elevado potencial de expansión de África subsahariana pero el alto estrés en el Norte de África. El factor de Europa es más alto que el de China para representar que su estrés hídrico ha sido más prolongado y, el de USMCA es inferior para reflejar la diferencia entre Canadá, México y Estados Unidos. Para India se considera que se ha alcanzado el máximo. Se presentan estos valores en la Tabla 5.54.

INITIAL_WATER_STRESS_BY_REGION(REGIONS_I)	
REGIONS_I	[Dmnl]
EU27	0,95
UK	0,9
CHINA	0,9
EASOC	1
INDIA	1
LATAM	0,5
RUSSIA	0,5
USMCA	0,85
LROW	0,75

**Tabla 5.54.** Valor del parámetro que representa la escasez de agua en 2018  
(Fuente creación propia)

### 5.2.2.5. Escenarios y políticas

En este apartado primeramente se definen los escenarios y políticas diseñados y, a continuación, se describe como se obtienen los datos necesarios para incorporar dichos escenarios y políticas en el modelo.

#### 5.2.2.5.1. Definición

Se van a diseñar tres posibles escenarios inspirados en las Trayectorias socioeconómicas Compartidas (SSP). Los SSP son narrativas que describen desarrollos socioeconómicos alternativos que pueden combinarse con varios IAMs, para explorar posibles caminos futuros tanto en lo que respecta a las variables socioeconómicas como climáticas. No se emplean los SSP sino que se diseñan tres escenarios en base a la narrativa y las líneas que estos definen (Riahi et al., 2017).

#### Escenario 1 (SP1)

Es un escenario caracterizado por la sostenibilidad. El mundo cambia gradualmente, pero de manera generalizada, evolucionando a un sistema más sostenible, que trate de respetar los límites ambientales (Riahi et al., 2017). En lo que respecta a la población esta sigue aumentando en todas las regiones pero de forma más moderada con respecto a la actualidad. Se caracteriza principalmente por una reducción en la demanda de energía. La demanda de energía solar aumenta, pues se evoluciona hacia un incremento en el uso de energías renovables, sin embargo, el global de electricidad es menor. Por otra parte se asume un cambio de dietas y una disminución del desperdicio alimenticio, sin embargo, la demanda de biocombustibles aumenta por esta evolución hacia las energías renovables que se comentaba, aunque, dado que la demanda de energía será menor, esta demanda de biocombustibles no es exagerada. Por lo tanto, la demanda de tierras de cultivo aumenta por el aumento de población, a pesar del cambio de dietas, y debido a los biocombustibles, pero de manera suave. Debido al cambio de dietas se reduce la demanda de carne y por tanto la demanda de tierras de pastoreo. Respecto a la demanda de madera se produce el mismo fenómeno que para las otras



fuentes de energía, aumento de la demanda moderado debido a la menor demanda de energía. También se introducen políticas de reforestación más intensas que las existentes en la actualidad. Debido a todo este camino hacia la sostenibilidad se estima que el aumento de la escasez de agua será menor que bajo otros escenarios aunque aún existente.

#### Escenario 2 (SP2)

Se caracteriza por la continuación de las tendencias actuales y por encontrarse en el punto medio entre los escenarios SP1 y SP3.

#### Escenario 3 (SP3)

Está caracterizado por una transición hacia las renovables pero sin considerar los límites planetarios. La población aumenta a un ritmo superior que el de las tendencias actuales. Como se ha comentado, se produce una evolución hacia el uso de energías renovables pero acompañada de un aumento de la demanda de energía, impulsado también por el aumento de la población. Esto se traduce, evidentemente, en un aumento de la demanda de madera así como un aumento de la demanda de energía solar. Por otra parte no se considera cambio de dietas y, además, aumenta la demanda de biocombustible por la mencionada transición hacia las renovables, por lo tanto la demanda de tierras de cultivo será elevada. La demanda de tierras de pastoreo también aumenta pues la población aumenta y las dietas no varían. Las políticas de forestación, aunque existen no son muy intensas puesto que este escenario se centra en las tierras productivas. Se estima que toda esta tendencia afectará negativamente a la disponibilidad de agua, motivo por la tasa de aumento del factor de escasez de agua es más elevada que en la actualidad.

Además de elegir uno de los siguientes escenarios el usuario puede variar los siguientes parámetros:

#### Protección de los bosques primarios

El usuario puede decidir adoptar la protección de los bosques primarios por zona climática. Esto se traduce en la eliminación de la extracción de madera de los bosques primarios (transformación primario a gestionado) y la eliminación de la pérdida de bosque primario debido a la expansión de la agricultura o la ganadería, bajo este supuesto toda la demanda de superficie forestal debido a estos fenómenos se extrae de los bosques gestionados.

#### Selección del año en que se desea alcanzar el máximo de cobertura por paneles solares en los tejados de la superficie urbana

En cada región puede establecerse dicho año de tal forma que la energía solar producida en superficie urbana aumentará en base a ese porcentaje definido por el usuario.

#### Selección del porcentaje de la demanda madera que se desea que provenga de las plantaciones en 2050

En cada región puede definirse qué porcentaje, de tal manera que la demanda de plantaciones aumentará en función no solo de la demanda de madera sino también del porcentaje de la misma que deban cumplir las plantaciones. En este caso no se establece un máximo sino que se deja a libre elección del usuario el porcentaje a elegir.

#### Selección del porcentaje máximo de la demanda de electricidad que puede cubrir la energía solar y el año en que se desea que se alcance ese porcentaje

En cada región pueden decidirse estos parámetros para decidir la tasa de aumento de demanda de energía solar y por consiguiente de la demanda de tierra para solar.

### **5.2.2.5.2. Implementación**

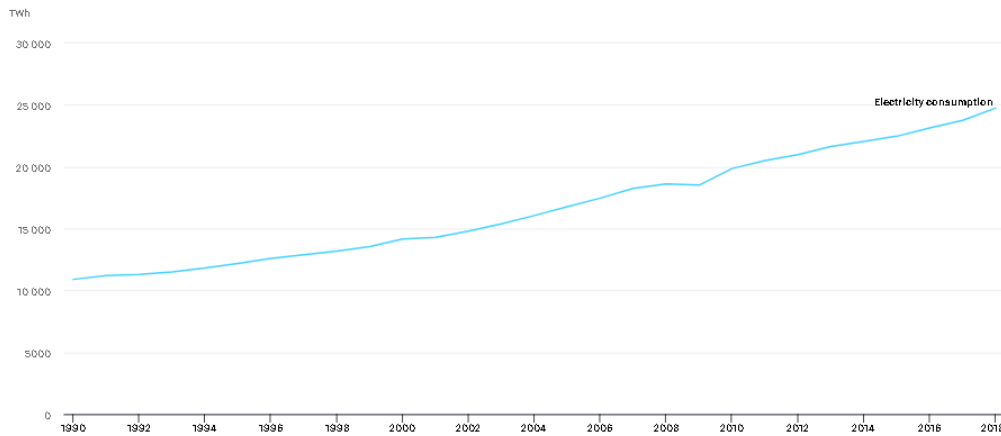
Para la demanda de tierras de cultivo de regadío y de secano, de pastoreo, para el aumento de la población y para el aumento de la demanda de madera se calculó la tendencia de aumento histórica y se adoptó como tasa de aumento para el escenario SP2. Para los SP1 y SP3 se escala a partir de esta, para obtener una demanda menor en el SP1 y mayor en el SP3. Se ha procurado que los factores sean similares para todas las variables con el objetivo de mantener la coherencia. Se detallan a continuación los casos en los que el proceso no se ha limitado únicamente a esto.

#### Demanda de energía solar

La demanda de energía solar depende principalmente de dos factores, la demanda de electricidad total y el porcentaje de esa demanda que se cubre con energía solar. La producción total de electricidad por región LOCOMOTION será una variable externa al modelo. También lo serán el porcentaje de la producción total de electricidad que se desea que llegue a cubrir la energía solar como máximo así como el año en que se desea que se alcance dicho máximo en cada región. Cabe destacar que este porcentaje y año para cada región puede ser modificado por el usuario, sin embargo, se mantienen constantes para todos los escenarios con el objetivo de observar las consecuencias del incremento o reducción de la producción total de electricidad en cada región. La tendencia de la demanda de electricidad es la misma que para otras variables bajo los escenarios SP2 y SP3 pero, para el SP1, a partir de 2030 se introduce una reducción de la demanda.

Tanto la producción mundial de electricidad entre 2005 y 2018 (Tabla 5.19) como la producción total de electricidad total en cada una de una de las regiones IEA (vistas en la sección 6.1.2.6.) en 2018 puede conocerse gracias a la base de datos de la IEA (IEA, 2020). Haciendo uso de los porcentajes calculados para la correspondencia entre regiones IEA y LOCOMOTION y

reflejados en la Tabla 5.21 puede conocerse el porcentaje de la electricidad global que se produce en cada región LOCOMOTION (Tabla 5.55)



**Figura 5.27.** Producción global de electricidad (1990-2018)  
(Fuente: IEA, 2020)

% of global electricity production	
REGIONS_I	[%]
EU27	21,84%
UK	1,77%
CHINA	26,87%
EASOC	14,71%
INDIA	5,92%
LATAM	0,72%
RUSSIA	1,44%
USMCA	11,46%
LROW	14,73%

**Tabla 5.55.** Porcentaje de la producción global de electricidad producida en cada región LOCOMOTION (Fuente: Creación propia; IEA)

Gracias a estos se calcula la producción de electricidad en cada región LOCOMOTION cada año. Dividiendo la producción de energía solar entre la producción total de electricidad en cada región se calcula el porcentaje de la demanda de electricidad que se ha cubierto con energía solar cada año, en concreto en 2018 que es el año de interés (Tabla 5.56).

% of electricity covered by solar in 2018	
REGIONS_I	[%]
EU27	2,04%
UK	2,93%
CHINA	2,66%
EASOC	2,44%
INDIA	2,71%
LATAM	5,37%
RUSSIA	0,20%
USMCA	2,93%
LROW	0,79%

**Tabla 5.56.** Porcentaje de la producción de electricidad cubierto con energía solar en 2018 en cada región (Fuente: Creación propia)



Como se ha mencionado el usuario selecciona el porcentaje de electricidad que se desea que llegue a cubrir la energía solar como máximo y el año en que se alcanzará dicho máximo en cada región, con esta información puede calcularse el porcentaje de electricidad que cubre la energía solar cada año con la Ecuación 5.46 y con la Ecuación 5.47 la demanda de energía solar cada año.

**Ecuación 5.46**

$$share\_of\_electricity\_from\_solar[R_i] = initial\_share[R_i] + \frac{desired\_share[R_i] - initial\_share[R_i]}{desired\_year\_to\_attain\_share - 2018} \cdot (actual\_year - 2018)$$

**Ecuación 5.47**

$$demand\_of\_solar\_energy[R_i] = share\_of\_electricity\_from\_solar[R_i] \cdot total\_electricity\_production[R_i]$$

En línea con los escenarios propuestos en (De Castro et al., 2013; van de Ven et al., 2021; Capellán-Pérez et al., 2017) se establece el porcentaje como 80% en todas las regiones y se establecen los siguientes años de acuerdo con el desarrollo actual y capacidad de cada región (Tabla 5.57)

Desired year to attain desired solar share of electricity	
REGIONS_I	[year]
EU27	2035
UK	2030
CHINA	2030
EASOC	2060
INDIA	2060
LATAM	2060
RUSSIA	2045
USMCA	2040
LRDW	2060

**Tabla 5.57.** Año en que se alcanza el porcentaje de solar en la electricidad en cada región (Fuente: Creación propia)

### Producción de energía en la superficie solar de los tejados

Puesto que la producción de energía solar en los tejados de la superficie urbana de cada región es ahora dependiente del año en el que el usuario haya decidido que se alcance el máximo el porcentaje de superficie urbana cubierta por paneles solares se calcula ahora con la Ecuación 5.48. La producción de energía solar en la superficie urbana sigue calculándose con la Ecuación 5.42. Puesto que se había supuesto producción histórica 0 no es necesario añadir el porcentaje inicial.

**Ecuación 5.48**

$$share\_of\_urban\_covered\_by\_rooftop\_PV[R_i] = \frac{maximum\_share\_of\_urban\_covered[R_i]}{desired\_year\_to\_attain\_share - 2018} \cdot (actual\_year - 2018)$$

Con un IF THEN ELSE se limita que el porcentaje no sea superior al máximo



Porcentaje de la demanda de madera producido en las plantaciones

Puesto que el porcentaje de madera que vendrá de las plantaciones en 2050 lo define el usuario ahora el porcentaje cada año se calcula según la Ecuación 5.49. Se decide no poner límite porque no se considera que exista un límite claro, de hecho en regiones como Chile el 90% de la madera se extrae de plantaciones (Holmgren & Vetenskapsakademien, 2008).

**Ecuación 5.49**

$$\frac{share\_of\_wood\_production\_from\_plantations[R_i] - initial\_share[R_i]}{desired\_year\_to\_attain\_share - 2018} \cdot (actual\_year - 2018)$$

Aunque este porcentaje deseado puede variarse se van a mantener los siguientes valores fijos en los tres escenarios para observar de forma aislada el efecto de la demanda de madera, los porcentajes (Tabla 5.58) se decidieron en base al desarrollo actual de las plantaciones en cada región y las indicaciones de la literatura.

Desired share of wood from plantations by 2050	
REGIONS_I	[%]
EU27	50%
UK	50%
CHINA	40%
EASOC	35%
INDIA	35%
LATAM	40%
RUSSIA	20%
USMCA	40%
LROW	35%

**Tabla 5.58.** Porcentaje estimado de madera obtenido de las plantaciones en 2050 (Fuente: Creación propia)

Protección de los bosques primarios

En este caso mediante si se activa la política mediante un IF THEN ELSE se limita la pérdida de bosque primario y se transfiere dicha pérdida a los bosques gestionados.

Nivel de escasez de agua

Las tendencias de aumento del factor que representa la escasez de agua se han calculado a partir de los datos del estudio de Kummu et al. (Kummu et al., 2016) sobre el aumento de la escasez de agua. Se han adaptado para el escenario SP2 las tendencias históricas y escalado para los escenarios SP1 y SP3.



### **5.3. Modelado en Vensim**

A lo largo de esta sección se detalla cómo se ha generado el modelo en el programa Vensim. En primer lugar se describen los criterios de modelado seguidos para que este sea compatible con el resto del modelo WILIAM. A continuación se muestra la estructura general del modelo, es decir, los esquemas de cada proceso y, por último se presenta el modelo empleado para comparar los resultados con los datos históricos (2005-2018).

#### **5.3.1. Criterios de modelado de WILIAM**

Cada sub-módulo debe ser más tarde integrado en el modelo general, es por esto que se establecen una serie de reglas a la hora de modelar y programar de tal forma que dicha integración resulte en última instancia más sencilla y produzcan los menos errores posibles. Puesto que el diseño de cada sub-módulo. Las consideraciones más relevantes se detallan a continuación (Crespo, 2020).

##### Respecto a la nomenclatura

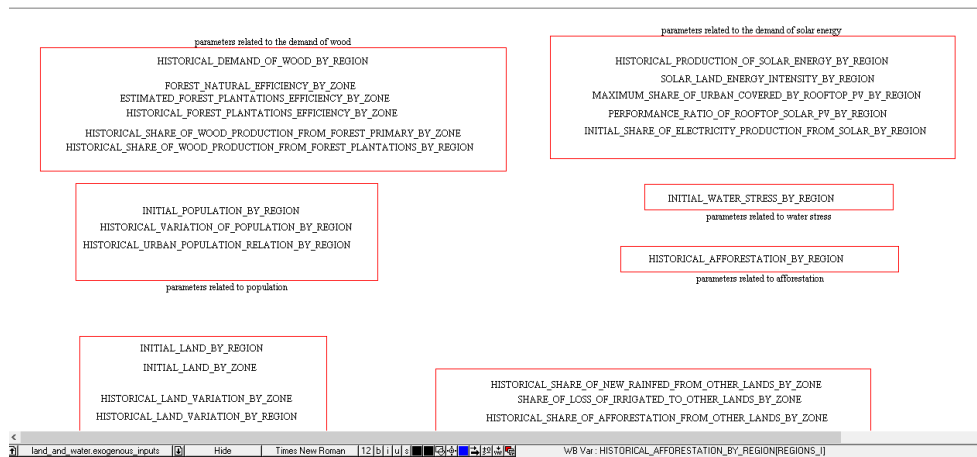
- Las constantes deben ser escritas en mayúsculas.
- Cuando la variable es una variable que define un escenario debe añadirse “\_SP” al final de la misma.
- Los subíndices deben definirse añadiendo “\_I” al final de los mismos y siempre en mayúsculas.
- En el caso de que el valor de la variable dependa del escenario elegido, es decir, que se programe que el valor de la variable pueda variar, esta comenzará por “SWITCH\_”
- No deben incluirse abreviaturas ni acrónimos a no ser que estos últimos sean a no ser que sean extensamente conocidos (ej. GDP, PV).
- En la medida de lo posible la palabra más relevante debe ser la primera. En este caso, la magnitud física “tierra” (ej. land\_for\_forest\_managed\_by\_zone, se escribe primero tierra y primero bosque pues son las magnitudes más significativas).
- Cada ventana en Vensim adopta el nombre de su módulo y sus sub-módulo.

Lo más importante es que el modelo no deben introducirse números (únicamente 1, 2, 3 para seleccionar el escenario); todos los datos de las constantes y otras variables deben venir de un documento Excel. WILIAM adopta este enfoque para facilitar la transparencia y permitir al usuario variar cualquier parámetro si así lo desea. Existen dos documentos Excel, uno para las variables dependientes de cada escenario y otro para las entradas del

modelo, este último ha sido separado en pestañas para representar las variables que en WILIAM vendrán de otros módulos o sub-módulos.

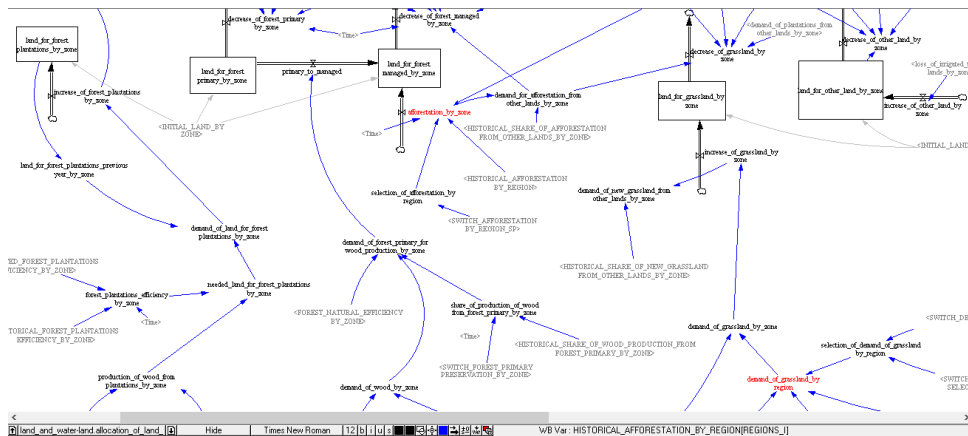
Respecto a la estructura del modelo en Vensim

- Debe existir una ventana en la que estén todas las constantes cuya información se obtiene del Excel del modelo. Es la ventana de entradas (*inputs*) al sub-módulo (Figura 5.28).



**Figura 5.28.** Ventana de entradas al modelo en Vensim (Fuente: Creación propia)

- Debe existir una ventana con el modelo propiamente dicho, sus stocks y sus variables (Figura 5.29).



**Figura 5.29.** Ventana del modelo en Vensim (Fuente: Creación propia)

- Por último debe existir una ventana para las variables que dependen de los escenarios. Es decir, las variables de entrada pero de los escenarios (Figura 5.30).

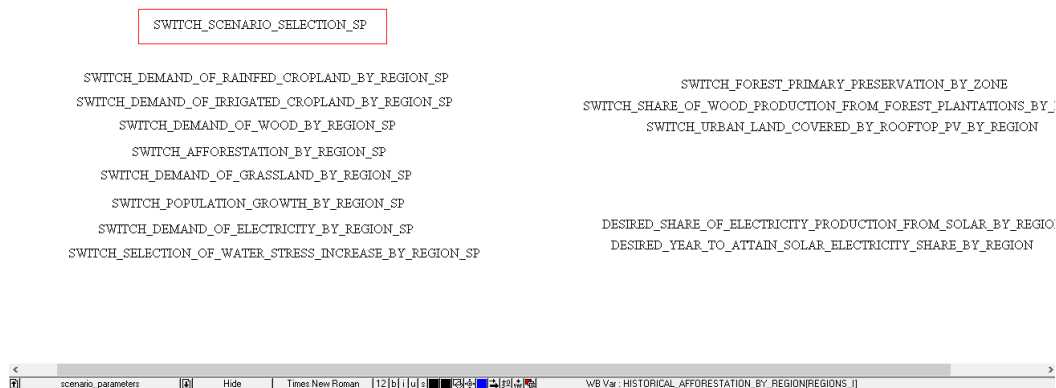


Figura 5.30. Ventana de entradas de los escenarios en Vensim  
(Fuente: Creación propia)

### 5.3.2. Estructura general

A continuación se muestran de forma aislada cada uno de los procesos y cambios de uso del suelo que se describieron en la sección 5.2.2.2. Cabe destacar que se presentan los procesos de manera independiente, sin incluir las conexiones que unen cada uno al resto del modelo. La unión es simple pues es sumar las pérdidas de cada stock debidas a cada una de las expansiones de los otros usos del suelo.

De acuerdo con el documento (Mediavilla, 2021) la demanda se calcula por regiones mientras que la producción se obtiene por zonas. Es por esto que, en todos los casos, las variables exógenas que son impulsores de los cambios de uso del suelo entran al modelo por región LOCOMOTION y se transforman internamente a zonas Köppen mediante las matrices RtoZ. El efecto sobre las regiones puede conocerse gracias a la transformación mediante las matrices ZtoR.

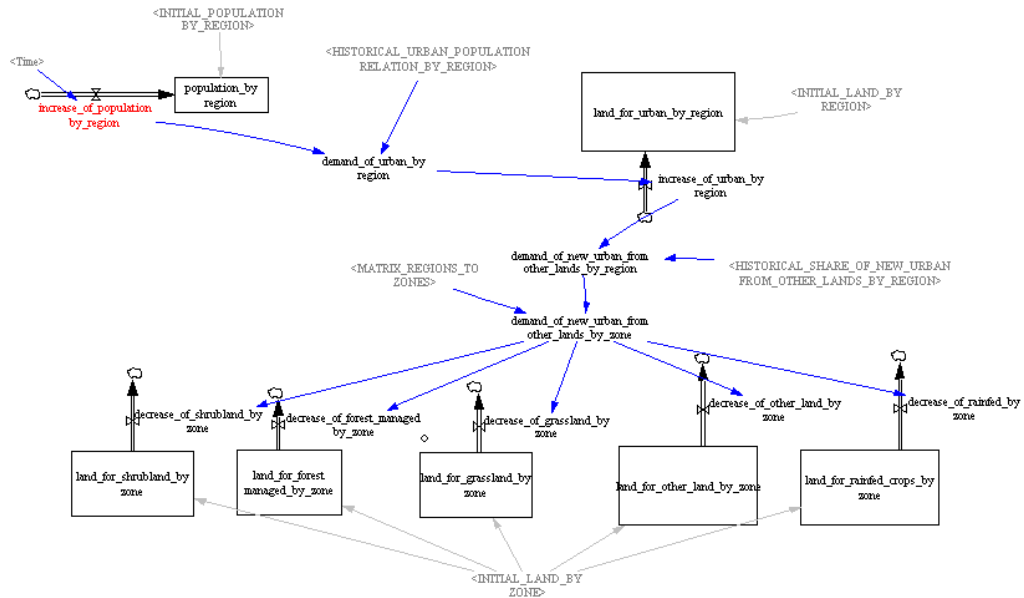
Los subíndices del modelo son:

- Para los usos de la tierra: LANDS\_I = [RAINFED, IRRIGATED, FOREST\_MANAGED, FOREST\_PRIMARY, FOREST\_PLANTATIONS, SHRUBLAND, GRASSLAND, WETLAND, URBAN, SOLAR, OTHER\_LAND]
- Para las regiones LOCOMOTION: REGIONS\_I = [EU27, UK, CHINA, EASOC, INDIA, LATAM, RUSSIA, USMCA, LROW]
- Para las zonas Köppen: ZONES\_I = [TROPICAL, WARM, ARID-HOT, ARID\_COLD, TEMPERATE, WINTER\_SNOW, SNOW, POLAR]

### 5.3.2.1. Cambios de uso del suelo

#### Expansión urbana

Se muestra en la Figura 5.31 el modelado de lo explicado en las secciones 5.2.2.3.1 y 5.2.2.4.1,

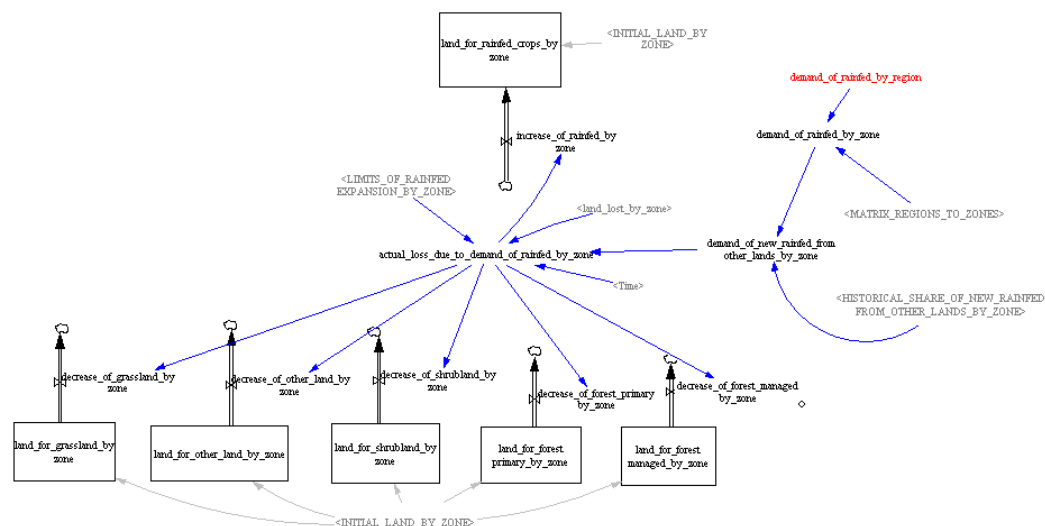


**Figura 5.31.** Modelado en Vensim de los cambios de uso de la tierra debidos a la expansión urbana (Fuente: Creación propia)

En el caso de la demanda de superficie urbana se considera que es más dependiente de criterios políticos y económicos que de factores climáticos por ese motivo su stock se mantiene por regiones LOCOMOTION y es la demanda de otros usos del suelo la que se transforma a las zonas Köppen.

### Expansión de las tierras de cultivo de secano

Se muestra en la Figura 5.32 el modelado de lo explicado en las secciones 5.2.2.3.2 y 5.2.2.4.2.

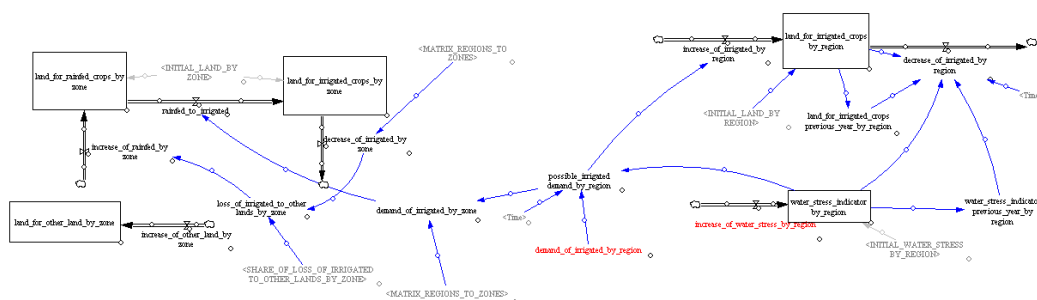


**Figura 5.32.** Modelado en Vensim de los cambio de uso de suelo debidos a la expansión de las tierras de cultivo de secano (Fuente: Creación propia)

Como ya se ha comentado la demanda es por región LOCOMOTION y se transforma a zona Köppen, además, la demanda no es necesariamente igual al incremento. Cabe la posibilidad de tener en cuenta las pérdidas como futura demanda, debido al desabastecimiento, aunque esto lo realizará WILIAM endógenamente en un futuro.

### Expansión de las tierras de cultivo de regadío y disponibilidad de agua

Se muestra en la Figura 5.33 el modelado de lo explicado en las secciones 5.2.2.3.2, 5.2.2.3.7 y 5.2.2.4.2.



**Figura 5.33.** Modelado en Vensim de los cambios de uso del suelo debidos a la expansión de las tierras de cultivo de regadío y la escasez de agua (Fuente: Creación propia)

Como se ha explicado en la sección 5.2.2.4.6 el cálculo se hace inicialmente por región y se transforma a zona para tener en cuenta los límites de crecimiento de cada región.

### Expansión de las tierras de pastoreo

Se muestra en la Figura 5.34 el modelado de lo explicado en las secciones 5.2.2.3.2 y 5.2.2.4.2.

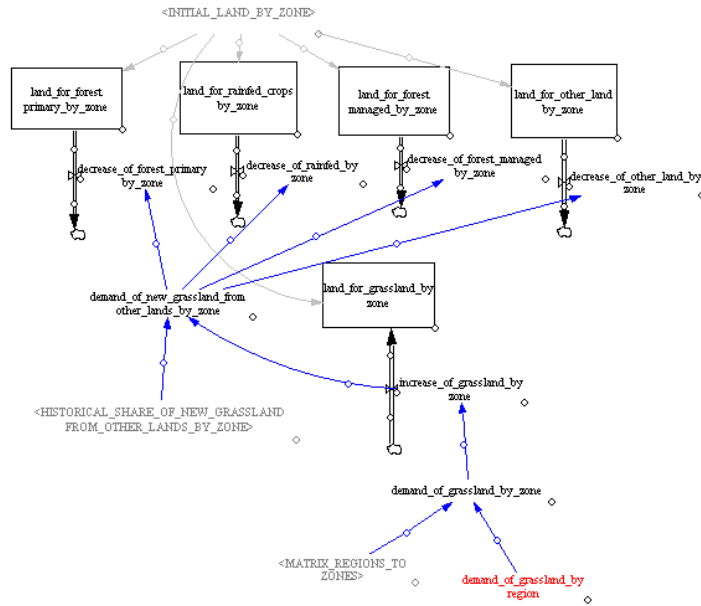


Figura 5.34. Modelado en Vensim de los cambios de uso del suelo debidos a la expansión de tierras de pastoreo (Fuente: Creación propia)

### Cambios asociados a la demanda de madera

Se muestra en la Figura 5.35 el modelado de lo explicado en las secciones 5.2.2.3.4. y 5.2.2.4.3.

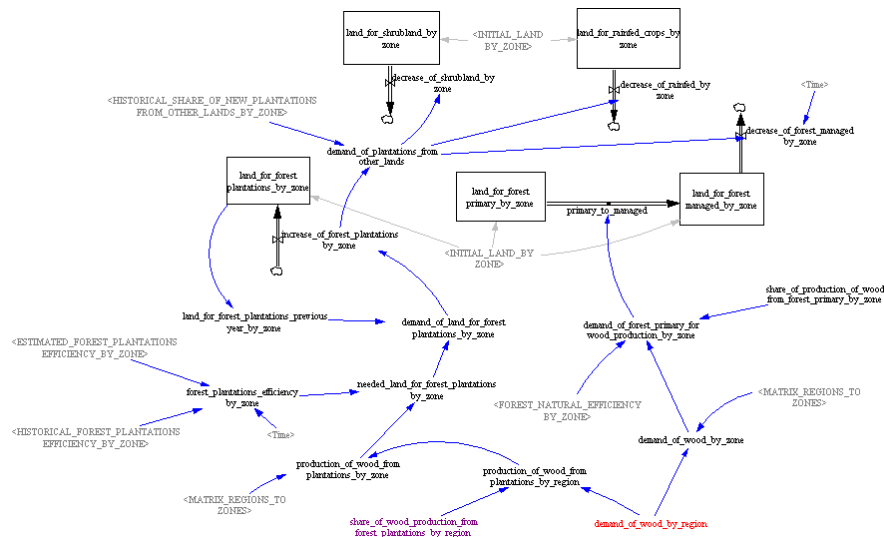
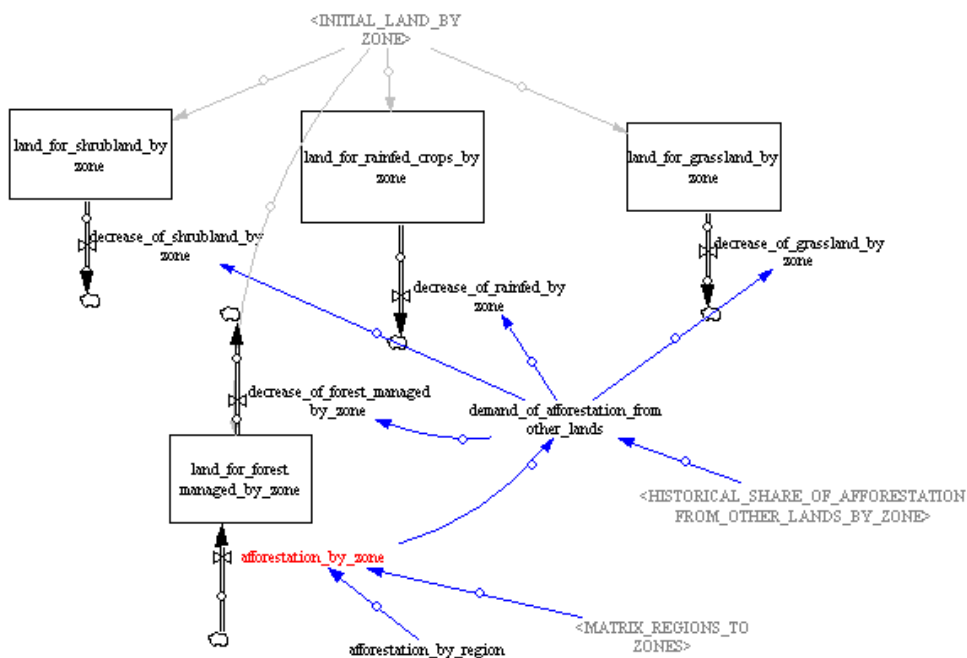


Figura 5.35. Modelado en Vensim de los cambios de uso del suelo asociados a la demanda de madera (expansión de las plantaciones) (Fuente: Creación propia)



Forestación

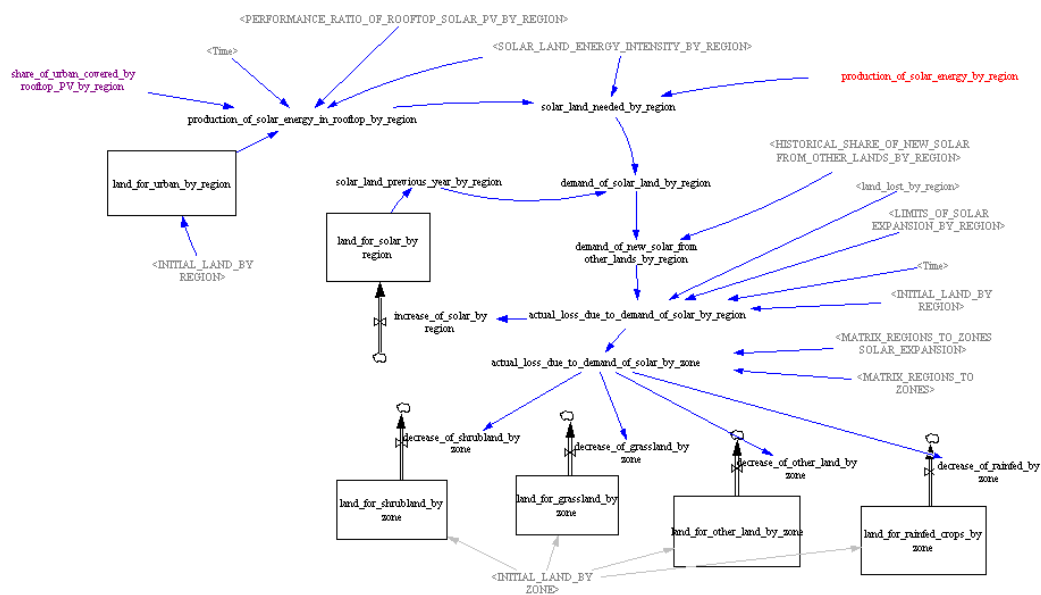
Se muestra en la Figura 5.36 lo explicado en la secciones 5.2.2.3.5 y 5.2.2.4.4.



**Figura 5.36.** Modelado de los cambios de uso del suelo debidos a la forestación (Fuente: Creación propia)

Demanda de energía solar y expansión de tierra para solar

Se muestra en la Figura 5.37 lo explicado en las secciones 5.2.2.3.6 y 5.2.2.4.5.



**Figura 5.37.** Modelado en Vensim de los cambios de uso de suelo debidos a la expansión de la tierra para solar (Fuente: Creación propia)

### 5.3.2.2. Impulsores de los cambios de uso del suelo

Cada uno de los impulsores de los cambios del suelo depende, entre 2005 y 2018, de la variación histórica de dicho parámetro y, entre 2018 y 2050 de los valores establecidos para el escenario que escoja el usuario. Para implementar esto en Vensim se crea un nuevo subíndice de escenarios

- $SP\_I = [SP1, SP2, SP3]$

Para cada una de las variables se introducen, en una variable SWITCH, los valores para los tres escenarios con una matriz y se crea también otra variable SWITCH para elegir el escenario. Finalmente se crea una matriz de selección gracias a la cual mediante un IF THEN ELSE se seleccionan los valores de la primera variable para el número de escenario definido en la segunda variable. Se ilustra esto para cada impulsor (Figura 5.38 a Figura 5.40).

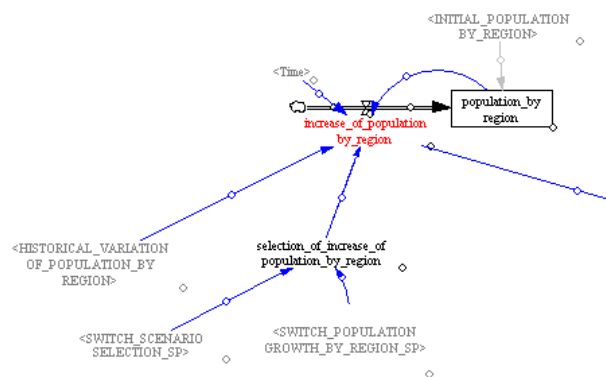


Figura 5.38. Modelado en Vensim del aumento de la población (Fuente: Creación propia)

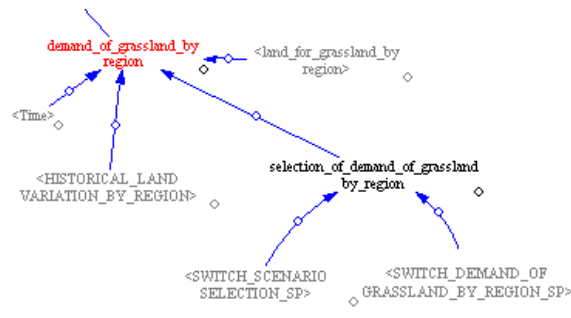
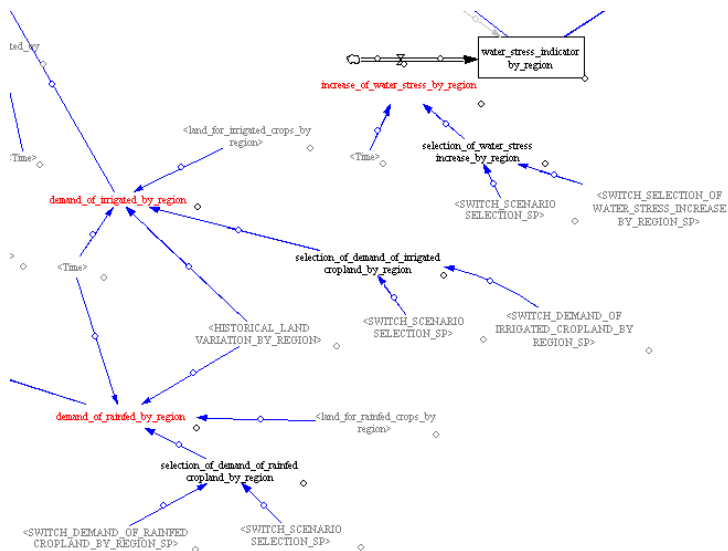
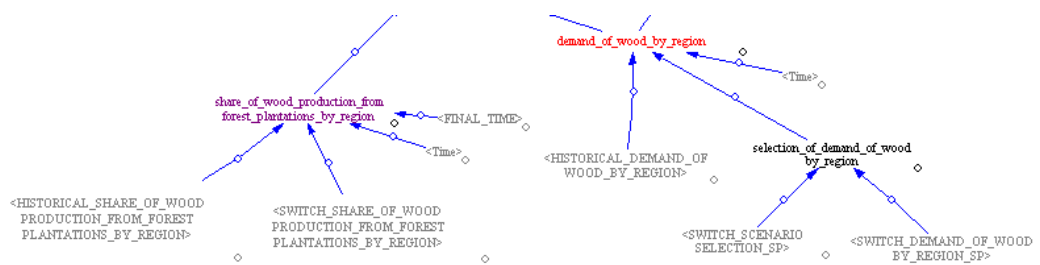


Figura 5.39. Modelado en Vensim de la demanda de tierras de pastoreo (Fuente: Creación propia)

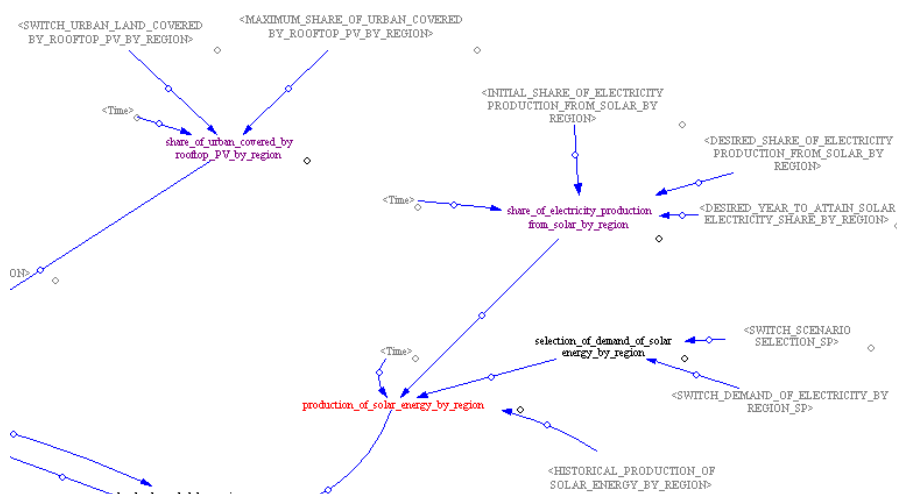


**Figura 5.40.** Modelado en Vensim de la demanda de tierras de cultivo y la escasez de agua (Fuente: Creación propia)

La variación del resto de impulsores se basa en la misma idea pero depende de más variables, se muestra a continuación (Figura 5.41 y Figura 5.42).



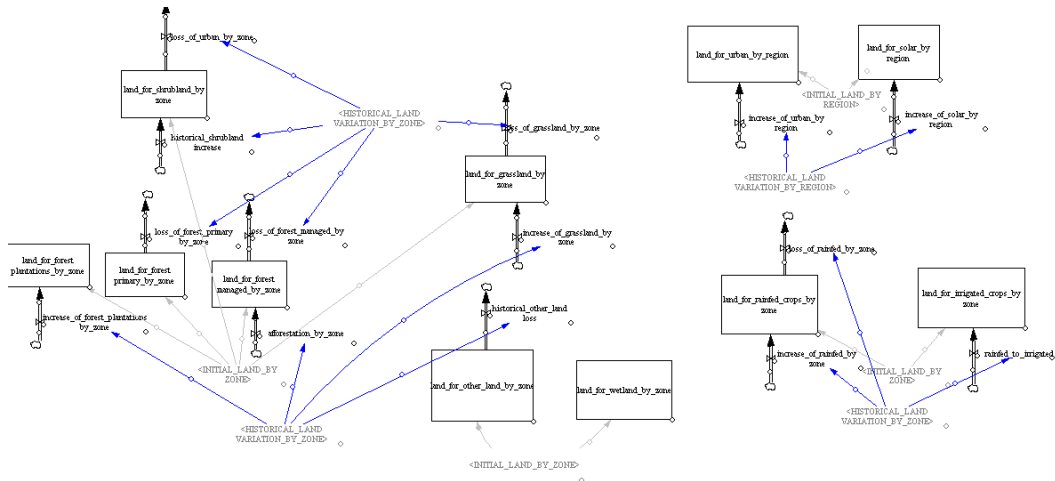
**Figura 5.41.** Modelado en Vensim de la demanda de madera (Fuente: Creación propia)



**Figura 5.42.** Modelado en Vensim de la demanda de energía solar (Fuente: Creación propia)

### 5.3.3. Modelo de evolución histórica

Para poder comparar los resultados del modelo con los datos históricos se crea un modelo en el que los stocks evolucionan según su tendencia histórica. Se eliminan todas las variables e impulsores que generaban los cambios de uso del suelo y se introducen las ecuaciones de tal forma que cada stock evolucione en función de los datos de la tendencia histórica calculados en la sección 5.2.2.2. Este modelo resulta como se muestra en la Figura 5.43.



**Figura 5.43.** Modelo de evolución en función de las tendencias históricas  
(Fuente: Creación propia)

Para que hacer la comparación resulte lo más sencilla posible las variables en ambos modelos deben llamarse de la misma forma y depender de los mismos subíndices.

#### Pérdidas de tierra

Para comprobar que el modelo funciona correctamente se ha hecho la suma de todos los stocks con el objetivo de ver si existen pérdidas de tierras o no. Inicialmente se ha podido observar que dichas pérdidas no existen, sin embargo, al introducir el resto de variables se detecta un error del 0,003%. Se ha aislado el modelo para detectar el problema y se ha encontrado que el error es causado por el trabajo con zonas y regiones en el caso de las tierras de regadío. El modelado desarrollado en este proyecto sobre la parte de escasez de agua es una simplificación; en WILIAM esta parte se desarrollará de manera diferente, con mayor nivel de precisión y no se introducirá este error. Por este motivo y puesto que no se considera que el error afecte significativamente a los resultados, para el desarrollo de este proyecto se decide trabajar con dicho error.

## 6. RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados de las simulaciones del modelo. En primer lugar se hace una comparación de los resultados de la simulación del modelo entre 2005 y 2018 con los datos históricos de cada uso del suelo en este periodo para comprobar si el funcionamiento del modelo es correcto. A continuación se presentan los resultados de la evolución de cada uso del suelo entre 2018 y 2050 bajo distintos escenarios.

### 6.1. Comparación con los históricos

#### Comparación

Para comparar cómo de acertados son los resultados y el nivel de incertidumbre con el que se trabaja se han comparado los resultados obtenidos con el modelo y el modelo de evolución histórica entre 2005 y 2018. Se ha calculado el error relativo en cada año y se ha seleccionado el error máximo cometido en cada caso, estos errores máximos se presentan en la Tabla 6.1.

MAXIMUM ERROR HISTORIC-MODEL SIMULATION									
ZONES_I	TROPICAL	WARM	ARID_HOT	ARID_COLD	TEMPERATE	WINTER_SNO	SNOW	POLAR	
LANDS_I	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
RAINFED	3,327%	4,143%	2,308%	2,182%	-0,502%	-1,390%	13,638%	11,986%	
IRRIGATED	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
FOREST_MANAGED	-6,205%	2,607%	-5,631%	0,185%	-0,698%	1,038%	-1,343%	-1,251%	
FOREST_PRIMARY	0,812%	2,910%	-0,773%	0,828%	0,358%	-0,263%	-0,057%	1,997%	
FOREST_PLANTATIONS	2,696%	1,651%	2,922%	2,244%	-3,786%	1,591%	2,033%	1,926%	
SHRUBLAND	0,760%	1,427%	0,681%	0,593%	1,033%	1,645%	1,475%	0,882%	
GRASSLAND	-2,172%	-1,664%	-26,273%	-1,022%	-21,663%	-0,834%	-0,413%	-0,201%	
WETLAND	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
OTHER_LAND	0,233%	0,324%	-0,378%	-0,584%	1,682%	-0,566%	-0,702%	-0,293%	
REGIONS_I	EU27	UK	CHINA	EASOC	INDIA	LATAM	RUSSIA	USMCA	LROW
LANDS_I	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
URBAN	-18,086%	-15,895%	14,781%	9,033%	7,979%	4,071%	22,180%	0,762%	-4,406%
SOLAR	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

**Tabla 6.1.** Máximo error entre los datos históricos y la simulación del modelo (2005-2018)  
(Fuente: Creación propia)

En el caso de los humedales el error es cero pues se mantienen constantes, en el caso de las tierras de regadío y tierras para solar es cero porque aumentan directamente en función del aumento histórico y no se produce ninguna pérdida entre 2005 y 2018. Para el resto de usos del suelo se comentan a continuación las posibles fuentes de error identificadas:

#### Uso de diferentes definiciones y nomenclatura

Aunque las grandes categorías de uso del suelo (superficie urbana, tierras de cultivo, bosques) suelen aparecer en todos los estudios, cada autor o cada estudio, considera las categorías de uso del suelo que más interesen al objetivo del trabajo o que, según sus criterios resulten más relevantes. De todas formas, aunque las categorías suelen ser similares, no es habitual que coincidan los tipos de superficie o vegetación que las categorías agrupan. Por ejemplo, van Vliet, al igual que WILIAM se basa en las categorías de cobertura terrestre de la



ESA-CCI-LC y tipos de uso del suelo considerados son relativamente muy parecidos, sin embargo, la agrupación de las categorías ESA CCI-LC en los usos del suelo es diferente en algunos casos. Lo mismo sucede con los datos de FAO, que aunque usa también los datos de ESA CCI-LC realiza una agrupación bajo sus criterios. A estas diferencias entre los usos del suelo se suma la discrepancia en la regionalización adoptada por cada estudio. El tratar de relacionar unos estudios con otros es probable que introduzca errores.

#### Matrices de transición

Los errores anómalamente altos apreciados en las tierras de cultivo de secano de las zonas SNOW y POLAR pueden deberse al uso de las matrices de transición. Es posible que, aunque una región tenga parte de su superficie en estas zonas, cuando se expanden las tierras de cultivo lo hagan completamente en otras zonas, ignorando estas. Sin embargo, las matrices de transición no reflejan esto sino que hacen una repartición proporcional.

Llama especialmente la atención el elevado error en las tierras de pastoreo de la zona templada (TEMPERATE) y la zona árida (ARID\_HOT). Se cree que estos, y otros de los errores de menor magnitud, pueden ser causados porque la expansión de la agricultura y ganadería en Latinoamérica se ha producido mayoritariamente en las zonas tropicales y, al usar las matrices de transición la expansión se produce en todas las zonas, no únicamente en la tropical.

#### Superficie urbana

Por otra parte, los elevados errores en la superficie urbana se producen puesto que no se introduce el factor de urbanización, es decir cómo se diseñan o cómo es esperado que se diseñen las ciudades en el futuro. Se contempla trabajar con este margen de error puesto que la superficie urbana es pequeña en comparación con el resto de usos de la tierra y, como se puede observar en los resultados, no se introduce un gran error al funcionamiento del modelo.

#### Zona tropical

En el bosque tropical, se puede observar que la superficie de bosque gestionado del modelo se encuentra por debajo de la histórica mientras que, la superficie de tierras de cultivo del modelo se encuentra por encima de la histórica, esto podría significar que se está subestimando la expansión de las tierras de cultivo en la zona tropical y, por consiguiente la deforestación causada por esta también, lo cual está en línea con los problemas de las matrices comentados anteriormente.

#### **Calibración**

La tarea de búsqueda de datos ha sido compleja, y han debido hacerse simplificaciones y tomar hipótesis debido a los pocos estudios que cuantifiquen realmente los cambios de uso del suelo. Esto y el problema de identificación de



parámetros son las razones principales por las cuáles se descarta la calibración. Pues no existen buenos datos para calibrar.

### **Discusión sobre el comportamiento histórico**

No se presentan gráficas sobre la evolución histórica (2005-2018) pues este comportamiento puede observarse en las gráficas de la sección siguiente. Se comentan a continuación los comportamientos más relevantes.

En todas las regiones se observa un crecimiento exponencial de la superficie de tierras para solar, aunque, a pesar de este crecimiento, esta sigue siendo muy pequeña, casi despreciable, en comparación con el resto de usos del suelo. Además, en todas las regiones, excepto en Rusia, se observa que la superficie urbana ha aumentado, esta también es una superficie pequeña en comparación con el resto de usos del suelo. Por otra parte, en lo referente a las tierras de cultivo, las tierras de cultivo de secano se han mantenido constantes o decrecido ligeramente en todas las zonas, a excepción de las zonas de mayor latitud (SNOW y POLAR) donde el decrecimiento ha sido más pronunciado y en la zona TROPICAL donde se ha producido un ligero aumento. Las tierras de cultivo de regadío han crecido en todas las zonas y en todas, se observa un crecimiento más pronunciado entre 2005 y 2013 y más leve, llegando incluso a estabilizarse en algunas zonas, entre 2013 y 2018. Las tierras de pastoreo se han mantenido constantes en todas las zonas excepto en la zona tropical donde se observa un ligero aumento.

Respecto a los bosques se observa una pérdida de bosques, tanto primarios como gestionados en todas las zonas. Aunque la pérdida es generalizada, es mayor en la zona TROPICAL, especialmente la de bosque primario. La superficie de plantaciones ha crecido en todas las zonas, pero de manera más pronunciada en la zona TROPICAL.

La superficie tanto de matorrales como la de otras tierras ha decrecido en todas las zonas, probablemente debido a la conversión en otros usos de la tierra, excepto en las zonas más frías donde la pérdida se debe al deshielo de glaciares permanentes.

## **6.2. Políticas y escenarios**

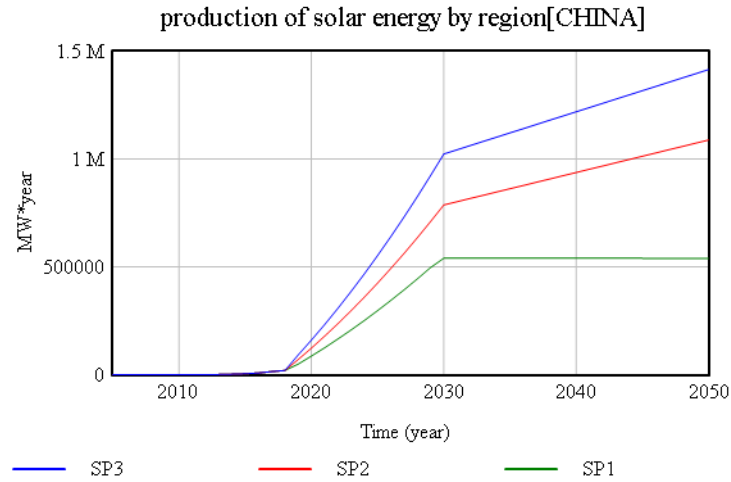
En esta sección se muestran, primeramente, los resultados obtenidos tras la simulación del modelo, bajo cada uno de los tres escenarios desde 2005 a 2050 y a continuación, se realiza una discusión de los mismos.

### **6.2.1. Presentación de resultados y análisis**

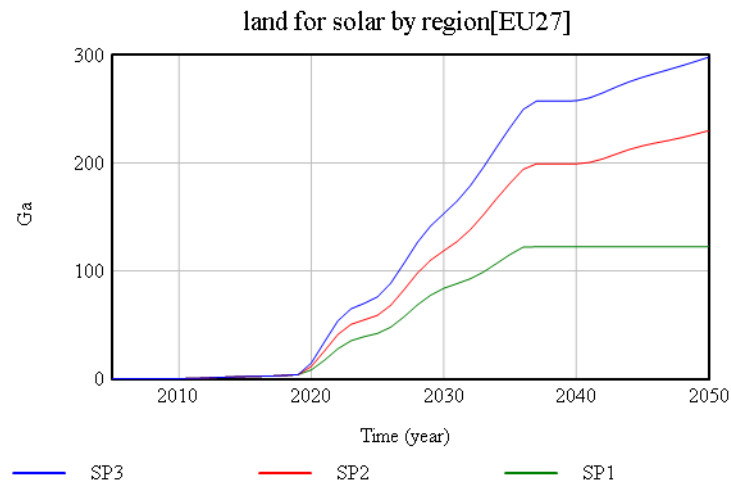
En las futuras secciones se presentan las gráficas de los resultados para cada uso del suelo.

### 6.2.1.1. Superficie para producción de energía solar

En este apartado se presentan las gráficas referentes a la superficie de tierra para solar entre 2005 y 2050 para los tres escenarios.

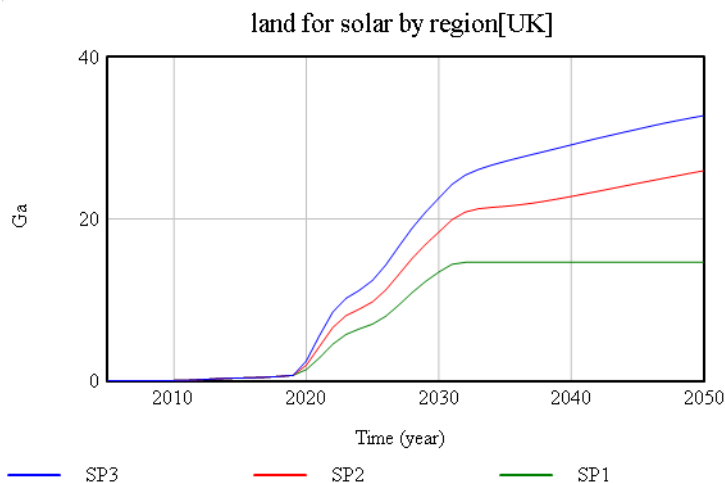


**Figura 6.1.** Producción de energía solar en la región CHINA bajo cada escenario, 2005-2050 (Fuente: Creación propia)

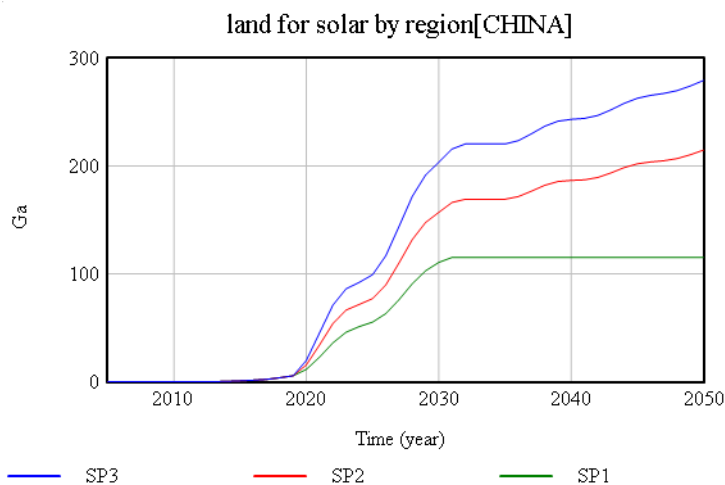


**Figura 6.2.** Evolución de las tierras para solar en la región EU27 bajo cada escenario, 2005-2050 (Fuente: Creación propia)

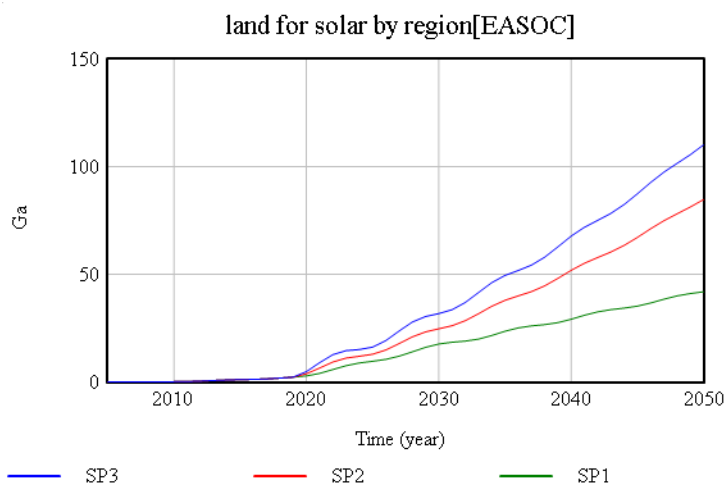




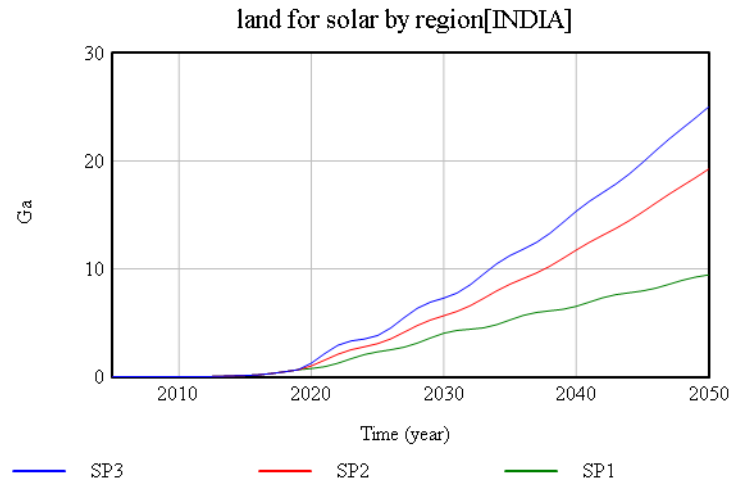
**Figura 6.3.** Evolución de las tierras para solar en la región UK bajo cada escenario, 2005-2050 (Fuente: Creación propia)



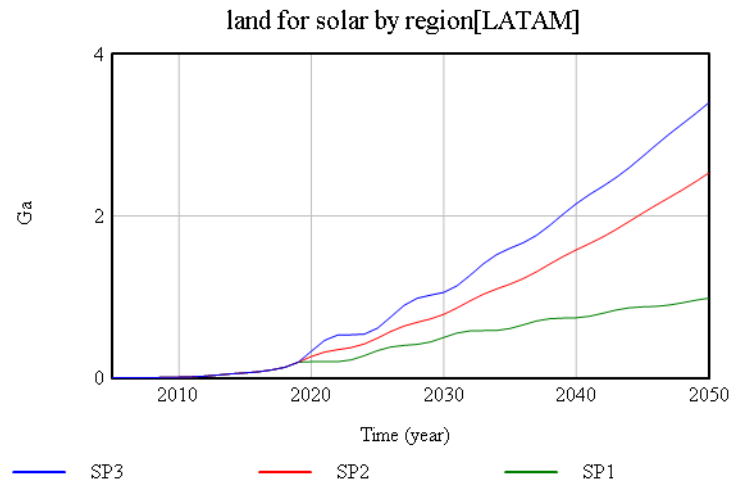
**Figura 6.4.** Evolución de las tierras para solar en la región CHINA bajo cada escenario, 2005-2050 (Fuente: Creación propia)



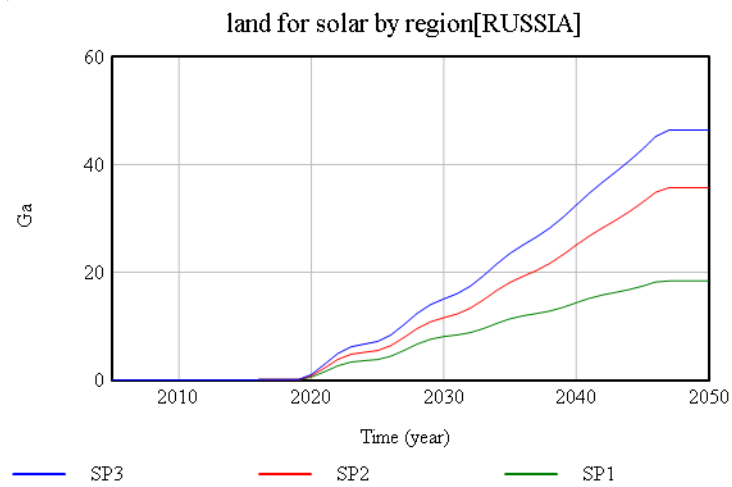
**Figura 6.5.** Evolución de las tierras para solar en la región EASOC bajo cada escenario, 2005-2050 (Fuente: Creación propia)



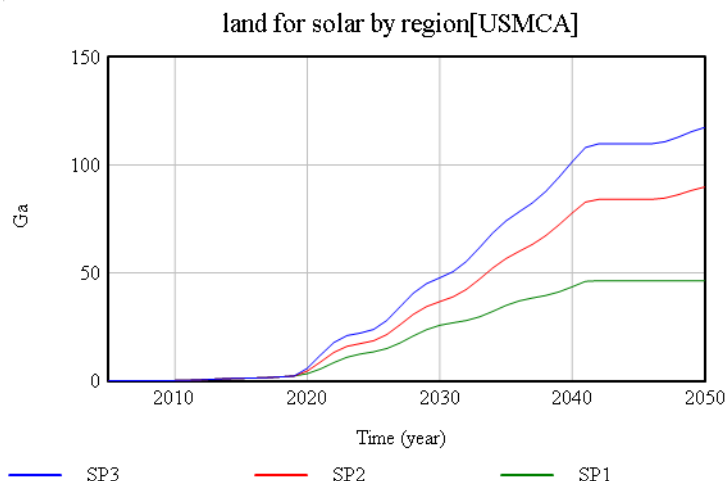
**Figura 6.6.** Evolución de las tierras para solar en la región INDIA bajo cada escenario, 2005-2050 (Fuente: Creación propia)



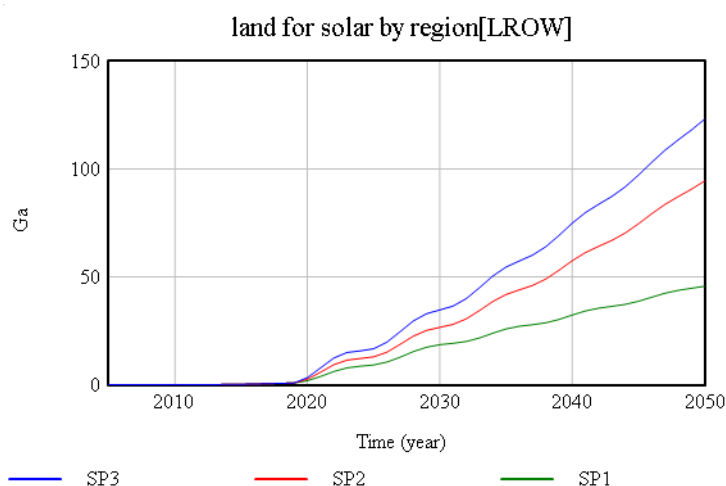
**Figura 6.7.** Evolución de las tierras para solar en la región LATAM bajo cada escenario, 2005-2050 (Fuente: Creación propia)



**Figura 6.8.** Evolución de las tierras para solar en la región RUSSIA bajo cada escenario, 2005-2050 (Fuente: Creación propia)



**Figura 6.9.** Evolución de las tierras para solar en la región USMCA bajo cada escenario, 2005-2050 (Fuente: Creación propia)



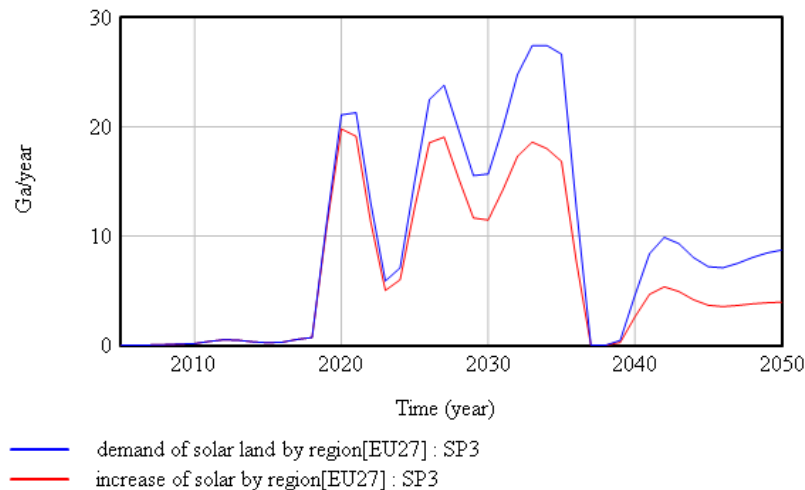
**Figura 6.10.** Evolución de las tierras para solar en la región LROW bajo cada escenario, 2005-2050 (Fuente: Creación propia)

En la Figura 6.1 se ilustra la producción necesaria de energía solar bajo cada escenario. Únicamente se muestra para China aunque la tendencia es exactamente la misma para el resto de las regiones. En el resto de figuras (Figura 6.2 a Figura 6.10) se presenta la evolución de la tierra para solar en cada región LOCOMOTION bajo cada escenario. En CHINA y UK se pueden observar dos tramos claramente diferenciados separados por el año en que está marcado que se alcance el porcentaje máximo deseado de electricidad cubierto a partir de energía solar. En el primer tramo las tierras de solar aumentan con la pendiente necesaria para alcanzar el porcentaje deseado en el año deseado y también en función la electricidad, que sigue aumentando. En el segundo tramo ya se ha alcanzado el máximo y todo aumento es motivado por el aumento de la demanda de electricidad, puesto que, aunque ya se ha alcanzado el porcentaje deseado si aumenta la demanda de electricidad debe aumentar la superficie de solar para poder seguir cubriendo el mismo

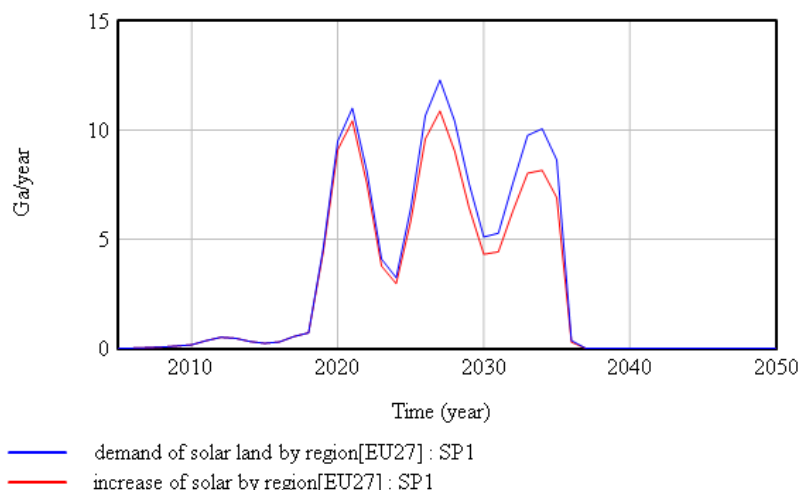
porcentaje de la demanda. En USMCA y EU27 el comportamiento es muy similar, sin embargo, se ve una estabilización durante unos años que indica que durante ese periodo no hizo falta nueva tierra para solar pues existía suficiente para cubrir la demanda. En el resto de regiones no se observa ni cambio de pendiente ni estabilización debido a que se ha marcado que no se alcance el porcentaje máximo antes de 2050. En todas las regiones se observa lo esperado, la tierra de solar es mucho menor bajo el escenario SP1, puesto que la demanda de electricidad es menor y es muy superior bajo el escenario SP3. Cabe destacar que puede observarse claramente que se producirá un gran aumento de la superficie terrestre dedicada a la producción de solar bajo cualquiera de los escenarios, con las consecuencias que eso conlleva.

### Efecto de los límites

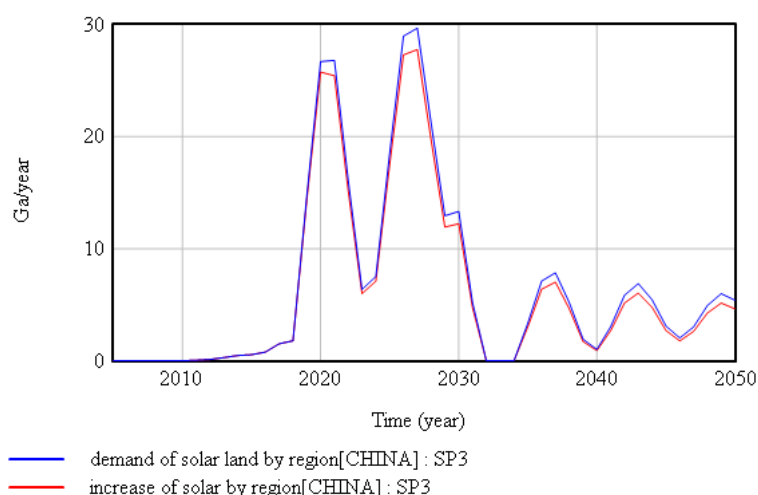
Respecto al efecto de los límites se observa que en algunos casos se alcanzan para algún uso de la tierra aunque esto no afecta de manera significativa al desarrollo de la tendencia, probablemente porque se alcanzan en las tierras de pastoreo o de cultivo mientras que sigue posible la expansión sobre otras tierras que es de donde se obtiene la mayor parte de la superficie. En algunas regiones el alcance de estos límites apenas es perceptible, como es el caso de CHINA (Figura 6.13), sin embargo en otras, como en EU27 se observa con mayor claridad y, además puede observarse la diferencia entre escenarios. Para el escenario 3 (Figura 6.11) la diferencia entre la demanda y el incremento real es más notoria que bajo el escenario 1 (Figura 6.12), pues la demanda es superior y el límite invariable.



**Figura 6.11.** Efecto de los límites de expansión de la tierra para solar en EU27, escenario SP3, 2005-2050 (Fuente: Creación propia)



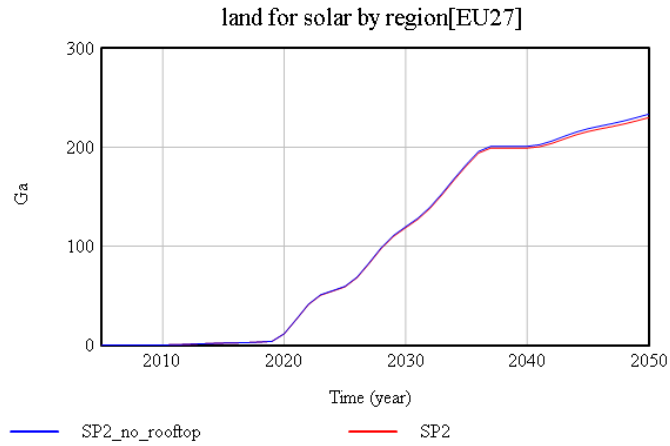
**Figura 6.12.** Efecto de los límites de expansión de la tierra para solar en EU27, escenario SP1, 2005-2050 (Fuente: Creación propia)



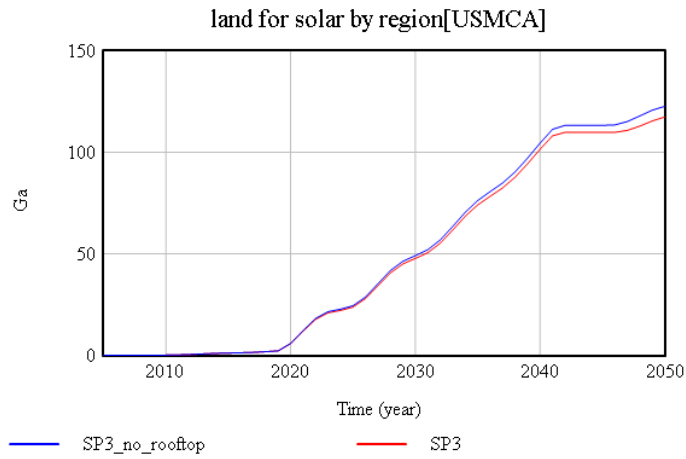
**Figura 6.13.** Efecto de los límites de expansión de la tierra para solar en CHINA, escenario SP3, 2005-2050 (Fuente: Creación propia)

Efecto de una producción 0 en las cubiertas de las superficies urbanas

Se prueba a suponer una producción 0 en la cubierta de los tejados de la superficie urbana, para observar como afecta este parámetro a la superficie destinada a solar. Lo que se observa en todas las regiones y bajo todos los escenarios es que la diferencia es mínima. Puede observarse este efecto mencionado para EU27 (Figura 6.14) y USMCA (Figura 6.15), las gráficas resultan muy similares para el resto de regiones y escenarios.



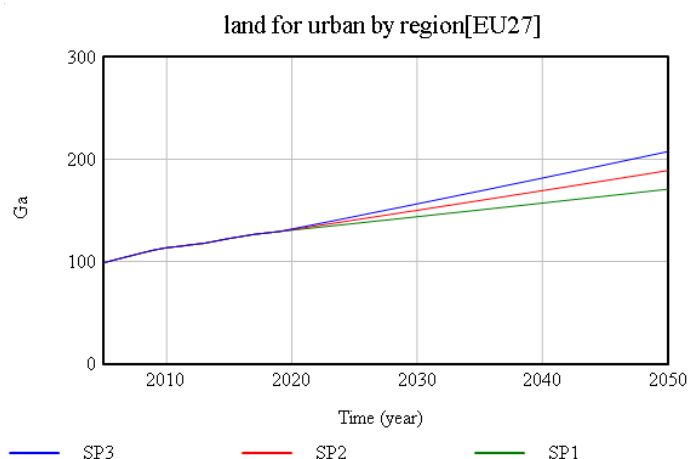
**Figura 6.14.** Evolución de las tierras para solar en la región EU27, escenario SP2 con y sin producción en las cubiertas urbanas, 2005-2050 (Fuente: Creación propia)



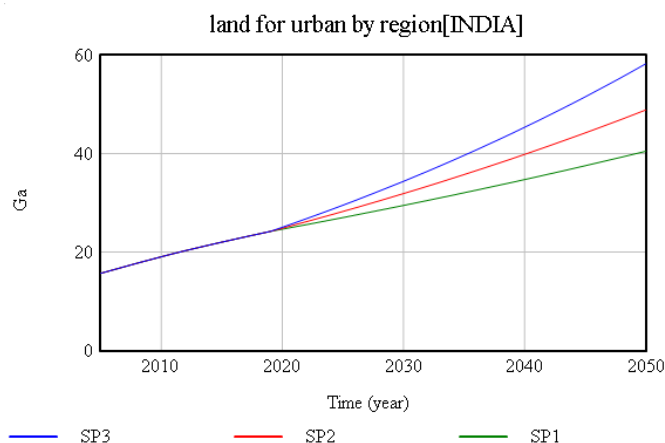
**Figura 6.15.** Evolución de las tierras para solar en la región USMCA, escenario SP3 con y sin producción en las cubiertas urbanas, 2005-2050 (Fuente: Creación propia)

### 6.2.1.2. Superficie urbana

En este apartado se presentan las gráficas referentes a la superficie urbana entre 2005 y 2050 para los tres escenarios.



**Figura 6.16.** Evolución de la superficie urbana en la región EU27 bajo cada escenario, 2005-2050 (Fuente: Creación propia)



**Figura 6.17.** Evolución de la superficie urbana en la región INDIA bajo cada escenario, 2005-2050 (Fuente: Creación propia)

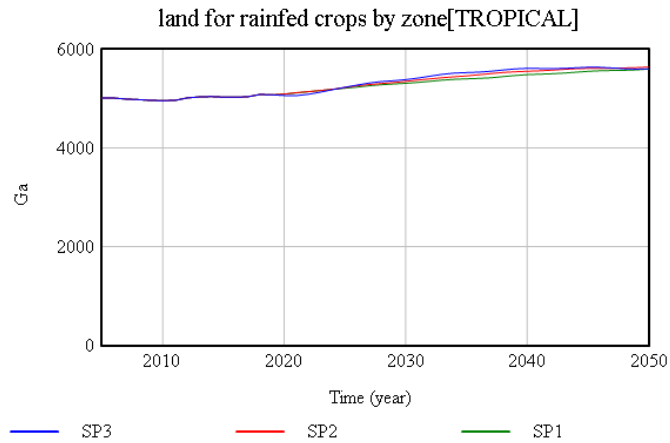
Se muestra la evolución de la superficie urbana de EU27 (Figura 6.16) e INDIA (Figura 6.17), la tendencia en el resto de regiones es la misma, es decir un aumento más pronunciado en función del aumento de población que defina cada escenario (mayor para SP3 y menor para SP1). La mayor o menor pendiente observable en cada región depende, evidentemente del aumento de la población definido por el escenario y, también, del valor del parámetro que representa la relación entre población y superficie urbana, característico de cada región. Por ejemplo, la mayor pendiente que puede observarse en el caso de INDIA respecto a EU27 indica que el crecimiento de la población de INDIA es superior y que, probablemente, el factor de relación población-superficie urbana también es mayor. Aunque en todas las regiones los

incrementos son significativos, la superficie urbana sigue siendo pequeña comparada con otros usos de la tierra.

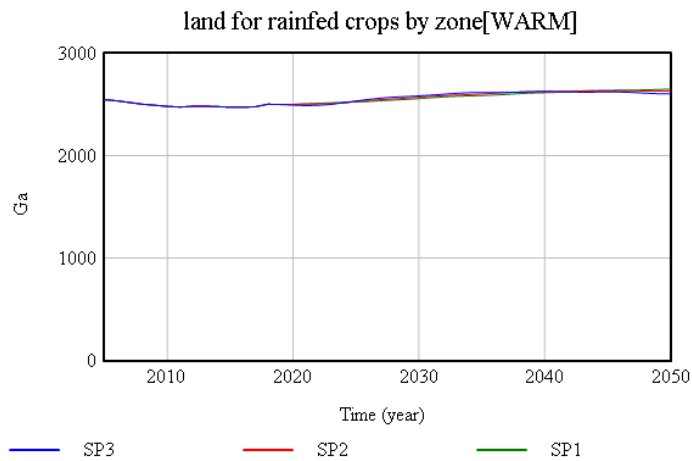
### 6.2.1.3. Tierras de cultivo

En este apartado se presentan las gráficas referentes a la superficie de tierras de cultivo, tanto de secano como de regadío, entre 2005 y 2050 para los tres escenarios.

#### Tierras de cultivo de secano



**Figura 6.18.** Evolución de las tierras de cultivo de secano en la zona TROPICAL bajo cada escenario, 2005-2050 (Fuente: Creación propia)



**Figura 6.19.** Evolución de las tierras de cultivo de secano en la zona WARM bajo cada escenario, 2005-2050 (Fuente: Creación propia)



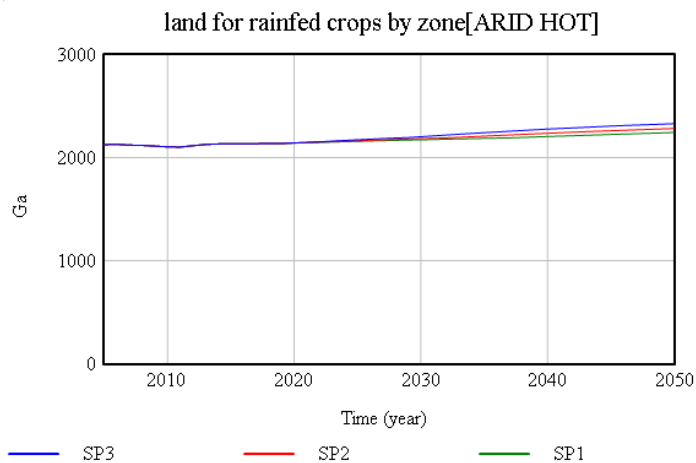


Figura 6.20. Evolución de las tierras de cultivo de secano en la zona ARID\_HOT bajo cada escenario, 2005-2050 (Fuente: Creación propia)

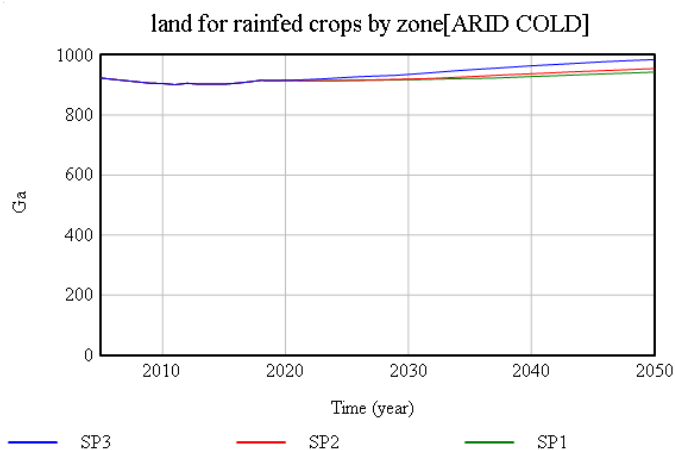


Figura 6.21. Evolución de las tierras de cultivo de secano en la zona ARID\_COLD bajo cada escenario, 2005-2050 (Fuente: Creación propia)

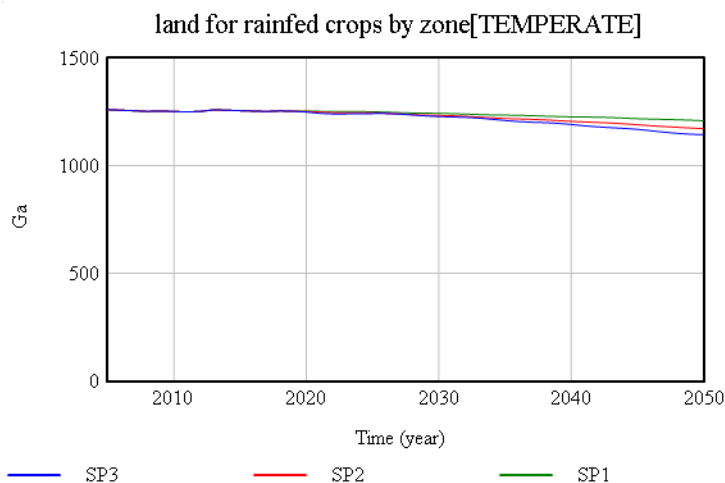
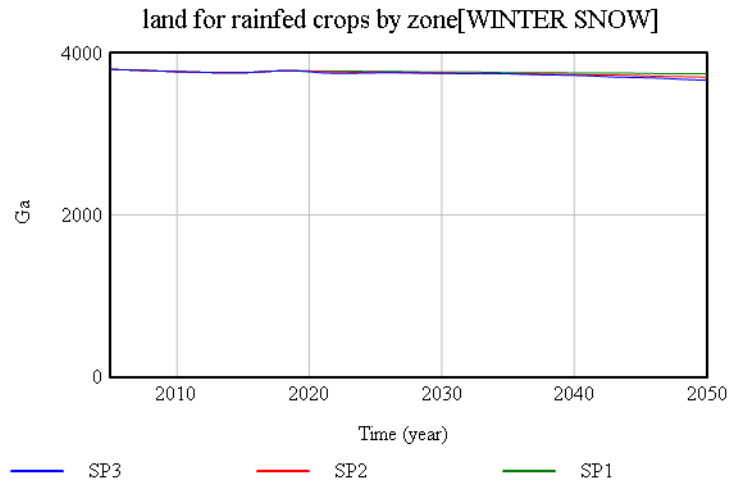
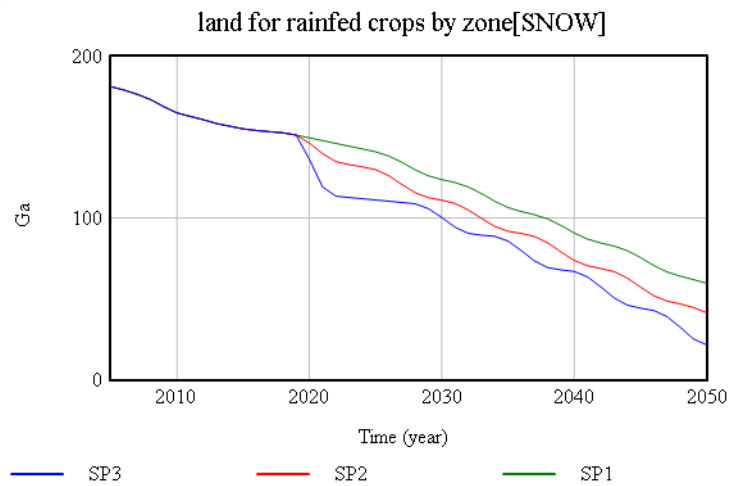


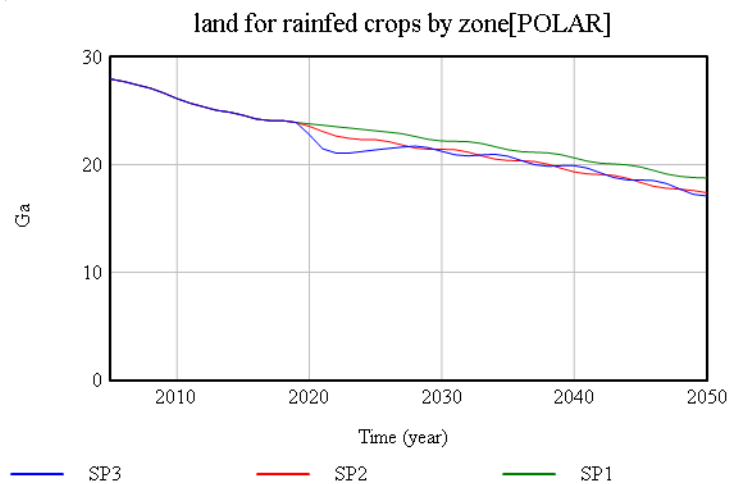
Figura 6.22. Evolución de las tierras de cultivo de secano en la zona TEMPERATE bajo cada escenario, 2005-2050 (Fuente: Creación propia)



**Figura 6.23.** Evolución de las tierras de cultivo de secano en la zona WINTER\_SNOW bajo cada escenario, 2005-2050 (Fuente: Creación propia)



**Figura 6.24.** Evolución de las tierras de cultivo de secano en la zona SNOW bajo cada escenario, 2005-2050 (Fuente: Creación propia)



**Figura 6.25.** Evolución de las tierras de cultivo de secano en la zona POLAR bajo cada escenario, 2005-2050 (Fuente: Creación propia)

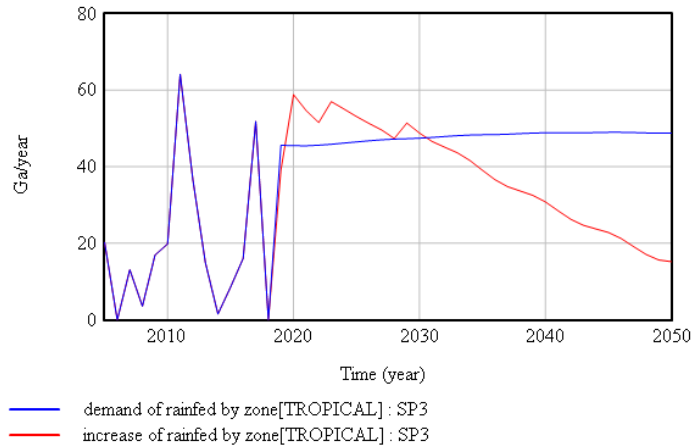


En el caso de la zona tropical (Figura 6.18), bajo el escenario SP3, se puede observar como durante unos años la superficie de tierras de cultivos de secano aumenta para tratar de cubrir la elevada demanda característica del escenario SP3 y cómo, durante ese periodo, la superficie es superior que la existente bajo los otros dos escenarios. Sin embargo, a partir del 2040 aproximadamente o la suma de la presión por la demanda de otros usos de la tierra así como el alcance de los límites de expansión provoca que esta superficie decrezca, hasta el punto de caer por debajo de las existentes para el escenario SP2. Por otra parte es llamativo el caso de la zona TEMPERATE puesto que en ningún momento aumenta para suplir la demanda de tierras de cultivo, desde el primer momento se ve limitado por la expansión de otros usos de la tierra junto con los límites de expansión. Lo mismo sucede en la zona SNOW, aunque en este caso la caída bajo los tres escenarios es más pronunciada. También destaca el comportamiento en las zonas áridas en las que la superficie crece sin entrar en conflicto con otros usos de la tierra.

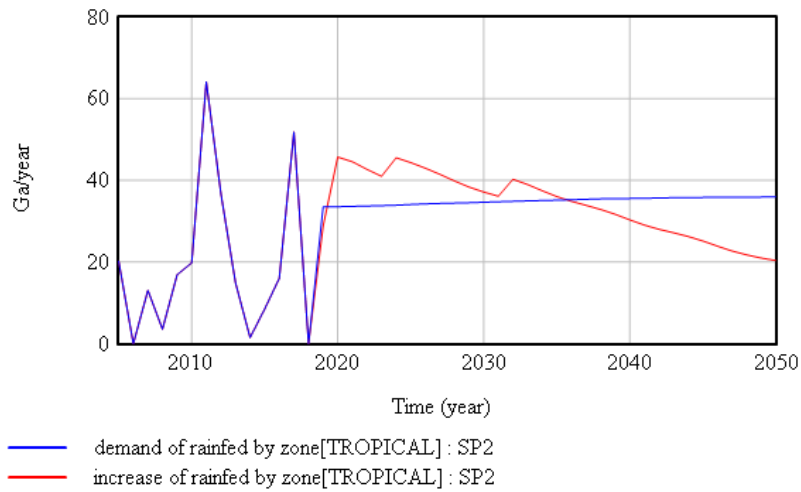
#### Efecto de los límites

El límite no se alcanza de forma brusca sino que, cuando se aproxima el incremento de tierras de cultivo en la región comienza a disminuir y distanciarse de la demanda hasta alcanzar realmente el límite, que es cuando no hay ningún incremento. En todas las zonas comienza a disminuir el incremento, aunque en algunas esto sucede antes que en otras y, en algunas el distanciamiento de la demanda es más rápido y más pronunciado que en otras, lo que causa discrepancias en el comportamiento. En el caso de ARID\_HOT que aunque el incremento comienza a distanciarse de la demanda pero lo hace de forma suave, lo que permite la superficie siga aumentando. Por el contrario, en la zona el distanciamiento es brusco, no hay ningún incremento y se alcanza rápidamente el límite. En este fenómeno se observa con gran claridad la diferencia entre los escenarios. Bajo el escenario SP1 el distanciamiento de la demanda tarda más en producirse y es más leve, mientras que, por el contrario, bajo el escenario SP3 el distanciamiento se produce mucho antes y de manera más pronunciada. Se ilustra en estas diferencias para la zona TROPICAL (Figura 6.26 a Figura 6.28), el resultado es similar para el resto de zonas.

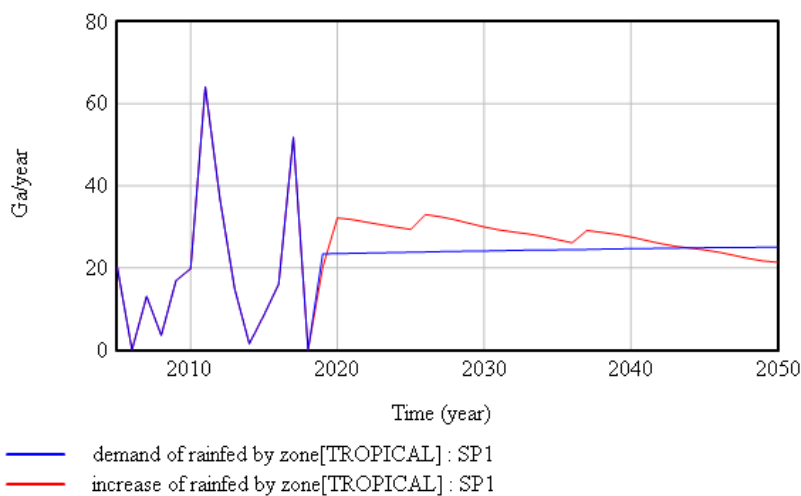
Los aumentos por encima de la demanda que se observan se explican por la pérdida de tierras de cultivos de regadío debido a la escasez de agua en la zona.



**Figura 6.26.** Efecto de los límites de expansión de las tierras de cultivo en la zona TROPICAL, escenario SP3, 2005-2050 (Fuente: Creación propia)



**Figura 6.27.** Efecto de los límites de expansión de las tierras de cultivo en la zona TROPICAL, escenario SP2, 2005-2050 (Fuente: Creación propia)



**Figura 6.28.** Efecto de los límites de expansión de las tierras de cultivo en la zona TROPICAL, escenario SP1, 2005-2050 (Fuente: Creación propia)

Tierras de cultivo de regadío

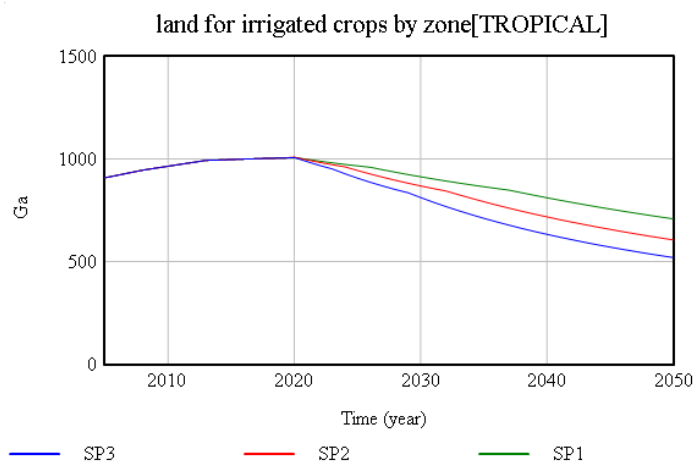


Figura 6.29. Evolución de las tierras de cultivo de regadío en la zona TROPICAL bajo cada escenario, 2005-2050 (Fuente: Creación propia)

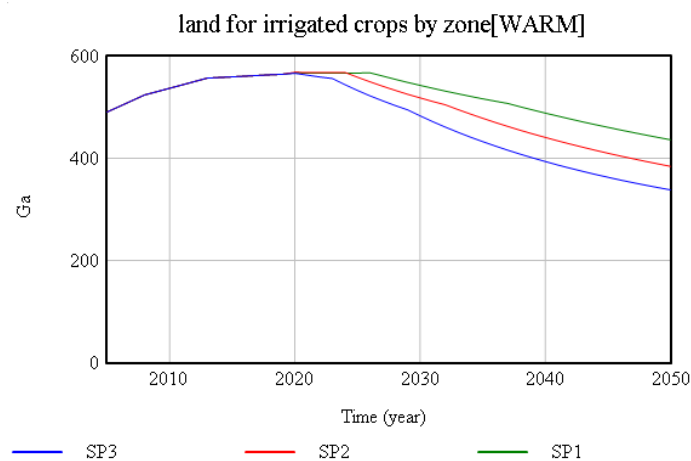


Figura 6.30. Evolución de las tierras de cultivo de regadío en la zona WARM bajo cada escenario, 2005-2050 (Fuente: Creación propia)

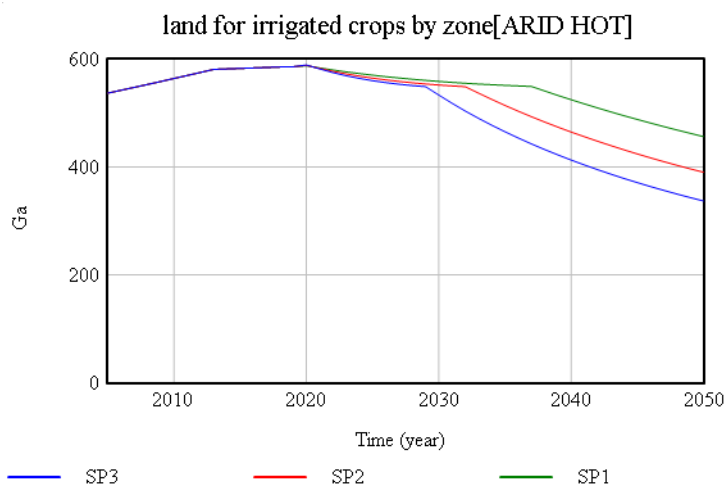
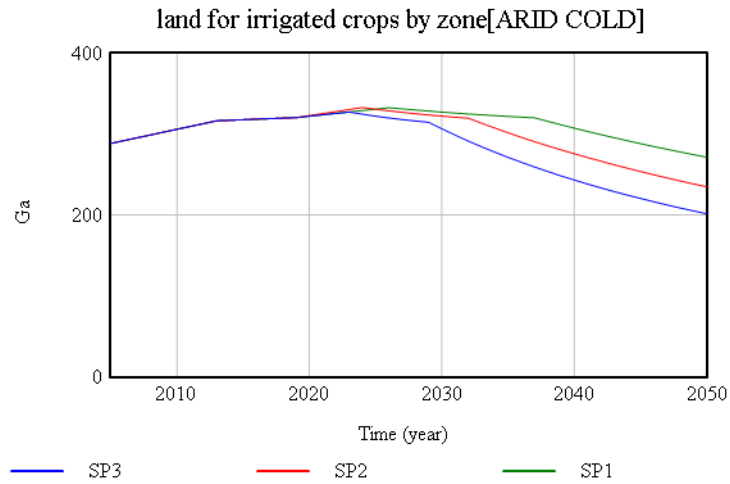
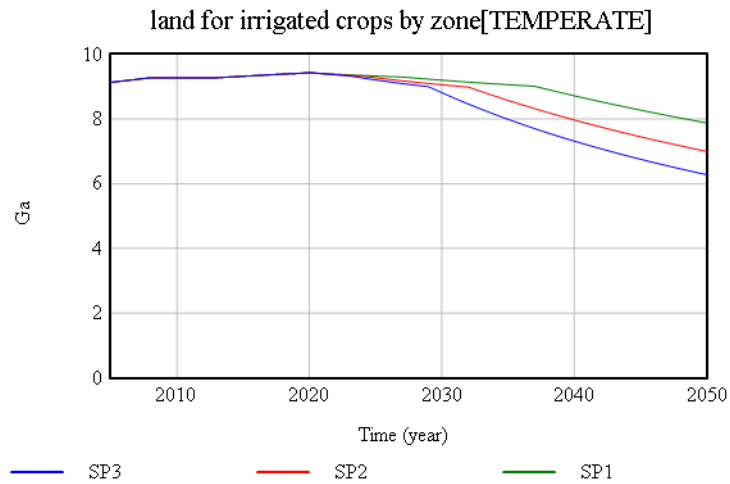


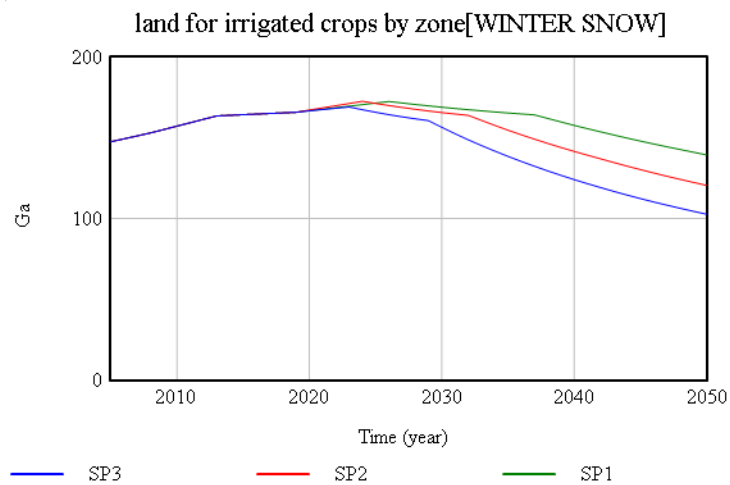
Figura 6.31. Evolución de las tierras de cultivo de regadío en la zona ARID\_HOT bajo cada escenario, 2005-2050 (Fuente: Creación propia)



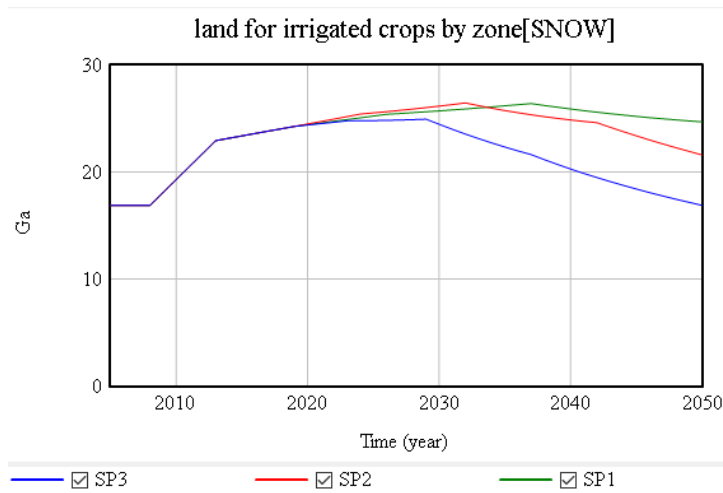
**Figura 6.32.** Evolución de las tierras de cultivo de regadío en la zona ARID\_COLD bajo cada escenario, 2005-2050 (Fuente: Creación propia)



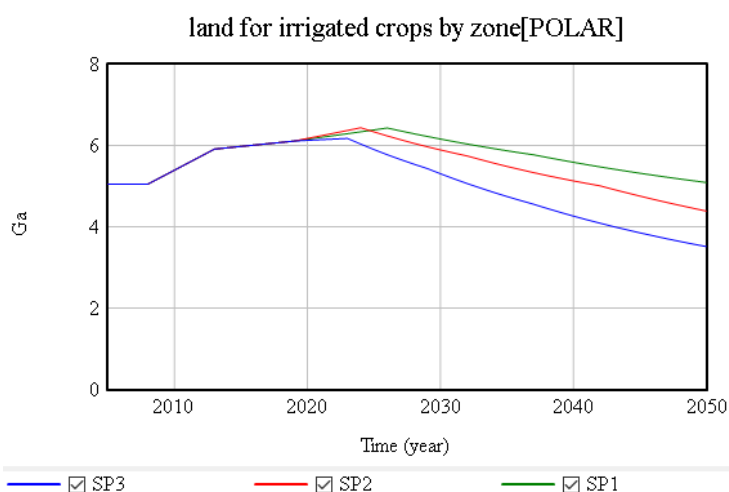
**Figura 6.33.** Evolución de las tierras de cultivo de regadío en la zona TEMPERATE bajo cada escenario, 2005-2050 (Fuente: Creación propia)



**Figura 6.34.** Evolución de las tierras de cultivo de regadío en la zona WINTER\_SNOW bajo cada escenario, 2005-2050 (Fuente: Creación propia)



**Figura 6.35.** Evolución de las tierras de cultivo de regadío en la zona SNOW bajo cada escenario, 2005-2050 (Fuente: Creación propia)

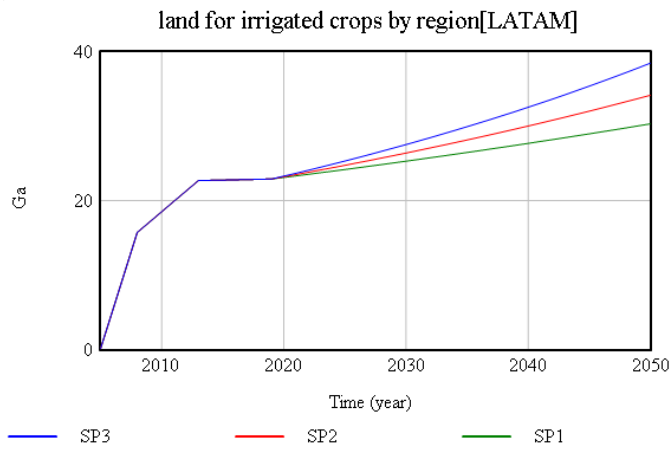


**Figura 6.36.** Evolución de las tierras de cultivo de regadío en la zona POLAR bajo cada escenario, 2005-2050 (Fuente: Creación propia)

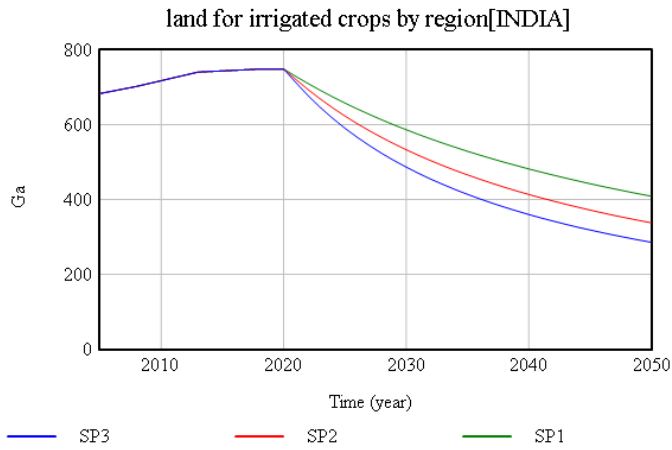
La tendencia de las tierras de cultivo de regadío (Figura 6.29 a Figura 6.36) refleja claramente las diferencias entre los escenarios, entre el SP1 y SP3 fundamentalmente. Mientras que en muchos casos en el SP3 la superficie ni siquiera llega a aumentar puesto que la escasez de agua aparece tan rápido que directamente disminuyen las tierras de regadío, en el SP1 aumentan durante unos años y aunque unos años más tarde empiezan decaer, lo hacen de una forma mucho más moderada. Es especialmente llamativo el comportamiento en la zona TROPICAL, puesto que en ningún momento la superficie aumenta. Es aún más llamativo teniendo en cuenta que gran parte de la región LATAM pertenece a la zona TROPICAL y esta es la región en la que más potencial de expansión, y por tanto menor escasez, existe y así lo reflejan los escenarios, bajo todos ellos la superficie de tierras de regadío en LATAM aumenta (Figura 6.37). Se interpreta por tanto, que la caída de la zona TROPICAL se deben las pérdidas de INDIA, región con un estrés hídrico



especialmente elevado (Figura 6.38) y, en menor medida a las de EASOC, que son dos regiones con gran superficie de tierras de regadío dentro de la región.



**Figura 6.37.** Evolución de las tierras de cultivo de regadío en la región LATAM bajo cada escenario, 2005-2050 (Fuente: Creación propia)



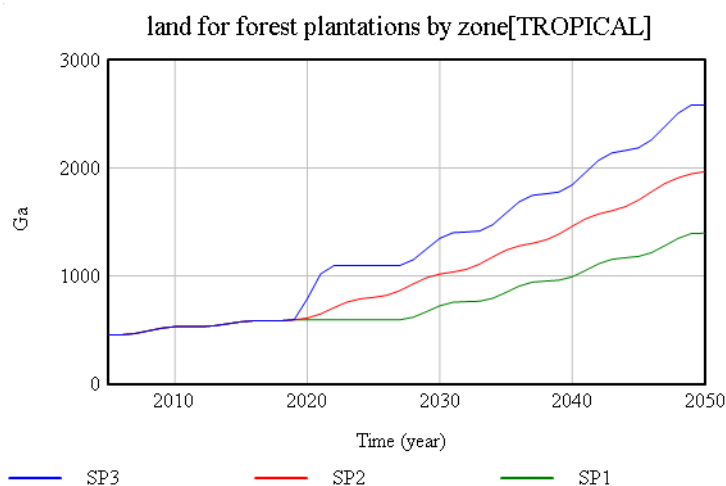
**Figura 6.38.** Evolución de las tierras de cultivo de regadío en la región INDIA bajo cada escenario, 2005-2050 (Fuente: Creación propia)



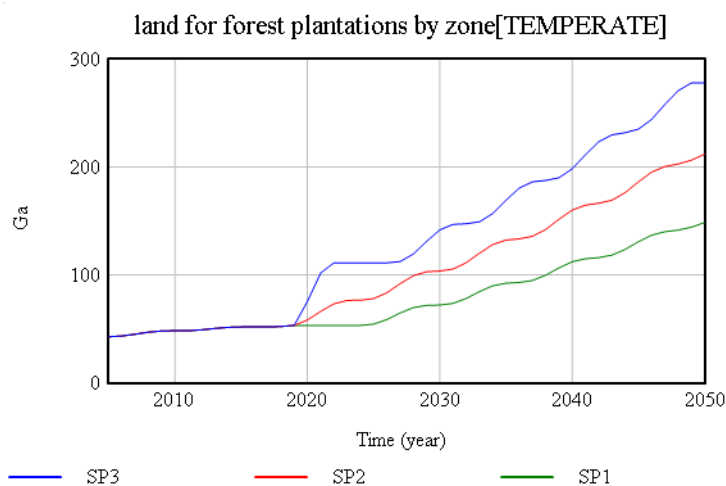
### 6.2.1.4. Bosques

En este apartado se presentan las gráficas referentes a la superficie forestal, tanto bosques gestionados, bosques primarios y plantaciones entre 2005 y 2050 para los tres escenarios. También se muestra el efecto de la política de protección de bosques primarios.

#### Plantaciones



**Figura 6.39.** Evolución de las plantaciones forestales en la zona TROPICAL bajo cada escenario, 2005-2050 (Fuente: Creación propia)



**Figura 6.40.** Evolución de las plantaciones forestales en la zona TEMPERATE bajo cada escenario, 2005-2050 (Fuente: Creación propia)

Se presenta la tendencia de la superficie de plantaciones bajo cada escenario para las zonas TROPICAL (Figura 6.39) y zona TEMPERATE (Figura 6.40), en el resto de las zonas la tendencia es la misma, un aumento más moderado bajo el escenario SP1 y más pronunciado bajo el escenario SP3. La pendiente con la que aumenta la superficie depende del aumento de la demanda de madera en la región así como del aumento del porcentaje de esa madera que se extrae de las plantaciones y de la productividad de las plantaciones en esa zona.



También de la tasa de madera que se desee extraer de ellas. Como mencionaba la literatura, bajo cualquiera de los escenarios un aumento significativo de la superficie de plantaciones es esperado.

Bosques gestionados y bosques primarios

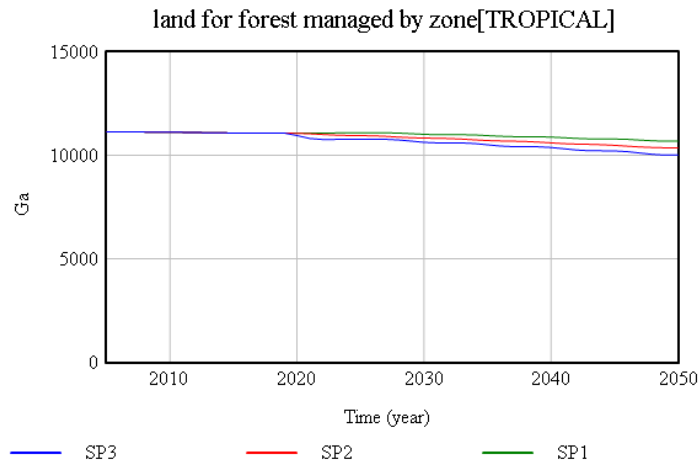


Figura 6.41. Evolución de los bosques gestionados en la zona TROPICAL bajo cada escenario, 2005-2050 (Fuente: Creación propia)

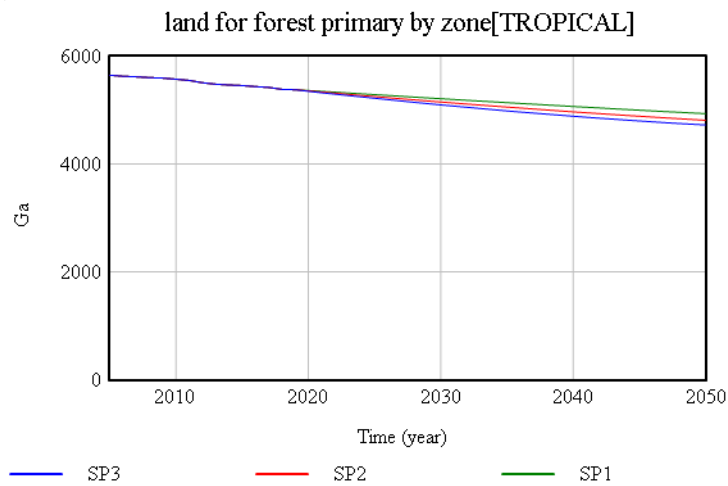


Figura 6.42. Evolución de los bosques primarios en la zona TROPICAL bajo cada escenario, 2005-2050

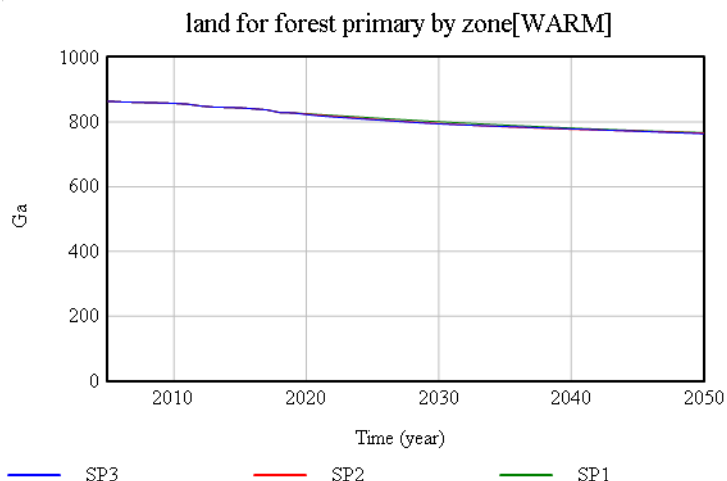


Figura 6.43. Evolución de los bosques primarios en la zona WARM bajo cada escenario, 2005-2050 (Fuente: Creación propia)

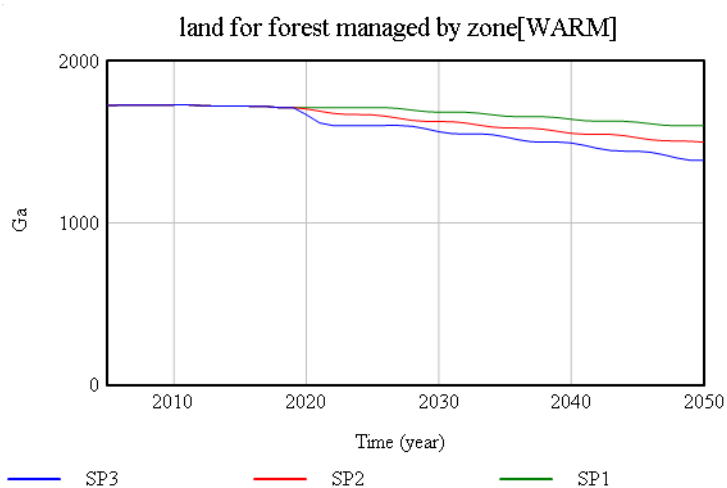


Figura 6.44. Evolución de los bosques gestionados en la zona WARM bajo cada escenario, 2005-2050 (Fuente: Creación propia)

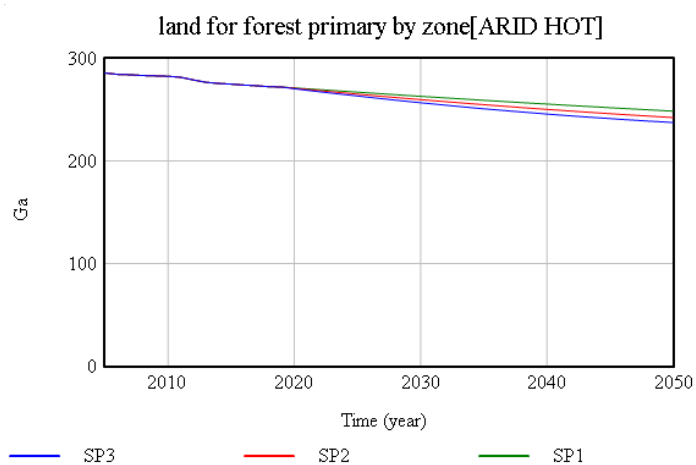


Figura 6.45. Evolución de los bosques primarios en la zona ARID\_HOT bajo cada escenario, 2005-2050 (Fuente: Creación propia)

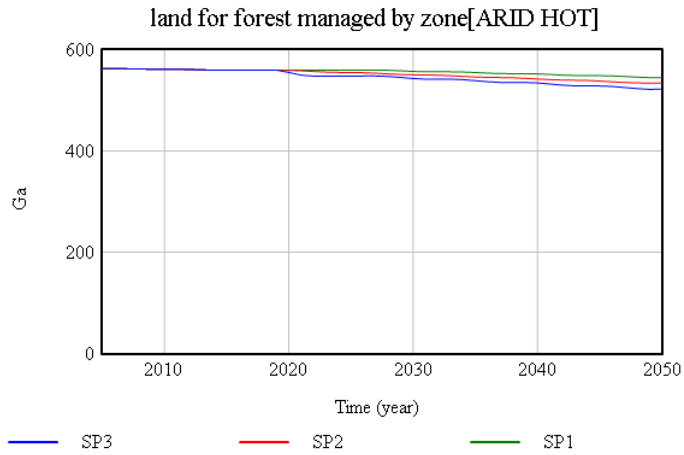


Figura 6.46. Evolución de los bosques gestionados en la zona ARID\_HOT bajo cada escenario, 2005-2050 (Fuente: Creación propia)

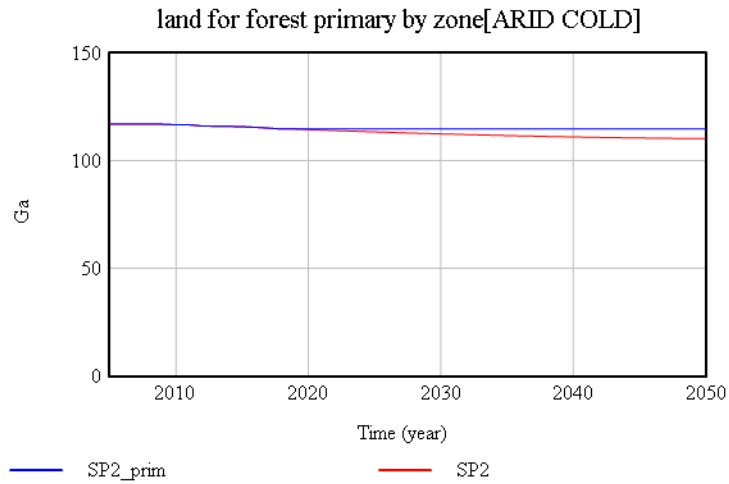


Figura 6.47. Evolución de los bosques primarios en la zona ARID\_COLD bajo cada escenario, 2005-2050 (Fuente: Creación propia)

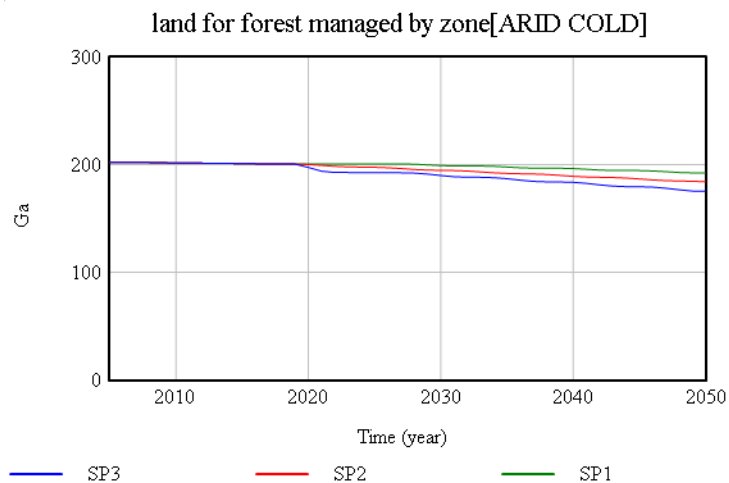
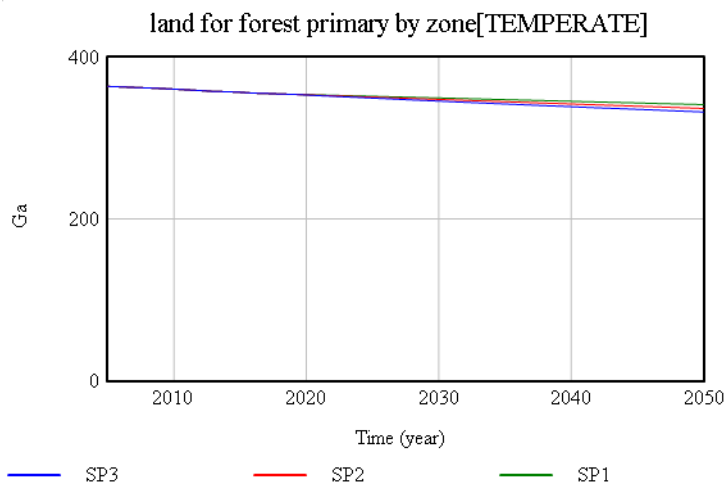
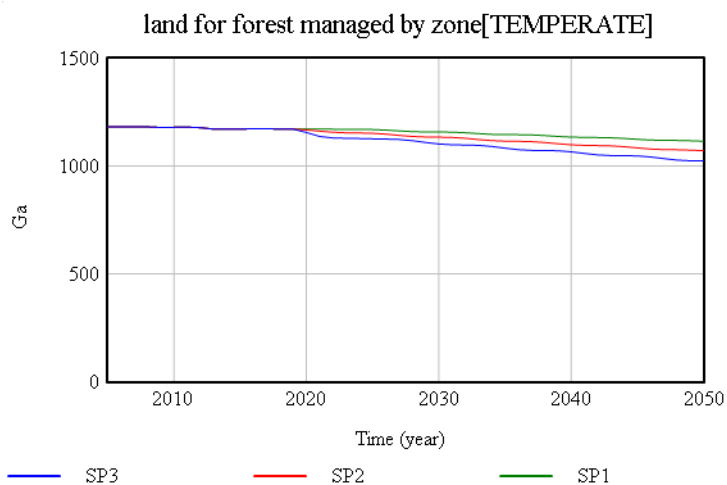


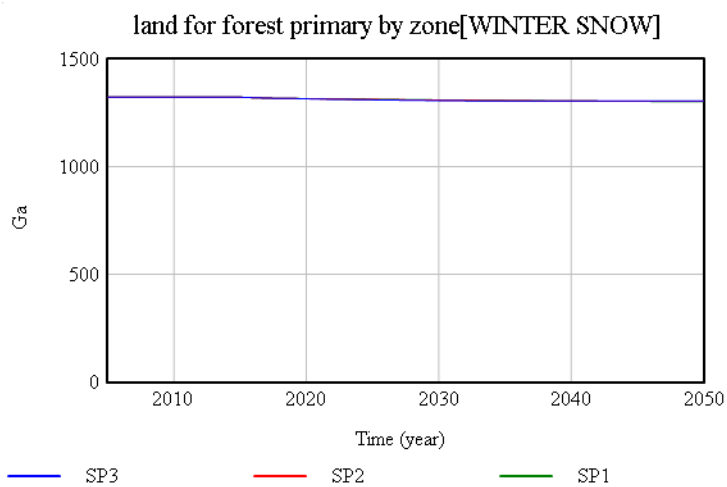
Figura 6.48. Evolución de los bosques gestionados en la zona ARID\_COLD bajo cada escenario, 2005-2050 (Fuente: Creación propia)



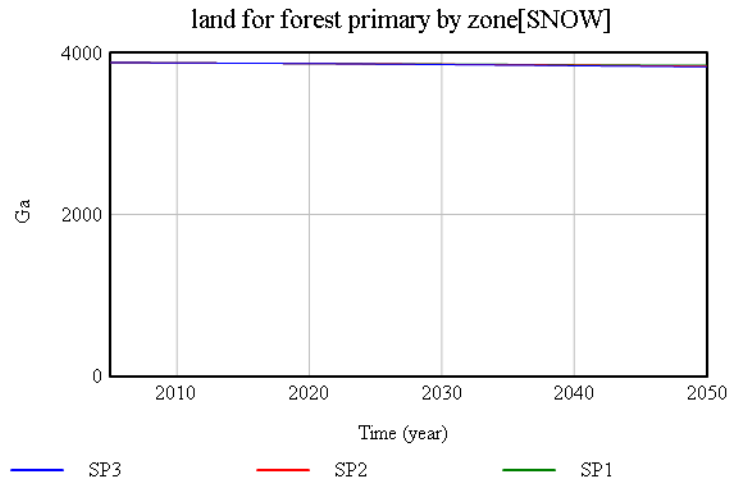
**Figura 6.49.** Evolución de los bosques primarios en la zona TEMPERATE bajo cada escenario, 2005-2050 (Fuente: Creación propia)



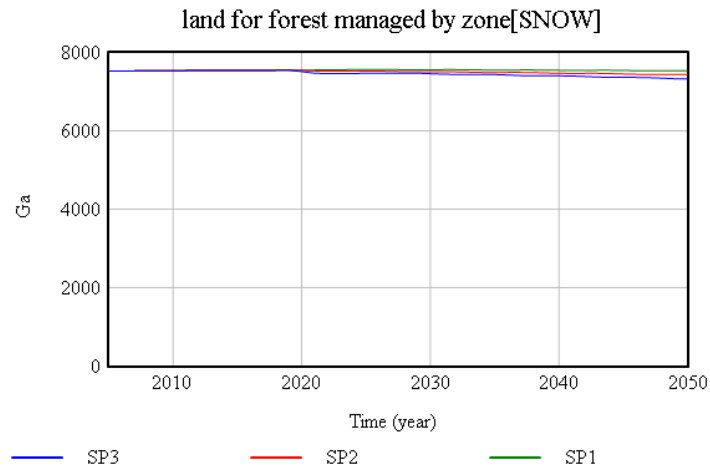
**Figura 6.50.** Evolución de los bosques gestionados en la zona TEMPERATE bajo cada escenario, 2005-2050 (Fuente: Creación propia)



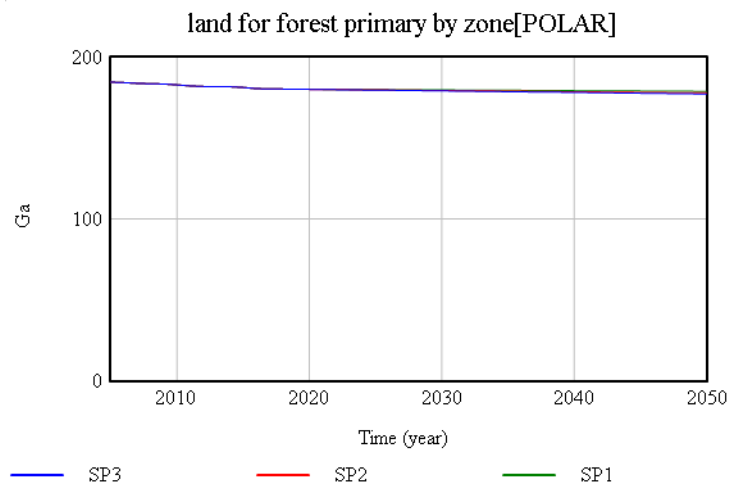
**Figura 6.51.** Evolución de los bosques primarios en la zona WINTER\_SNOW bajo cada escenario, 2005-2050 (Fuente: Creación propia)



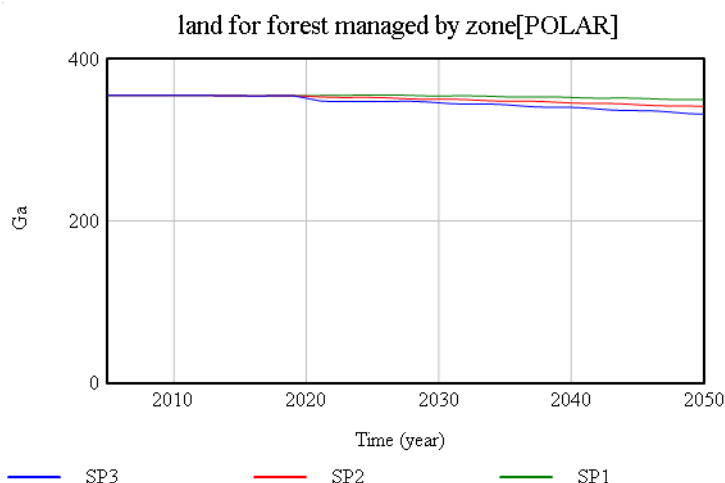
**Figura 6.52.** Evolución de los bosques primarios en la zona SNOW bajo cada escenario, 2005-2050 (Fuente: Creación propia)



**Figura 6.53.** Evolución de los bosques gestionados en la zona SNOW bajo cada escenario, 2005-2050 (Fuente: Creación propia)



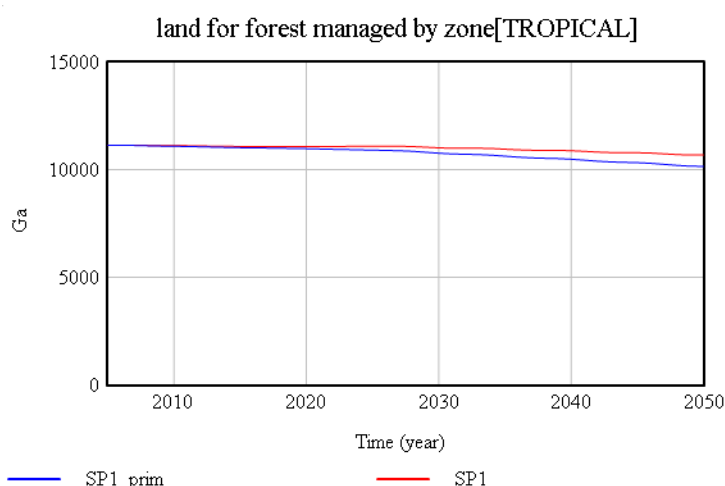
**Figura 6.54.** Evolución de los bosques primarios en la zona POLAR bajo cada escenario, 2005-2050 (Fuente: Creación propia)



**Figura 6.55.** Evolución de los bosques gestionados en la zona POLAR bajo cada escenario, 2005-2050 (Fuente: Creación propia)

En las figuras anteriores (Figura 6.41 a Figura 6.55) se presenta la tendencia de los bosques primarios y gestionados bajo cada escenario en cada zona. En algunas zonas, especialmente en las frías, se observa que no hay pérdida de bosques primarios, se mantienen constantes, porque la agricultura y la ganadería no se expanden a su costa ni sirve de fuente de extracción de madera. Por otra parte, en los bosques gestionados y en los primarios que sí decrecen se observa cómo la presión ejercida por la expansión de otros usos de la tierra acaba traducándose en un aumento pérdida de bosques, mayor en el escenario SP3 y menor en el SP1.

Efecto de la protección de los bosques primarios



**Figura 6.56.** Efecto de la política de protección de bosque primario en la zona TROPICAL, escenario SP1, 2005-2050 (Fuente: Creación propia)

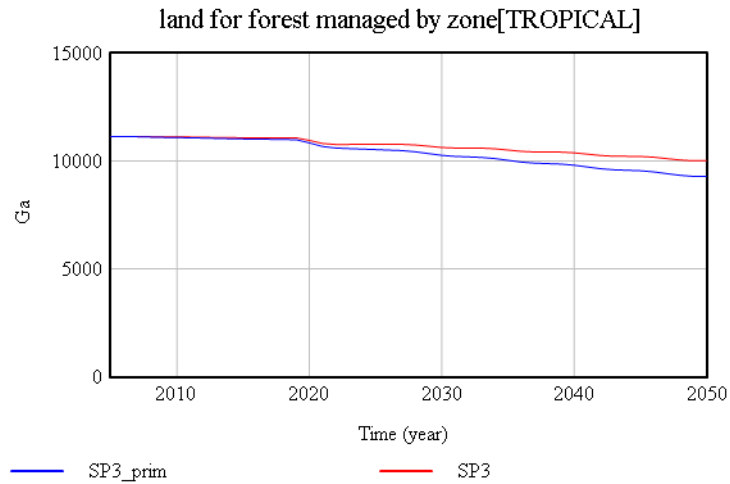


Figura 6.57. Efecto de la política de protección de bosque primario en la zona TROPICAL, escenario SP3, 2005-2050 (Fuente: Creación propia)

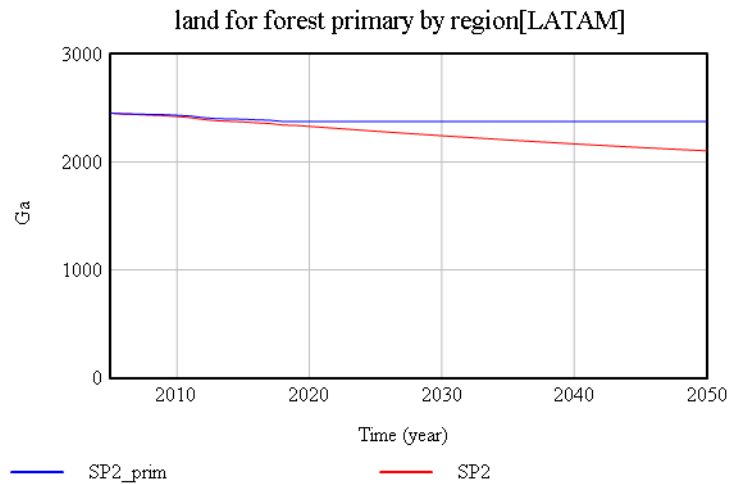


Figura 6.58. Efecto de la política de protección de bosque primario en la región LATAM, escenario SP2, 2005-2050 (Fuente: Creación propia)

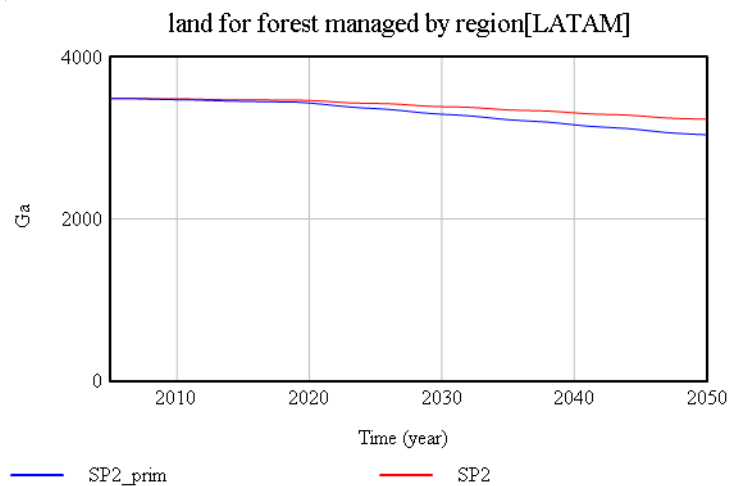


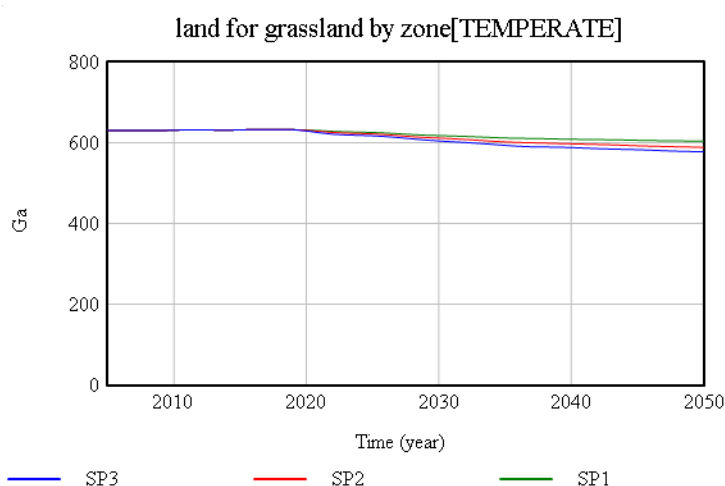
Figura 6.59. Efecto de la política de protección de bosque primario en la región LATAM, escenario SP2, 2005-2050 (Fuente: Creación propia)



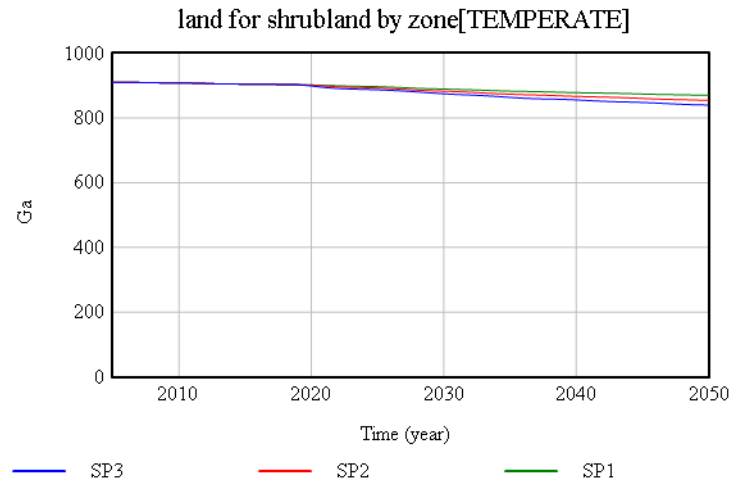
Se simulan los escenarios incorporando la política de protección de los bosques primarios con el objetivo de observar su efecto. Este se presenta para la zona TROPICAL (Figura 6.56 y Figura 6.57), pues es donde resulta más relevante al ser la zona con mayor superficie de bosque primario. Se observa que la protección del bosque primario se convierte en una reducción del bosque gestionado, menor en el escenario SP1 y mayor en el SP3, del mismo modo si se permitiese la pérdida de bosque primario esta sería que sería menor bajo el escenario SP1 y mayor bajo el escenario SP3. Se presentan también las consecuencias de la protección en la región LATAM pues la literatura indica que es la región en la cual mayor presión se ejerce sobre los bosques primarios. Se observa que los bosques primarios se protegen de manera efectiva y se evita la gran pérdida que se produciría de no haber protección (Figura 6.58) pero también que esta se convierte en pérdida de bosque gestionado (Figura 6.59).

### 6.2.1.5 Otras tierras

En este apartado se presentan las gráficas referentes a la superficie de tierras para pastoreo, tierras de matorrales y otras tierras (desierto, roca y hielo) entre 2005 y 2050 para los tres escenarios.

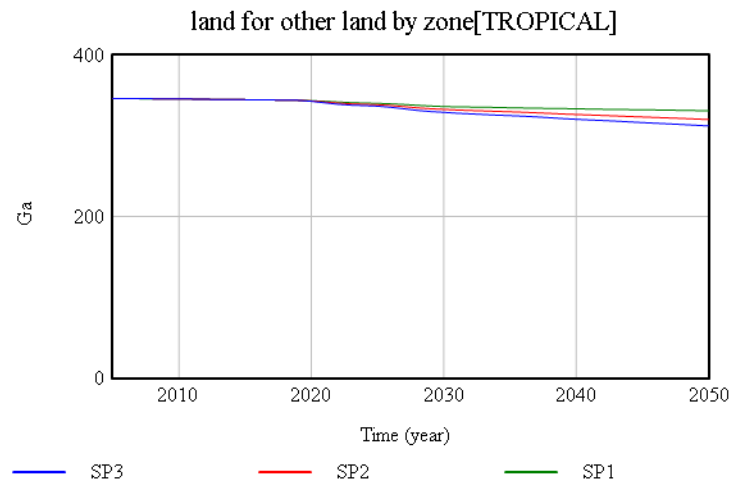


**Figura 6.60.** Evolución de las tierras de pastoreo en la zona TEMPERATE bajo cada escenario, 2005-2050 (Fuente: Creación propia)

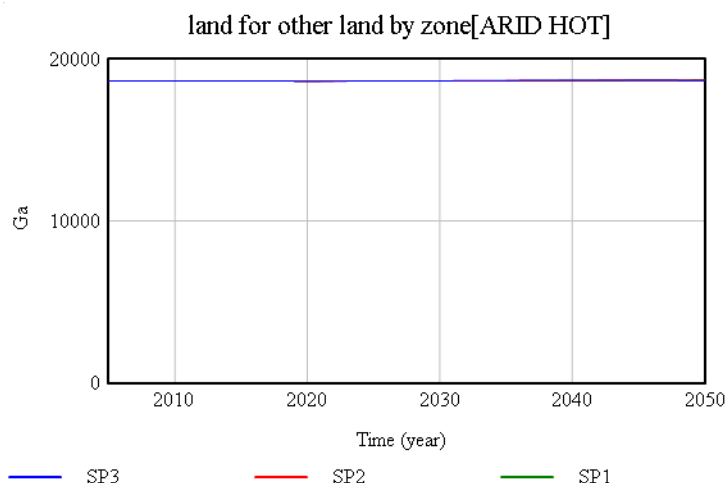


**Figura 6.61.** Evolución de las tierras de matorrales en la zona TEMPERATE bajo cada escenario, 2005-2050 (Fuente: Creación propia)

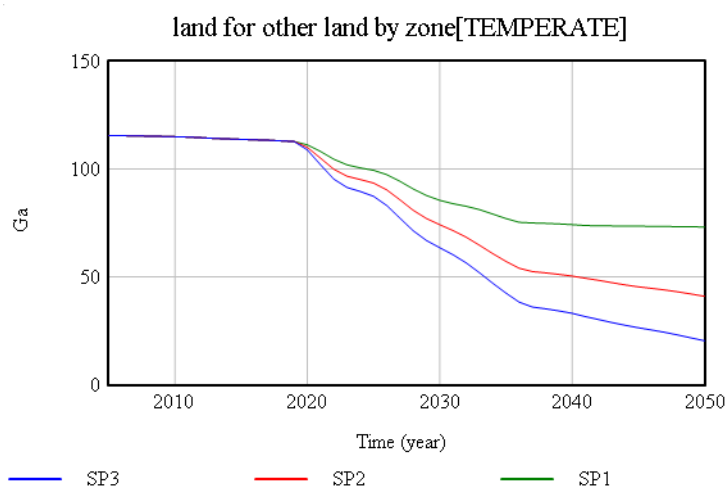
Las tierras pastoreo de y las tierras de matorrales disminuyen a lo largo el tiempo bajo todos los escenarios debido a la demanda de otros uso de la tierra. Esta disminución es más pronunciada bajo el escenario SP3 y menor bajo el SP1, como era de esperar. En la Figura 6.60 y Figura 6.61, se muestra a modo de ejemplo la tendencia en la zona TEMPERATE, para tierras de pastoreo y matorrales respectivamente. En el resto de zonas las gráficas resultan muy similares.



**Figura 6.62.** Evolución de la superficie de “otras tierras” en la zona TROPICAL bajo cada escenario, 2005-2050 (Fuente: Creación propia)



**Figura 6.63.** Evolución de la superficie de “otras tierras” en la zona ARID\_HOT bajo cada escenario, 2005-2050 (Fuente: Creación propia)



**Figura 6.64.** Evolución de la superficie de “otras tierras” en la zona TEMPERATE bajo cada escenario, 2005-2050 (Fuente: Creación propia)

La evolución de la superficie de otros usos del suelo es, en todas las zonas, muy similar a la que se presenta para la zona TROPICAL en la Figura 6.62. Dicha tendencia sigue la línea de lo descrito para tierras de pastoreo y matorrales. Son una excepción el comportamiento en la zona ARID\_HOT (Figura 6.63) y la zona TEMPERATE (Figura 6.64). En la zona ARID\_HOT aunque la diferencia entre escenarios no parece grande se aprecia que bajo el escenario SP3 la superficie aumenta, lo cual se explica por la elevada pérdida de tierras de cultivo de regadío debido a la escasez de agua (desertización) aunque resulta extraño pues podría esperarse su disminución debido al uso de esta superficie para la producción de energía solar. En la zona templada por su parte se observan elevadas pérdidas, probablemente debidas a la elevada demanda de tierras para solar en esa zona.



### 6.2.2. Discusión

En las simulaciones se ha podido observar, en todas las regiones, un aumento de la superficie urbana, debido al aumento de la población y un aumento de la tierra para solar, debido a la transición hacia el uso de energías renovables. Se observa también un crecimiento de la superficie de plantaciones, debido a la mayor demanda de madera y el aumento del porcentaje de esta que se cubre con madera de las plantaciones. También, se ha podido observar que en ocasiones la demanda de cultivos no es cubierta, o bien porque la escasez de agua causa la pérdida de tierras de regadío, porque se alcanzan los límites de expansión de las tierras de cultivo de secano relacionados con la calidad de las tierras, o porque la expansión de la superficie urbana y de la tierra para solar genera la pérdida de las tierras de cultivo. Por último, se ha constatado que habitualmente los más perjudicados son los bosques, puesto que la transformación de las tierras de cultivo en otros usos aumenta la presión sobre estos, provocando sean convertidos en nuevas tierras de cultivo.

Bajo el escenario 3 y bajo el escenario 2, aunque en menor medida, no solo se deja de cubrir la demanda de tierras de cultivo y de tierras de regadío sino que estas disminuyen. Esto representa un problema pues existe una población creciente, que no ha cambiado sus dietas y que demanda más alimento mientras disminuyen las tierras de cultivo. Lo mismo sucede con la demanda de carne y las tierras de pastoreo. Podría creerse que esta diferencia se podría cubrir con avances tecnológicos y una mejora de la productividad de los cultivos, sin embargo, la realidad es que las tierras más productivas, que son las de regadío con las primeras en decrecer algunas incluso pierden la mitad de su superficie inicial debido al crecimiento de la escasez de agua. Además, la intensificación de la agricultura solo derivaría en la degradación de la tierra con su consiguiente necesidad de nuevas tierras de cultivo lo cual, en vistas de la situación, no parece ser muy viable.

Por otra parte, se ha demostrado que la política de protección de los bosques primarios no representa una alternativa viable si el único objetivo es la protección de este. Puesto que, si las antiguas pérdidas de bosque primario se traducen en pérdidas de bosque gestionado la problemática persiste. Los bosques son los grandes perjudicados de la constante demanda de tierras productivas pues representan una superficie accesible y de suelo fértil muy atractiva para su conversión en tierras de cultivo u otro uso. No solo no existe una producción necesaria de recuperar una vez se pierde la tierra, sino que tiene una doble ventaja de la tala se consigue nueva superficie y madera. En los resultados mostrados, las pérdidas de bosque podrían parecer pequeñas, por ejemplo, en el bosque tropical aunque se observa una disminución esta no es una caída muy pronunciada, sin embargo, es una pérdida de miles de giga áreas, lo cual conlleva la pérdida de la absorción de toneladas de  $CO_2$ . Este



problema no puede ser cubierto por los bosques de plantaciones pues su capacidad de absorción es menor que la de los bosques naturales y se pierde o libera una vez son talados para madera. Todo esto pone en entredicho que sea posible establecer políticas de transición hacia el uso de energías renovables aumentando la extracción de biomasa y, a la vez, promover políticas para el aumento de la absorción de carbono en los bosques para el compensar el cambio climático.

Aunque la producción de energía solar en los tejados de la superficie urbana suele presentarse como una buena alternativa a los paneles solares situados sobre la superficie terrestre dado que no compiten por tierra, se ha podido observar que el incorporar o eliminar esta producción no tiene un gran efecto sobre la demanda de tierra para solar. Lo cual indica que quizá se está sobreestimando su potencial pues se debe tener en cuenta su menor efectividad respecto a los paneles situados sobre la superficie terrestres y las limitaciones respecto a dónde instalarlas. Algo similar ocurre con la forestación que a pesar de ponerse en marcha en todas las regiones se observa que no es capaz de suplir la pérdida de bosques. Podría extraerse como conclusión que en muchas ocasiones se trata de solucionar problemas grandes con soluciones pequeñas, es decir, se busca tomar un camino fácil con la esperanza de que este sea suficiente.

En la línea de esta última reflexión, se ha podido observar que en ocasiones las soluciones acaban acrecentando el problema más que resolviéndolo. Es el caso de las plantaciones y la tierra solar. Gran parte de los cambios del suelo, entre ellos la deforestación, que se observan, así como la escasez de alimentos derivada incapacidad de expansión agrícola, son producto de la expansión de este tipo de tierras que nacen, para tratar de aliviar la presión sobre los bosques en el caso de las plantaciones, y reducir las emisiones en el caso de la energía solar, y que acaban teniendo el efecto contrario.

Parece entonces que la solución no pasa por adoptar ninguna de estas medidas sino por realizar un verdadero cambio de costumbres y tendencias. En los resultados se ha podido observar que el único escenario en el que las consecuencias no parecían ser negativas es en el que la demanda de energía se veía globalmente reducida de manera significativa. Aun así, seguía habiendo pérdida de tierras de regadío y pérdidas forestales lo que podría ser un indicador de que nuestro consumo actual es tan elevado que para alcanzar una situación sostenible es necesario una importante reducción del consumo y un gran cambio de las costumbres. Aunque también es cierto que una vez comienza el cambio es más fácil adaptarse a adversidades, como por ejemplo resulta más fácil adaptarse a la escasez de carne si ya se ha comenzado un cambio hacia una sociedad menos consumidora de este producto.



Otra de las cosas que destacan es que en algunas regiones o zonas los cambios de uso del suelo o las demandas no son tan pronunciadas como en otras. Lo que parece indicar que las políticas adoptadas por unos pocos tienen consecuencias globales y que, a menudo, los cambios positivos en una región se hacen a costa de generar efectos negativos en otra, como puede ser el caso de la forestación en Europa a costa de la deforestación en Latinoamérica.



## **7. CONCLUSIONES**

### **7.1. Conclusiones personales**

Se ha desarrollado un modelo de DS, utilizando el programa Vensim, sobre los cambios de uso del suelo para su integración en WILIAM. Cabe destacar que este ha sido desarrollado siguiendo la nomenclatura y estructura definida por el proyecto LOCOMOTION para facilitar la futura integración. En primer lugar, se ha llevado a cabo una revisión bibliográfica para profundizar en el conocimiento de los cambios de uso del suelo, lo que ha permitido conocer las principales variables que afectan al sistema de uso del suelo y diseñar la estructura del modelo. A partir de la misma se han obtenido también los datos necesarios para cuantificar los cambios de uso del suelo a través de ecuaciones. Los resultados del modelo bajo los históricos se han comparado con los datos de la evolución histórica de cada uso del suelo obtenidos de la base de datos de FAOSTAT con intención de comprobar si el funcionamiento del modelo es bueno. Por último, se han diseñado tres escenarios en la línea de la narrativa de los escenarios SSP. Gracias a estos se ha podido simular el modelo bajo diferentes situaciones, lo que ha permitido estudiar y analizar las consecuencias en cada caso.

La comparación con los datos históricos muestra que el funcionamiento del modelo es bueno y que, aunque existen errores estos no son significativos y no afectan al desarrollo del mismo. Los resultados obtenidos en las simulaciones bajo cada uno de los escenarios, permiten observar que, en ocasiones, las medidas que se adoptan como solución de un problema, por ejemplo, el uso de plantaciones para aliviar la presión sobre los bosques o la transición hacia las energías renovables para reducir el uso de combustibles fósiles, pueden agravar el problema en lugar de solucionarlo. En la línea de este primer descubrimiento, se ha constatado también que algunas de las políticas que se adoptan con el objetivo de actuar sobre un factor no tienen un efecto significativo sobre el mismo. Es el caso de la producción de energía solar en las cubiertas de la superficie urbana, la protección de algunas zonas de bosque o la forestación, que, aunque evidentemente ayudan, no son por sí solas suficientes para solucionar un problema de esta magnitud.

Parece claro entonces que la solución pasa por llevar a cabo un cambio radical de las costumbres y tendencias actuales. Especialmente es necesaria una reducción del consumo y un uso más eficiente de los recursos. Únicamente con una reducción de la demanda de energía, un cambio de las dietas y la disminución del desperdicio podrá observarse una mejora respecto a la situación actual, aunque el riesgo de alcanzar los límites planetarios aún existe.



## **7.2. Futuras líneas de trabajo**

En el presente TFG se presenta el sub-módulo de distribución de los usos de la tierra como un modelo aislado, independiente del conjunto. El siguiente paso será, en primer lugar, definir de forma más completa las relaciones del sub-módulo con el resto de partes del modelo, identificar las variables por las que se ve afectado y definir las nuevas ecuaciones. Una vez llevado a cabo este análisis el trabajo será integrar el sub-módulo dentro de WILLIAM y unirlo con las variables de estos módulos mencionados, creando las realimentaciones que caracterizan el funcionamiento planetario. Por último, en una fase futura podrán probarse escenarios más desarrollados y observar cómo afectan los cambios económicos y ambientales a los cambios de uso de la tierra.





## **8. REFERENCIAS**

- Adeh, E. H., Good, S. P., Calaf, M., & Higgins, C. W. (2019). Solar PV Power Potential is Greatest Over Croplands. *Scientific Reports*, 9(1), 1–6. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47803-3>
- Aracil, J. (1997). *Dinámica de sistemas*. [https://www.academia.edu/8563256/Dinámica\\_de\\_sistemas\\_Javier\\_Aracil](https://www.academia.edu/8563256/Dinámica_de_sistemas_Javier_Aracil)
- Bastin, J. F., Finegold, Y., Garcia, C., Mollicone, D., Rezende, M., Routh, D., Zohner, C. M., & Crowther, T. W. (2019). The global tree restoration potential. *Science*, 364(6448), 76–79. <https://doi.org/10.1126/science.aax0848>
- Bestelmeyer, B. T., Okin, G. S., Duniway, M. C., Archer, S. R., Sayre, N. F., Williamson, J. C., & Herrick, J. E. (2015). Desertification, land use, and the transformation of global drylands. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 13(1), 28–36. <https://doi.org/10.1890/140162>
- Bett, B. et al. (2019). *Sustainable Food Systems and Agriculture*.
- Bjørn, A., Sim, S., King, H., Keys, P., Wang-Erlandsson, L., Cornell, S. E., Margni, M., & Bulle, C. (2019). Challenges and opportunities towards improved application of the planetary boundary for land-system change in life cycle assessment of products. *Science of the Total Environment*, 696(August). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133964>
- Blanco-Canqui, H. (2016). Growing Dedicated Energy Crops on Marginal Lands and Ecosystem Services. *Soil Science Society of America Journal*, 80(4), 845–858. <https://doi.org/10.2136/sssaj2016.03.0080>
- Briassoulis, H. (2019). *The Web Book of Regional Science Sponsored by Analysis of Land Use Change: Theoretical and Modeling Approaches By Helen Briassoulis*. 248.
- Burrell, A. L., Evans, J. P., & Kauwe, M. G. De. (2015). Anthropogenic climate change has driven over 5 million km<sup>2</sup> of drylands towards desertification. *Nature Communications*, 2020, 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17710-7>
- Capellán-Pérez, I., de Castro, C., & Arto, I. (2017). Assessing vulnerabilities and limits in the transition to renewable energies: Land requirements under 100% solar energy scenarios. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77(September 2016), 760–782. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.137>
- Chapagain, A. K., & James, K. (2013). Accounting for the Impact of Food Waste on Water Resources and Climate Change. *Food Industry Wastes*, November, 217–236. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-391921-2.00012-3>
- Chester Energy and Policy. (2019). *Floatovoltaics: Clever Innovation or Solution in Search of a Problem?* <https://chesterenergyandpolicy.com/2019/09/19/floatovoltaics-clever-innovation-or-solution-in-search-of-a-problem/>



- Cox, P. M., Betts, R. A., Collins, M., Harris, P. P., Huntingford, C., & Jones, C. D. (2004). Amazonian forest dieback under climate-carbon cycle projections for the 21st century. *Theoretical and Applied Climatology*, 78, 137–156. <https://doi.org/10.1007/s00704-004-0049-4>
- Crespo, Y. et al. (2020). *Deliverable 9.1. Report of the common modeling framework*.
- de Blas Sanz, I.; Capellán-Pérez, I.; Carpintero Redondo, Ó.; De Castro, C.; Frechoso, F.; Lobejón, L.F.; Lomas Huertas, P.L.; Mediavilla, M.; Miguel, L.J.; Nieto, J.; Rodrigo, P. (2018). *D4.2 MEDEAS Model and IOA implementation at European geographical level*.
- De Castro, C., Mediavilla, M., Miguel, L. J., & Frechoso, F. (2013). Global solar electric potential: A review of their technical and sustainable limits. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28, 824–835. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.040>
- di Gregorio, A., Jaffrain, G., & Weber, J.-L. (2011). Land cover mapping, land cover classifications, and accounting units. *Meta*, 3, 1–29.
- Dinesh, H., & Pearce, J. M. (2016). The potential of agrivoltaic systems. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.024>
- Dupont, E., Koppelaar, R., & Jeanmart, H. (2020). Global available solar energy under physical and energy return on investment constraints. *Applied Energy*, 257. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113968>
- ESA. (n.d.). *CCI-map-viewer*. <https://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/>
- ESA CCI-LC. (2017). *Land Cover CCI. PRODUCT USER GUIDE. VERSION 2.0*.
- FAO. (1994). *Water quality evolution*. <http://www.fao.org/3/t0234e/t0234e01.htm>
- FAO. (2007). *AQUASTAT*. In *FAO Newsroom*. <http://www.fao.org/Newsroom/en/news/2007/1000726/index.html>
- FAO. (2016). Forests and agriculture: land-use challenges and opportunities. In *State of the World's Forests* (Vol. 45, Issue 12). <http://ccafs.cgiar.org/news/press-releases/agriculture-and-food-production-contribute-29-percent-global-greenhouse-gas>
- FAO. (2018). *FAOSTAT*. <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC> <http://www.fao.org/faostat/es/%23data/QC>
- FAO. (2020). *Global Forest Assessment Resources 2020. Main report*. In *Reforming China's Healthcare System*. <https://doi.org/10.4324/9781315184487-1>
- FAO and UNEP. (2020). *The State of the World's Forests 2020. Forests, biodiversity and people*. FAO and UNEP. <https://doi.org/10.4060/ca8642en>
- Ferreras, N. (2017). *Análisis comparativo de modelos de cambio climático desarrollados en Dinámica de Sistemas*. 106.
- Fischer, G, Hizsnyik, E., Prieler, S., & Wiberg, D. (2011). *Scarcity and abundance*



- of land resources: competing uses and the shrinking land resource base. SOLAW Background Thematic Report - TR02.*  
[http://www.fao.org/fileadmin/templates/solaw/files/thematic\\_reports/TR\\_02\\_light.pdf](http://www.fao.org/fileadmin/templates/solaw/files/thematic_reports/TR_02_light.pdf)
- Fischer, Günther, Tubiello, F. N., van Velthuizen, H., & Wiberg, D. A. (2007). Climate change impacts on irrigation water requirements: Effects of mitigation, 1990-2080. *Technological Forecasting and Social Change*, 74(7), 1083–1107. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2006.05.021>
- Forrester, J. (2009). Some basic concepts in system dynamics. *Sloan School of Management*, ..., 1–17.  
[http://www.systemsmodelbook.org/uploadedfile/238\\_63f73156-02df-4d87-b0c6-c286a7beec26\\_SomeBasicConcepts.pdf](http://www.systemsmodelbook.org/uploadedfile/238_63f73156-02df-4d87-b0c6-c286a7beec26_SomeBasicConcepts.pdf)
- Gaveau, D. L. A., Sheil, D., Husnayaen, Salim, M. A., Arjasakusuma, S., Ancrenaz, M., Pacheco, P., & Meijaard, E. (2016). Rapid conversions and avoided deforestation: Examining four decades of industrial plantation expansion in Borneo. *Scientific Reports*, 6(June), 1–13.  
<https://doi.org/10.1038/srep32017>
- Ghazoul, J. (2013). Deforestation and Land Clearing. In *Encyclopedia of Biodiversity: Second Edition* (Issue December 2013). Elsevier Ltd.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384719-5.00281-1>
- Gibbs, H. K., Ruesch, A. S., Achard, F., Clayton, M. K., Holmgren, P., Ramankutty, N., & Foley, J. A. (2009). *Tropical forests were the primary sources of new agricultural land in the 1980s and 1990s.*  
<https://doi.org/10.1073/pnas.0910275107>
- Graesser, J., Aide, T. M., Grau, H. R., & Ramankutty, N. (2015). Cropland/pastureland dynamics and the slowdown of deforestation in Latin America. *Environmental Research Letters*, 10(3).  
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/3/034017>
- Havlík, P., Schneider, U. A., Schmid, E., Böttcher, H., Fritz, S., Skalský, R., Aoki, K., Cara, S. De, Kindermann, G., Kraxner, F., Leduc, S., McCallum, I., Mosnier, A., Sauer, T., & Obersteiner, M. (2011). Global land-use implications of first and second generation biofuel targets. *Energy Policy*, 39(10), 5690–5702. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.03.030>
- Havlík, P., Valin, H., Mosnier, A., Frank, S., Lauri, P., Leclère, D., Batka, M., Boere, E., Brouwer, A., Deppermann, A., Ermolieva, T., Forsell, N., Fulvio, F., Obersteiner, M., Herrero, E. M., Schmid, E., Schneider, U., & Hasegawa, T. (2018). *GLOBIOM documentation. June*, 1–38.
- Heilmayr, R. (2014). Conservation through intensification? The effects of plantations on natural forests. *Ecological Economics*, 105, 204–210.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2014.06.008>
- Hernandez, R. R., Hoffacker, M. K., Murphy-Mariscal, M. L., Wu, G. C., & Allen, M. F. (2016). Erratum: Solar energy development impacts on land cover change and protected areas (Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (2015) 112:44 (13579-13584)). *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 113(12), E1768. <https://doi.org/10.1073/pnas.1602975113>



- Hirota, M., Holmgren, M., Nes, E. H. Van, & Scheffer, M. (2011). Global Resilience of Tropical Forest and Savanna to Critical Transitions. *Science*, 334(October), 232–235. <https://doi.org/10.1126/science.1210657>
- Holmgren, P., & Vetenskapsakademien, K. (2008). Wood from planted forest. *Forest Products Journal*, 58(October), 6–18.
- Hosonuma, N., Herold, M., De Sy, V., De Fries, R. S., Brockhaus, M., Verchot, L., Angelsen, A., & Romijn, E. (2012a). An assessment of deforestation and forest degradation drivers in developing countries. *Environmental Research Letters*, 7(4). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/4/044009>
- Hosonuma, N., Herold, M., De Sy, V., De Fries, R. S., Brockhaus, M., Verchot, L., Angelsen, A., & Romijn, E. (2012b). An assessment of deforestation and forest degradation drivers in developing countries. *Environmental Research Letters*, 7(4). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/4/044009>
- IEA. (2020). *World Solar PV Electricity Production by region 2005-2018*. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/world-solar-pv-electricity-production-by-region-2005-2018>
- IIASA. (2014). *Globiom model*. 1–6.
- IIASA. (2015). The land use change impact of biofuels in the EU: Quantification of area and greenhouse gas impacts. *August*, 261. [https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/Final\\_Report\\_GLOBIOM\\_publication.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/Final_Report_GLOBIOM_publication.pdf)
- Indufor. (2012). *Strategic Review on the Future of Forest Plantations*. Forest Stewardship Council (FSC). 121.
- IPCC. (2014). Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands. Methodological Guidance on Lands with Wet and Drained Soils, and Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. In *2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands*. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp>
- John D. Sterman. (2002). System Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World. *Journal of the Franklin Institute*, 147(3), 248–249. [https://doi.org/10.1016/s0016-0032\(99\)90164-3](https://doi.org/10.1016/s0016-0032(99)90164-3)
- Jones, C., Lowe, J., Liddicoat, S., & Betts, R. (2009). Committed terrestrial ecosystem changes due to climate change. *Nature Geoscience*, 2(7), 484–487. <https://doi.org/10.1038/ngeo555>
- Kirwan, M. L., & Gedan, K. B. (2019). Sea-level driven land conversion and the formation of ghost forests. In *Nature Climate Change* (Vol. 9, Issue 6, pp. 450–457). Springer US. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0488-7>
- Kummu, M., Guillaume, J. H. A., De Moel, H., Eisner, S., Flörke, M., Porkka, M., Siebert, S., Veldkamp, T. I. E., & Ward, P. J. (2016). The world's road to water scarcity: Shortage and stress in the 20th century and pathways towards sustainability. *Scientific Reports*, 6(May), 1–16. <https://doi.org/10.1038/srep38495>
- Kyle, P. et al. (2011). *GCAM 3.0 Agriculture and Land use: Data Sources and*



*Methods.*

- Le Page, Y., West, T. O., Link, R., & Patel, P. (2016). Downscaling land use and land cover from the Global Change Assessment Model for coupling with Earth system models. *Geoscientific Model Development*, 9(9), 3055–3069. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3055-2016>
- LOCOMOTION. (n.d.). *LOCOMOTION PROJECT*. <https://www.locomotion-h2020.eu/>
- Marshall, J. D. (2007). Urban land area and population growth: A new scaling relationship for metropolitan expansion. *Urban Studies*, 44(10), 1889–1904. <https://doi.org/10.1080/00420980701471943>
- Martín García, J. (2003). *Teoría y ejercicios prácticos de dinámica de sistemas*. <http://dinamica-de-sistemas.com/libros/sistemas.htm>
- Mediavilla, M. et al. (2021). *UVa proposal for new land aggregation for WP6*.
- Mentaschi, L., Vousdoukas, M. I., Pekel, J. F., Voukouvalas, E., & Feyen, L. (2018). Global long-term observations of coastal erosion and accretion. *Scientific Reports*, 8(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-30904-w>
- Morales-Hidalgo, D., Oswalt, S. N., & Somanathan, E. (2015). Status and trends in global primary forest, protected areas, and areas designated for conservation of biodiversity from the Global Forest Resources Assessment 2015. *Forest Ecology and Management*, 352, 68–77. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.06.011>
- Nahuelhual, L., Carmona, A., Lara, A., Echeverría, C., & González, M. E. (2012). Land-cover change to forest plantations: Proximate causes and implications for the landscape in south-central Chile. *Landscape and Urban Planning*, 107(1), 12–20. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2012.04.006>
- Oakes, R. et al. (2020). *Deliverable 5.1. Review of Social and Demographic Indicators and Impacts of Energy Transitions*.
- Odorico, P. D., Bhattachan, A., Davis, K. F., Ravi, S., & Runyan, C. W. (2013). Advances in Water Resources Global desertification: Drivers and feedbacks. *Advances in Water Resources*, 51, 326–344. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.01.013>
- Papagianni, C. S. et al. (2020). *Deliverable 7.2. Module of energy resources availability*.
- Paquette, A., & Messier, C. (2010). The role of plantations in managing the world's forests in the Anthropocene. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 8(1), 27–34. <https://doi.org/10.1890/080116>
- Pastor, A. V. et al. (n.d.). *Deliverable 6.2. Water use module*.
- Pastor, A. V. et al. (2020). *Deliverable 6.1. Land use module*.
- Pekel, J. F., Cottam, A., Gorelick, N., & Belward, A. S. (2016). High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, 540(7633), 418–422. <https://doi.org/10.1038/nature20584>
- Pendrill, F., Persson, U. M., Godar, J., & Kastner, T. (2019). Deforestation



- displaced: Trade in forest-risk commodities and the prospects for a global forest transition. *Environmental Research Letters*, 14(5). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab0d41>
- Perpiña Castillo, C., Batista e Silva, F., & Lavallo, C. (2016). An assessment of the regional potential for solar power generation in EU-28. *Energy Policy*, 88(2016), 86–99. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.10.004>
- Popp, J., Lakner, Z., Harangi-Rákos, M., & Fári, M. (2014). The effect of bioenergy expansion: Food, energy, and environment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 559–578. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.056>
- Potapov, P., Hansen, M. C., Laestadius, L., Turubanova, S., Yaroshenko, A., Thies, C., Smith, W., Zhuravleva, I., Komarova, A., Minnemeyer, S., & Esipova, E. (2017a). The last frontiers of wilderness: Tracking loss of intact forest landscapes from 2000 to 2013. *Science Advances*, 3(1). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1600821>
- Potapov, P., Hansen, M. C., Laestadius, L., Turubanova, S., Yaroshenko, A., Thies, C., Smith, W., Zhuravleva, I., Komarova, A., Minnemeyer, S., & Esipova, E. (2017b). *The last frontiers of wilderness: Tracking loss of intact forest landscapes from 2000 to 2013*. <http://advances.sciencemag.org/>
- Rekacewicz, P. (2009). *Increased global water stress*. <https://www.grida.no/resources/5625>
- Riahi, K., van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O., Lutz, W., Popp, A., Cuaresma, J. C., KC, S., Leimbach, M., Jiang, L., Kram, T., Rao, S., Emmerling, J., ... Tavoni, M. (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change*, 42, 153–168. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>
- Rydzak, F., Obersteiner, M., Kraxner, F., Fritz, S., & McCallum, I. (2013). *Felix3 – Impact Assessment Model Systemic view across Societal Benefit Areas*.
- Saurab, B. (2018). *The growing importance of Land Use, Land Cover (LULC) studies in environmental planning and policy*. <https://eco-intelligent.com/2018/04/24/lulc-land-use-land-cover-studies-and-its-growing-importance/>
- Scheffer, M., Hirota, M., Holmgren, M., Van Nes, E. H., & Chapin, F. S. (2012). Thresholds for boreal biome transitions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(52), 21384–21389. <https://doi.org/10.1073/pnas.1219844110>
- Seto, K. C., Güneralp, B., & Hutyra, L. R. (2012). Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(40), 16083–16088. <https://doi.org/10.1073/pnas.1211658109>
- Skalský, R., Tarasovičová, Z., Balkovič, J., Schmid, E., Fuchs, M., Moltchanova, E., Kindermann, G., & Scholtz, P. (2008). *GEO-BENE global database for bio-physical modeling v. 1.0. 0(i)*, 1–58. [170](http://www.geo-</a></p></div><div data-bbox=)



- bene.eu/files/Deliverables/Geo-BeneGlbDb10(DataDescription).pdf
- Staal, A., Dekker, S. C., Xu, C., & van Nes, E. H. (2016). Bistability, Spatial Interaction, and the Distribution of Tropical Forests and Savannas. *Ecosystems*, 19(6), 1080–1091. <https://doi.org/10.1007/s10021-016-0011-1>
- Stephenson, C. I. M. and N. L. (2021). *Temperate forests health in an era of emerging megadisturbance*.
- Sterman, J. D. (2000). Business Dynamics : Systems Thinking. In *Management* (Vol. 6, Issue 1). <http://www.lavoisier.fr/notice/frJWOAR6SA23WLOO.html>
- SyntheSim. (2018). *Vensim. Guía del Usuario v.5*. 88. <http://www.vensim.com/documentation/vensim.htm>. Los
- Thapa, P. (2019). *A Review on Relationship between Land Use and Climate Change*.
- Thebo, A. L., Drechsel, P., & Lambin, E. F. (2014). Global assessment of urban and peri-urban agriculture: Irrigated and rainfed croplands. *Environmental Research Letters*, 9(11). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/11/114002>
- UNCCD. (2017). *Global Land Outlook: Secretariat of the United Nations Convention to Combat Desertification*.
- United Nations. (2016). *The state of the World's Land and Water resources for food and agriculture. Managing systems at risk*.
- van de Ven, D. J., Capellan-Peréz, I., Arto, I., Cazcarro, I., de Castro, C., Patel, P., & Gonzalez-Eguino, M. (2021a). The potential land requirements and related land use change emissions of solar energy. *Scientific Reports*, 11(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82042-5>
- van de Ven, D. J., Capellan-Peréz, I., Arto, I., Cazcarro, I., de Castro, C., Patel, P., & Gonzalez-Eguino, M. (2021b). The potential land requirements and related land use change emissions of solar energy. *Scientific Reports*, 11(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82042-5>
- van de Ven, D. J., Capellan-Peréz, I., Arto, I., Cazcarro, I., de Castro, C., Patel, P., & Gonzalez-Eguino, M. (2021c). The potential land requirements and related land use change emissions of solar energy. *Scientific Reports*, 11(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82042-5>
- van Schroyen Lantman, J., Verburg, P.H., Bregt, A. and Stan, G. (2011). *Core Principles and Concepts in Land-Use Modelling: A Literature Review*. May 2017. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-1822-7>
- van Vliet, J. (2019). Direct and indirect loss of natural area from urban expansion. *Nature Sustainability*, 2(8), 755–763. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0340-0>
- Velthof, G. L., Lesschen, J. P., Schils, R. L. M., Smit, A., Elbersen, B. S., Hazeu, G. W., Mucher, C. A., & Oenema, O. (2014). Grassland areas, production and use. *Eurostat*, 40701, 155.
- VENTANA Systems. (n.d.). *Vensim Software*. <https://vensim.com/>
- Verburg, P.H., Gimore Pontius, R., Kok, K. and Veldkamp, A. (2008). *Modeling*



- Land-Use and Land-Cover Change*. August. <https://doi.org/10.1007/3-540-32202-7>
- Verburg, P. H., Schot, P. P., Dijst, M. J., & Veldkamp, A. (2004). Land use change modelling: Current practice and research priorities. *GeoJournal*, 61(4), 309–324. <https://doi.org/10.1007/s10708-004-4946-y>
- Wood, A., & van Halsema, G. E. (2008). Scoping agriculture – wetland interactions. In *FAO Water Reports* (Issue 33).
- Xu, C., Hantson, S., Holmgren, M., van Nes, E. H., Staal, A., & Scheffer, M. (2016). Remotely sensed canopy height reveals three pantropical ecosystem states. *Ecology*, 97(9), 2518–2521. <https://doi.org/10.1002/ecy.1470>
- Zomer, R. J., Trabucco, A., Bossio, D. A., & Verchot, L. V. (2008). Climate change mitigation: A spatial analysis of global land suitability for clean development mechanism afforestation and reforestation. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 126(1–2), 67–80. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2008.01.014>