



7º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

**Gestión del monte: servicios
ambientales y bioeconomía**

26 - 30 junio 2017 | Plasencia
Cáceres, Extremadura

7CFE01-260

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales
Plasencia. Cáceres, Extremadura. 26-30 junio 2017
ISBN 978-84-941695-2-6

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

galfoR: un paquete de R para la gestión forestal en Galicia

ARIAS-RODIL, M.^{1*}, GONZÁLEZ-GONZÁLEZ, J.M.¹ y DIÉGUEZ-ARANDA, U.¹

¹ Unidad de Gestión Forestal Sostenible, Departamento de Ingeniería Agroforestal, Universidad de Santiago de Compostela. Escuela Politécnica Superior, C/ Benigno Ledo, Campus Terra, 27002 Lugo, España.

* Autor para la correspondencia: manuel.arias.rodil@gmail.com

Resumen

La Unidad de Gestión Forestal Sostenible de la Universidad de Santiago de Compostela viene desarrollando desde hace más de 20 años modelos de crecimiento para las principales especies forestales de Galicia. La implementación informática de estos modelos, junto con el conjunto de algoritmos que permiten simular tratamientos selvícolas, es imprescindible para que se extienda su uso por parte de técnicos de gestión e investigadores. En este trabajo se presenta el paquete galfoR, desarrollado en el lenguaje de programación R, que permite simular la evolución de un rodal regular monoespecífico bajo un determinado programa selvícola y realizar su análisis financiero. Para ello, se han creado cinco tipos de objetos propios del paquete, con funciones específicas definidas para cada objeto y funciones genéricas que devuelven resultados diferentes según el tipo de objeto. La mayoría de estas funciones dependen a su vez de otras que se han creado con las ecuaciones de los modelos dinámicos existentes para las distintas especies. Durante el desarrollo de galfoR se ha puesto especial empeño en sea sencillo de utilizar, con el fin de atraer al mayor número posible de usuarios. El paquete presenta muchas posibilidades de expansión, tanto en el número de especies y regiones consideradas como en las funcionalidades que incluye, entre las que se está trabajando en el procesado de datos de inventario, en optimización a nivel rodal, y en la estimación y clasificación del volumen maderable según destinos comerciales a nivel árbol.

Palabras clave

Modelo dinámico de rodal, simulación, Valor Esperado del Suelo, software libre.

1. Introducción

El grupo de investigación Unidad de Gestión Forestal Sostenible (UXFS), de la Universidad de Santiago de Compostela, viene desarrollando durante los últimos 20 años modelos dinámicos de crecimiento de rodal para las principales especies forestales de Galicia. Estos modelos están basados en el enfoque del espacio de estados (ZADEH & POLAK 1969), utilizado por primera vez en modelización forestal por GARCÍA (1994). La idea subyacente es caracterizar el estado de un rodal en un determinado momento de tal manera que esa información sea suficiente para determinar la evolución del rodal en el futuro, independientemente de las actuaciones selvícolas llevadas a cabo o de los eventos naturales que hayan podido producirse en el pasado. El estado se define mediante un conjunto de variables que se pueden proyectar a cualquier instante futuro utilizando funciones de transición. También es posible provocar modificaciones instantáneas de las variables de estado como resultado de una actuación selvícola. Por último, existen funciones de salida que, para un determinado momento, permiten estimar otras variables de interés a partir de las variables de estado. Así, los modelos dinámicos considerados están formados por funciones de transición y funciones de salida, que se basan en la descripción del estado de un rodal a través de variables de rodal (Figura 1).

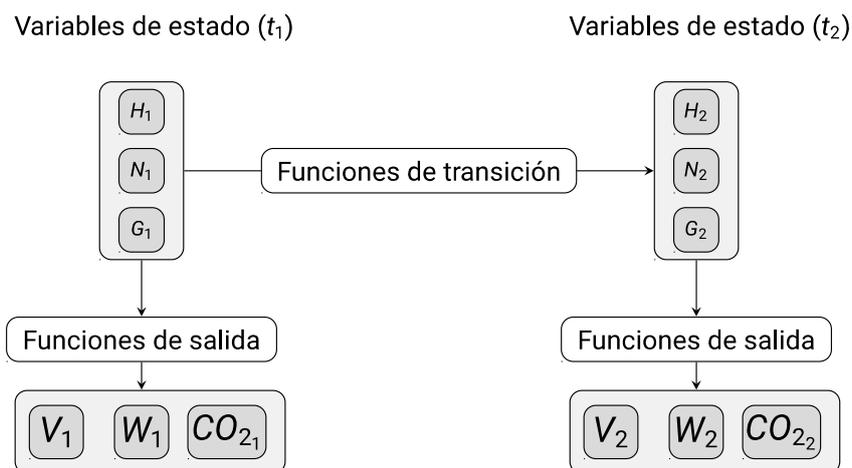


Figura 1. Estructura de los modelos dinámicos de rodal desarrollados para Galicia que han sido considerados en este trabajo: t , edad; H , altura dominante; N , número de árboles por hectárea; G , área basimétrica; V_i , volumen comercial; W , biomasa total; CO_2 , dióxido de carbono fijado.

La implementación informática mediante un lenguaje de programación de estos modelos dinámicos y de los algoritmos de ejecución de claras, permite simular la evolución de rodales bajo diferentes programas selvícolas, que vendrán definidos por las características de las cortas a realizar. Si, además, se incluye información económica como los precios de la madera, los gastos de actividades y la tasa de interés, es posible comparar entre sí distintos programas selvícolas desde el punto de vista financiero. La información generada puede ser útil tanto como ayuda en la toma de decisiones de gestión como en determinados trabajos de investigación.

En relación con el lenguaje de programación a utilizar para la implementación, R (R CORE TEAM 2016) es un lenguaje y entorno de desarrollo que se muestra como una alternativa interesante, ya que: (1) es software libre multiplataforma con importancia creciente en los ámbitos de la investigación, la formación universitaria y el mundo empresarial; (2) permite almacenar y manipular datos, así como realizar análisis estadísticos y gráficos en función de las necesidades de cada usuario; (3) su característica de código abierto posibilita su exploración, evaluación y mejora; y (4) puede enlazarse fácilmente con otros lenguajes de programación.

2. Objetivos

El objetivo de este documento es describir el estado actual de desarrollo de un paquete de R que hemos denominado `galfor`, que permite realizar simulaciones del desarrollo de rodales regulares monoespecíficos de las principales especies con interés forestal en Galicia y evaluarlas desde el punto de vista financiero. Las simulaciones están condicionadas por el programa selvícola aplicado, mientras que la evaluación financiera depende de la plantilla de clasificación de productos y del escenario económico considerados.

3. Metodología

La evolución de las variables de un rodal sujeto a un determinado programa selvícola se simula mediante las funciones de transición (que predicen el crecimiento natural del rodal en los períodos sin intervención humana) y de salida del modelo dinámico, así como utilizando un algoritmo de ejecución de cortas de mejora (claras) y regeneración (corta final). Éste es igual para todas las especies, mientras que las funciones de transición y de salida dependen de la especie. El paquete `galfor` incluye los modelos dinámicos de rodal desarrollados hasta el momento en Galicia para las

89 siguientes especies (código de la especie entre paréntesis): *Betula pubescens* (73),
 90 *Eucalyptus globulus* (61), *Pinus pinaster* región costera (26.1), *Pinus pinaster* región interior (26.2),
 91 *Pinus radiata* (28), *Pinus sylvestris* (21) y *Quercus robur* (41).

92

93 *Funciones de los modelos dinámicos de rodal*

94

95 Los modelos dinámicos implementados utilizan como variables de estado la altura dominante
 96 (H , m), el número de pies por hectárea (N) y el área basimétrica (G , $m^2 ha^{-1}$), ya que la información
 97 que aportan estas variables es suficiente para describir el estado de rodales regulares
 98 monoespecíficos sometidos a un amplio rango de tratamientos selvícolas (excepto claras y podas
 99 fuertes) y existe interés por estimar el volumen por destinos comerciales (GARCÍA 1994). Así, se han
 100 implementado tres funciones de transición: `projH()`, `projN()` y `projG()` para las variables de
 101 estado H , N y G . También se ha implementado la función de inicialización de área basimétrica
 102 `initG()` para estimar esta variable en el caso de que no esté disponible. Un argumento que incluyen
 103 todas estas funciones es `sp`, que sirve para seleccionar la ecuación adecuada para cada especie en
 104 función de su código.

105

106 Las variables de salida que se pueden estimar a partir de las variables de estado son el
 107 volumen comercial hasta un determinado diámetro en punta delgada (V_i , $m^3 ha^{-1}$), la biomasa seca
 108 arbórea aérea total (W , $t ha^{-1}$) y el dióxido de carbono (CO_2) fijado por la parte aérea y la radical de los
 109 árboles ($t ha^{-1}$). Su correspondiente implementación en `galfor` se ha realizado mediante las
 110 funciones `estimVi()`, `estimW()` y `estimCO2()`. Éstas también incluyen el argumento `sp` para
 111 elegir la ecuación correspondiente a cada especie.

112

113 *Algoritmo de ejecución de cortas*

114

115 Una vez que disponemos de las herramientas para predecir la evolución de un rodal en
 116 condiciones naturales, es necesario utilizar un algoritmo que simule la realización de cortas. En este
 117 trabajo consideramos que un programa selvícola viene definido por el número, el momento, la
 118 intensidad y el tipo de claras, así como por el momento de la corta final. La ejecución de cortas
 119 provoca un cambio instantáneo en las variables de estado N y G (se asume que no se realizan claras
 120 por lo alto, por lo que H no se ve afectada). Una corta viene definida por su intensidad (proporción de
 121 número de árboles por hectárea a extraer) y por su tipo, que es función de una variable denominada
 122 relación de extracción (ÁLVAREZ GONZÁLEZ ET AL. 1999):

123

$$R_e = \frac{G_e/G}{N_e/N} \quad [1]$$

124

125 donde R_e es la relación de extracción, G_e el área basimétrica extraída ($m^2 ha^{-1}$), G el área basimétrica
 126 antes de clara ($m^2 ha^{-1}$), N_e el número de árboles por hectárea extraídos y N el número de árboles por
 127 hectárea antes de clara. Las claras por lo bajo se representan por valores de R_e entre 0.35 y 0.60,
 128 mientras que las claras mixtas (parte por lo bajo y parte por lo alto, pero sin afectar al cálculo de la
 129 altura dominante) o semisistemáticas (parte sistemática y parte por lo bajo) corresponden a valores
 130 de R_e entre 0.60 y 0.95. Para valores de R_e próximos a 1 se trata de una clara sistemática. Una corta
 131 final a hecho se simula con valores de $N_e/N_{ac} = 1$ y $R_e = 1$.

132

133 *Evaluación financiera*

134

135 Tras simular el desarrollo de un rodal bajo un determinado programa selvícola se obtienen los
 136 valores de las variables de estado y de salida a las diferentes edades. Posteriormente, conociendo los
 137 valores de los gastos e ingresos previstos se puede realizar una evaluación financiera de dicho

138 programa. Ejemplos de gastos e ingresos asociados a la gestión de rodales regulares son: gastos de
 139 establecimiento, gastos puntuales o anuales de mantenimiento o de mejora, ingresos debidos a la
 140 venta de la madera en claras o en la corta final, rentas anuales de caza, etc.

141
 142 Los ingresos derivados de las cortas se calculan a partir del volumen extraído de cada destino
 143 comercial, multiplicándolo por su precio correspondiente. Con respecto a los gastos de realización de
 144 cortas, se ha considerado la posibilidad de que tengan una parte fija (p. ej., debida al desplazamiento
 145 de maquinaria y personal al monte) y otra variable (en función de los valores extraídos de número de
 146 árboles, área basimétrica o volumen).

147
 148 A partir del balance de ingresos y gastos de cada año se calcula el Valor Actual Neto (VAN,
 149 € ha⁻¹):
 150

$$\text{VAN} = \sum_{t=0}^T \frac{I_t - C_t}{(1+r)^t} \quad [2]$$

151
 152 donde I_t y C_t representan respectivamente los ingresos y los gastos correspondientes al año t , r es la
 153 tasa de interés (en tanto por uno) y T el turno de corta (años). A partir del VAN se puede calcular el
 154 Valor Esperado del Suelo (VES, € ha⁻¹), que es el criterio más adecuado para comparar programas
 155 selvícolas con diferente turno de corta:
 156

$$\text{VES} = \frac{\text{VAN}}{1 - 1/(1+r)^T} \quad [3]$$

157
 158 Otra variable que hemos considerado en la evaluación financiera es la tasa interna de retorno
 159 (TIR), que es la tasa de interés que hace VAN = 0.

160
 161 *Funciones auxiliares*

162
 163 Además de las funciones de transición y de salida de los modelos dinámicos se han
 164 implementado las siguientes funciones auxiliares:

- 165
 166
- `.obtainReferenceAge()`: devuelve la edad de referencia para cada especie.
 - `.obtainReferenceValues()`: devuelve valores de referencia para cada especie para dibujar las curvas de evolución de H , N y G .
 - `.obtainSpecies()`: devuelve el nombre de la especie.
 - `.obtainDg()`: devuelve el valor del diámetro medio cuadrático a partir de los valores de N y G .
 - `.modelBurkhardtStrub()`: incluye la expresión de Burkhardt & Strub (1974), para utilizar en el ajuste de la relación altura-diámetro.
- 172
 173
 174

175 Las tres primeras funciones auxiliares consideran también el argumento `sp`, mientras que las
 176 dos últimas son generales.

177
 178 *Implementación de `galfor`*

179
 180 Las funciones mencionadas hasta ahora constituyen la base sobre la que se ha implementado
 181 el paquete. En la Tabla 1 se indica la bibliografía de la que se han tomado las ecuaciones de los
 182 modelos dinámicos incluidos en `galfor`. En el siguiente epígrafe se muestran los distintos tipos de

183 objetos que se pueden definir, así como funciones específicas de cada objeto que se han
 184 desarrollado a partir de las presentadas en este apartado.
 185

186 *Tabla 1. Bibliografía de la que se han tomado las ecuaciones que constituyen los modelos dinámicos implementados en el*
 187 *paquete galfoR.*

Función	Código de especie					
	73	61	26.1/26.2	28	21	41
projH()	3 ¹	4	1	5 ¹	6 ¹	7 ²
projN()	8 ²	4	–	9 ¹	10 ¹	7 ²
projG()	8 ²	4	11 ¹	12 ¹	13 ¹	7 ²
initG()	2	4	11 ¹	12 ¹	13 ¹	7 ²
estimVi()	14	4	15	14	14	2
estimW()	0	4	16	16	0	17
estimCO2()	18	18	18	18	18	18

¹ Aparecen también en DIÉGUEZ-ARANDA et al. (2009).

² Aparecen también en DIÉGUEZ-ARANDA et al. (2012).

0: Ajustadas específicamente para galfoR.

1: DIÉGUEZ-ARANDA et al. (2009).

2: DIÉGUEZ-ARANDA et al. (2012).

3: DIÉGUEZ-ARANDA et al. (2006b).

4: GARCÍA-VILLABRILLE (2015).

5: DIÉGUEZ-ARANDA et al. (2005b).

6: DIÉGUEZ-ARANDA et al. (2005a).

7: GÓMEZ-GARCÍA et al. (2015).

8: GÓMEZ-GARCÍA et al. (2014).

9: CASTEDO-DORADO et al. (2007a).

10: DIÉGUEZ-ARANDA et al. (2005).

11: BARRIO-ANTA et al. (2006).

12: CASTEDO-DORADO et al. (2007b).

13: DIÉGUEZ-ARANDA et al. (2006a).

14: ARIAS-RODIL et al. (2017).

15: ARIAS-RODIL et al. (2015).

16: CASTEDO-DORADO et al. (2012).

17: GÓMEZ-GARCÍA et al. (2016).

18: Estimadas a partir de la biomasa total de rodal como $CO_2 = W \cdot (1 + R) \cdot FC \cdot \frac{44}{12}$, donde R es la ratio entre biomasa arbórea de raíces y biomasa arbórea aérea total (IPCC 2003, Cuadro 3A.1.8) y FC es la fracción de carbono de la materia seca ($t\ C \cdot t\ m. s^{-1}$) que se asume 0.5 (IPCC 2003, ecuación 3.2.3).

188

189 4. Resultados

190

191 La estructura del paquete galfoR se basa en cinco tipos de objetos: `st`, `mng`, `econ.sce`,
 192 `assrt` y `simst`. Para cada uno de ellos se han implementado funciones específicas. También se han
 193 implementado algunas funciones denominadas genéricas, como `print()`, `summary()` o `plot()`,
 194 que realizan diferentes procedimientos según el objeto que incluyamos como argumento. A
 195 continuación se describe en detalle cada tipo de objeto y las funciones específicas definidas para
 196 cada uno de ellos.

197

198 *Objeto st*

199

200 El objeto de tipo `st` representa las condiciones iniciales de un rodal, por lo que cada objeto `st`
 201 creado se refiere a un rodal determinado. Se trata de una lista de R (`list()`) en la que se incluye un
 202 identificador del rodal, el código de la especie, la superficie del rodal (ha), la edad (años), el índice de
 203 sitio (m), la altura dominante (m), el número de pies por hectárea y el área basimétrica ($m^2\ ha^{-1}$).

204

205

En relación a funciones específicas para este objeto, se ha considerado en primer lugar una función de inicialización (`initStand()`) que devuelve un objeto `st` a partir de los siguientes argumentos de entrada: código de especie, superficie, edad, número de pies por hectárea, índice de sitio o altura dominante, y área basimétrica (opcional). Nótese que se debe especificar el índice de sitio o la altura dominante y que la función estimará la variable no especificada; además, si no se especifica el área basimétrica la función la estimará.

210

211

212

También se ha implementado una función que permite importar un archivo `.txt` o `.csv` (`readStand()`) que incluya las condiciones iniciales de uno o varios rodales, devolviendo respectivamente uno o varios objetos `st`. En el segundo caso los incluiría en una lista de objetos `st`, dentro de la cual podemos seleccionar el rodal con el que queramos trabajar mediante la función `selectStand()`.

217

218

Finalmente, también se han creado funciones genéricas para este objeto que permiten determinar lo que se imprimirá en la consola (`print.st()`), devolver información adicional como el volumen de madera, la biomasa o el dióxido de carbono fijado (`summary.st()`), y representar gráficamente las condiciones del rodal en relación con el rango observado de curvas de evolución de altura dominante, área basimétrica y número de árboles para la especie en Galicia (`plot.st()`). Nótese que no sería necesario emplear la terminación `.st` para ejecutar estas funciones; por ejemplo, si `x` es un objeto `st`, simplemente emplearíamos `plot(x)` y R utilizaría automáticamente `plot.st()`.

226

227

Objeto mng

228

229

El objeto de tipo `mng` incluye las especificaciones de los programas selvícolas. Cada objeto `mng` creado corresponde a un programa selvícola y es una lista de R en la que se incluye un identificador del programa y un `data.frame` con la edad en años a la que intervenir en el rodal, la proporción (en tanto por uno) de árboles a extraer y la relación de extracción (valor entre 0.35 y 1) de cada una de las cortas consideradas.

234

235

De la misma forma que para el objeto `st`, se ha definido una función de inicialización que devuelve un objeto `mng` (`initManagement()`), empleando como *inputs* las variables necesarias para definir un programa selvícola. En este caso se ha creado una función genérica que determina lo que vemos al imprimir este objeto en consola (`print.mng()`).

239

240

Objeto assrt

241

242

Un objeto de tipo `assrt` es una lista de R en la que se incluye información acerca de los requerimientos de dimensiones de la madera por destinos comerciales. Así, cada objeto de tipo `assrt` representa una plantilla de clasificación de productos, definida por el identificador, el diámetro mínimo en punta delgada (cm) y el precio (€ m⁻³) de cada destino.

246

247

En este caso se han definido una función de inicialización (`initAssortments()`), en la que se introducen los *inputs* indicados y devuelve un objeto de tipo `assrt`) y una función genérica para la impresión del objeto en la consola (`print.assrt()`).

250

251

Objeto econ.sce

252

253

Un escenario económico se representa por un objeto de tipo `econ.sce`, que es una lista de R que incluye la tasa de interés (en tanto por uno), un `data.frame` con información de ingresos y

254

255 gastos (€ ha^{-1}) que se computan a diferentes edades (años), y funciones que permiten calcular el
 256 gasto de realización de claras y cortas finales (€ ha^{-1}).
 257

258 Para añadir un determinado ingreso o gasto a un objeto `econ.sce` ya creado se ha
 259 implementado la función `addValue()`. Dependiendo de los argumentos que se utilicen al ejecutar
 260 esta función el ingreso o gasto será:
 261

- 262 • Puntual, si utilizamos solamente `value` y `t`, que indican respectivamente el valor del
 263 ingreso o gasto (si es positivo se trata de un ingreso y si es negativo de un gasto) y la edad a
 264 la que se imputa. Podemos incluir más de un ingreso o gasto a la vez si utilizamos vectores
 265 en cada argumento.
- 266 • Periódico, si consideramos `value`, `t`, `it` y `duration`, que indican respectivamente el
 267 valor, la edad de inicio de imputación, la frecuencia de imputación y el intervalo de tiempo
 268 durante el que se imputa. Por ejemplo, si `value` = -200, `t` = 10, `it` = 2 y
 269 `duration` = 12, se estará considerando un coste periódico de 200€ ha^{-1} que se
 270 comenzaría a imputar cuando el rodal tenga 10 años y se imputaría cada 2 años hasta la
 271 edad de 22 años. Como en el caso anterior, se pueden considerar más de un ingreso o
 272 gasto periódico si se utilizan vectores en cada argumento. Por otra parte, nótese que un
 273 valor de `it` = 0 o `duration` = 0 implicaría un ingreso o gasto puntual.
- 274 • Función de gasto de realización de cortas, si empleamos los argumentos `value.f`,
 275 `value.v` y `variable.c`, que representan el gasto fijo, el gasto variable por unidad y la
 276 variable que se utiliza para obtener el gasto variable total (p. ej., número de árboles
 277 extraídos por hectárea). Si en lugar de un vector introducimos solamente un valor para cada
 278 uno de estos argumentos, la función de gastos de realización de claras y de corta final sería
 279 la misma. Por ejemplo, si `value.f` = -500, `value.v` = -5 y `variable.c` = "N.r",
 280 significaría que el gasto de realización de cortas en € ha^{-1} sería de $500 + 5 N_r$, siendo N_r el
 281 número de árboles extraídos por hectárea.
 282

283 La función `initEconomicScenario()` sirve para inicializar un objeto de tipo `econ.sce`. En
 284 ella debe introducirse la tasa de interés (`interest.rate`) y, opcionalmente, alguno de los
 285 argumentos ya mencionados. Si solo incluimos la tasa de interés obtenemos un objeto de tipo
 286 `econ.sce` sin ningún ingreso o gasto, que podemos añadir posteriormente con la función
 287 `addValue()`. Si, por el contrario, incluimos además otros argumentos, generaríamos un objeto
 288 `econ.sce` con los ingresos o gastos indicados. Podríamos incluso definir el escenario económico
 289 completo empleando vectores para los argumentos (se consideraría el valor 0 para los argumentos
 290 `it` y `duration` en el caso de ingresos o gastos puntuales y valores distintos de 0 para los ingresos
 291 o gastos periódicos) e incluyendo los argumentos correspondientes a la definición de las funciones de
 292 gastos de realización de cortas.
 293

294 En el caso de objetos `econ.sce` también se ha definido una función genérica que nos permite
 295 especificar la visualización del objeto en consola (`print.econ.sce()`).
 296

297 **Objeto `simst`**

298 Este tipo de objeto es una lista de R que incluye el resultado de simular el desarrollo de un
 299 rodal (objeto `st`) considerando un programa selvícola (objeto `mng`), una plantilla de clasificación de
 300 productos (objeto `assrt`) y un escenario económico (objeto `econ.sce`) previamente definidos. Para
 301 obtener este tipo de objeto se emplea la función `simStandEvolution()`, que tiene como
 302 argumentos un objeto de cada tipo de los definidos previamente y el argumento opcional
 303

304 `ages.prediction`, que permite incluir un vector con edades adicionales para las que queremos
 305 conocer el estado del rodal.

306
 307 La función `simStandEvolution()` utiliza dos funciones previamente definidas:

- 309 • `simGrowth()`: a partir de las condiciones iniciales de rodal (un objeto de tipo `st`) y de un
 310 valor t_2 , la función devuelve un objeto `st` con el estado del rodal en el momento t_2 .
- 311 • `simThinning()`: devuelve un objeto de tipo `st`, representando el estado del rodal en el
 312 instante inmediatamente posterior a la realización de una corta, tomando como argumentos
 313 la información de partida del rodal (un objeto `st`), la proporción de árboles a extraer (p_{Nr}) y
 314 la relación de extracción (R_t).

315
 316 En este caso también se han definido funciones genéricas como `print.simst()`,
 317 `summary.simst()` y `plot.simst()`. La primera determina cómo se visualiza en la consola el
 318 objeto `simst`, la segunda devuelve un resumen con los resultados más relevantes de la simulación y
 319 la tercera devuelve un gráfico de evolución de diferentes variables de interés para el período
 320 considerado en la simulación. Para la función `plot.simst()` podemos especificar el argumento
 321 `type`:

- 323 • Si `type = "Evolution"` se muestran los gráficos de evolución de número de pies por
 324 hectárea, de área basimétrica y de volumen de madera a lo largo del período considerado
 325 en la simulación.
- 326 • Si `type = "Balance"` se muestran los gráficos de evolución del valor financiero sin
 327 actualizar y actualizado.

328 5. Discusión

329
 330 En este trabajo se presenta la versión inicial del paquete `galfor`. Al tratarse de un paquete de
 331 R, se facilita el acceso a esta herramienta a los potenciales usuarios, que en este caso serían los
 332 técnicos de gestión e investigadores. Para favorecer el empleo de este paquete, especialmente por
 333 parte de técnicos, la principal premisa durante el desarrollo del paquete `galfor` ha sido su
 334 simplicidad de manejo. La creación de tipos de objetos específicos del paquete contribuye a este fin,
 335 ya que evita al usuario tener que trabajar con los tipos de objetos propios de R como `data.frames`,
 336 vectores, listas... En este sentido, las funciones de inicialización implementadas para cada tipo de
 337 objeto (excepto `simst`) realizan la estandarización de los *inputs* del usuario, evitando posibles
 338 errores derivados de este paso de cara a la utilización posterior de las funciones. Las funciones
 339 genéricas de `summary()`, `print()` y `plot()` también ayudan a la visualización de la información
 340 de una forma clara.

341
 342 Los usuarios podrán ejercer también de auditores, proponiendo mejoras para posteriores
 343 versiones. En este sentido, la estructura del paquete permite una futura expansión sencilla del rango
 344 de especies y regiones consideradas y de sus funcionalidades:

- 347 • Se podría incluir cualquier modelo con estructura similar, lo que permitiría considerar
 348 fácilmente otras especies o incluso otras regiones geográficas.
- 349 • El siguiente paso para ampliar las funcionalidades del paquete sería incluir la optimización
 350 a nivel rodal (e.g. ARIAS-RODIL et al. 2015b), para lo que necesitaríamos un algoritmo de
 351 optimización que realice una búsqueda automática del mejor programa selvícola, utilizando
 352 para ello el simulador ya implementado en la versión actual.

- 353
- 354
- 355
- 356
- 357
- 358
- 359
- 360
- Se puede crear un módulo de procesado de datos de inventario con cálculo errores de muestreo a nivel estrato e incluso a nivel monte, considerando diferentes diseños muestrales.
 - Otra alternativa de ampliación sería la inclusión de un módulo para la estimación y clasificación del volumen según destinos comerciales basado en las funciones de perfil de tronco, lo que permitiría la estimación de estos volúmenes para cada árbol, en base al diámetro mínimo en punta delgada y longitud de troza.

361 6. Conclusiones

362

363 En el paquete `galfoR` de R se implementa un simulador del desarrollo de un rodal para las

364 principales especies forestales de Galicia. También permite evaluar desde un punto de vista

365 financiero un determinado programa selvícola para un rodal, plantilla de clasificación de productos y

366 escenario económico especificados. En su implementación se han creado cinco tipos de objetos y

367 funciones relacionadas con los mismos (incluyendo funciones genéricas). Éstas dependen a su vez de

368 funciones en las que se implementan las ecuaciones que constituyen los modelos dinámicos de rodal

369 de cada especie considerada.

370

371 La sencillez de utilización ha sido un factor muy relevante en la implementación del paquete, de

372 cara a facilitar su uso por los potenciales usuarios, que serían los técnicos de gestión e

373 investigadores. Finalmente, el paquete podría ampliarse fácilmente tanto en el número de especies y

374 regiones consideradas como en sus funcionalidades, incluyendo por ejemplo un módulo para la

375 optimización a nivel rodal, un módulo de procesado de datos de inventario, o uno para la estimación y

376 clasificación del volumen según destinos comerciales a nivel árbol.

377 7. Agradecimientos

378

379 El primer autor disfruta de una ayuda FPU (referencia AP2012-5337) del Ministerio de

380 Educación, Cultura y Deporte de España. También se agradece a todos los investigadores que han

381 contribuido en el desarrollo de los modelos dinámicos para las principales especies forestales de

382 Galicia.

383 8. Bibliografía

- 384
- 385
- 386
- 387 ÁLVAREZ GONZÁLEZ, J. G.; RODRÍGUEZ SOALLEIRO, R.; & VEGA ALONSO, G. ; 1999.
- 388 Elaboración de un modelo de crecimiento dinámico para rodales regulares de *Pinus*
- 389 *pinaster* Ait. en Galicia. *For. Syst.*, 8 319-334.
- 390
- 391 ARIAS-RODIL, M.; BARRIO-ANTA, M.; & DIÉGUEZ-ARANDA, U. ; 2016. Developing a dynamic
- 392 growth model for maritime pine in Asturias (NW Spain): comparison with nearby regions.
- 393 *Ann. For. Sci.*, 73 297-320.
- 394
- 395 ARIAS-RODIL, M.; PUKKALA, T.; GONZÁLEZ-GONZÁLEZ, J. M.; BARRIO-ANTA, M.; & DIÉGUEZ-
- 396 ARANDA, U. ; 2015. Use of depth-first search and direct search methods to optimize
- 397 even-aged stand management: a case study involving maritime pine in Asturias (NW
- 398 Spain). *Can. J. For. Res.*, 45 1269-1279.
- 399
- 400 ARIAS-RODIL, M.; ROMERO-MARTÍNEZ, P.; & DIÉGUEZ-ARANDA, U.; 2017. Estimación del
- 401 volumen comercial a partir de variables de rodal. En Sociedad Española de Ciencias
- 402 Forestales (Ed.), *7º Congreso Forestal Español*. Plasencia (España).
- 403

- 404 BARRIO-ANTA, M.; BALBOA-MURIAS, M. Á.; CASTEDO-DORADO, F.; DIÉGUEZ-ARANDA, U.; &
 405 ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, J. G. ; 2006. An ecoregional model for estimating volume, biomass
 406 and carbon pools in maritime pine stands in Galicia (northwestern Spain). *For. Ecol.*
 407 *Manage.*, 223 24-34.
 408
- 409 BURKHART, H. E.; & STRUB, M. R. ; 1974. A model for simulation of planted loblolly pine
 410 stands. En *Growth models for tree and stand simulation* (pp. 128-135). Royal College of
 411 Forestry. Stockholm, Sweden.
 412
- 413 CASTEDO-DORADO, F.; DIÉGUEZ-ARANDA, U.; & ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, J. G. ; 2007a. A growth
 414 model for *Pinus radiata* D. Don stands in north-western Spain. *Ann. For. Sci.*, 64 453-
 415 465.
 416
- 417 CASTEDO-DORADO, F.; DIÉGUEZ-ARANDA, U.; BARRIO-ANTA, M.; & ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, J. G. ;
 418 2007b. Modelling stand basal area growth for radiata pine plantations in Northwestern
 419 Spain using the GADA. *Ann. For. Sci.*, 64 609-619.
 420
- 421 CASTEDO-DORADO, F.; GÓMEZ-GARCÍA, E.; DIÉGUEZ-ARANDA, U.; BARRIO-ANTA, M.; &
 422 CRECENTE-CAMPO, F. ; 2012. Aboveground stand-level biomass estimation: a
 423 comparison of two methods for major forest species in northwest Spain. *Ann. For. Sci.*,
 424 69 735-746.
 425
- 426 DIÉGUEZ-ARANDA, U.; ÁLVAREZ, J. G.; BARRIO, M.; & ROJO, A. ; 2005a. Site quality equations
 427 for *Pinus sylvestris* L. plantations in Galicia (northwestern Spain). *Ann. For. Sci.*, 62 143-
 428 152.
 429
- 430 DIÉGUEZ-ARANDA, U.; BURKHART, H. E.; & RODRÍGUEZ-SOALLEIRO, R. ; 2005b. Modeling
 431 dominant height growth of radiata pine (*Pinus radiata* D. Don) plantations in north-
 432 western Spain. *For. Ecol. Manage.*, 215 271-284.
 433
- 434 DIÉGUEZ-ARANDA, U.; CASTEDO-DORADO, F.; ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, J. G.; & RODRÍGUEZ-
 435 SOALLEIRO, R. ; 2005. Modelling mortality of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) plantations
 436 in the northwest of Spain. *Eur. J. For. Res.*, 124 143-153.
 437
- 438 DIÉGUEZ-ARANDA, U.; CASTEDO DORADO, F.; ÁLVAREZ GONZÁLEZ, J. G.; & ROJO ALBORECA, A. ;
 439 2006a. Dynamic growth model for Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) plantations in Galicia
 440 (north-western Spain). *Ecol. Modell.*, 191 225-242.
 441
- 442 DIÉGUEZ-ARANDA, U.; GRANDAS-ARIAS, J. A.; ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, J. G.; & VON GADOW, K. ;
 443 2006b. Site quality curves for birch stands in north-western Spain. *Silva Fenn.*, 40 631-
 444 644.
 445
- 446 DIÉGUEZ-ARANDA, U.; ROJO ALBORECA, A.; CASTEDO-DORADO, F.; ÁLVAREZ GONZÁLEZ, J. G.;
 447 BARRIO-ANTA, M.; CRECENTE-CAMPO, F.; ... GÓMEZ-GARCÍA, E. ; 2012. Adenda A.
 448 Actualización de modelos disponibles a fecha de 29/10/2012. En *Herramientas*
 449 *selvícolas para la gestión forestal sostenible en Galicia* (p. 17).
 450
- 451 DIÉGUEZ-ARANDA, U.; ROJO ALBORECA, A.; CASTEDO-DORADO, F.; ÁLVAREZ GONZÁLEZ, J. G.;

- 452 BARRIO-ANTA, M.; CRECENTE-CAMPO, F.; ... SÁNCHEZ RODRÍGUEZ, F. ; 2009.
453 Herramientas selvícolas para la gestión forestal sostenible en Galicia. Xunta de Galicia.
454 259 páginas.
455
- 456 GARCÍA-VILLABRILLE, J. D. ; 2015. Modelización del crecimiento y la producción de
457 plantaciones de *Eucalyptus globulus* Labill. en el Noroeste de España. Universidad de
458 Santiago de Compostela.
459
- 460 GARCÍA, O. ; 1994. The state-space approach in growth modelling. *Can. J. For. Res.*, 24
461 1894–1903.
462
- 463 GÓMEZ-GARCÍA, E.; CRECENTE-CAMPO, F.; BARRIO-ANTA, M.; & DIÉGUEZ-ARANDA, U. ; 2015. A
464 disaggregated dynamic model for predicting volume, biomass and carbon stocks in even-
465 aged pedunculate oak stands in Galicia (NW Spain). *Eur. J. For. Res.*, 134 569-583.
466
- 467 GÓMEZ-GARCÍA, E.; CRECENTE-CAMPO, F.; TOBIN, B.; HAWKINS, M.; NIEUWENHUIS, M.; &
468 DIÉGUEZ-ARANDA, U. ; 2014. A dynamic volume and biomass growth model system for
469 even-aged downy birch stands in south-western Europe. *Forestry*, 87 165-176.
470
- 471 GÓMEZ-GARCÍA, E.; DIÉGUEZ-ARANDA, U.; CUNHA, M.; & RODRÍGUEZ-SOALLEIRO, R. ; 2016.
472 Comparison of harvest-related removal of aboveground biomass, carbon and nutrients in
473 pedunculate oak stands and in fast-growing tree stands in NW Spain. *For. Ecol. Manage.*,
474 365 119-127.
475
- 476 IPCC. ; 2003. Orientación sobre las buenas prácticas para uso de la tierra, cambio de uso de
477 la tierra y silvicultura.
478
- 479 R CORE TEAM. ; 2016. R: a language and environment for statistical computing. Vienna,
480 Austria.
481
- 482 ZADEH, L. A.; & POLAK, E. ; 1969. System theory. McGraw-Hill. 521 páginas. New York.
483