

1

PONENCIAS A LA 53 REUNIÓN
CIENTÍFICA DE LA SEEP



DE LA INVESTIGACIÓN A LA PRÁCTICA: HERRAMIENTAS PARA GESTIONAR LA GANADERÍA DE MONTAÑA Y LOS PASTOS COMUNALES DE CANTABRIA DENTRO DE LA POLÍTICA AGRARIA COMÚN

J. BUSQUÉ MARCOS

Centro de Investigación y Formación Agrarias del Gobierno de Cantabria. C/ Héroes del 2 de Mayo, 27. 39600 Muriedas.
juanbusque@cifacantabria.org

SCIENCE INTO PRACTICE: TOOLS TO MANAGE MOUNTAIN LIVESTOCK SYSTEMS AND GRAZING COMMONS OF CANTABRIA WITHIN THE COMMON AGRICULTURAL POLICY

Historial del artículo:

Recibido: 31/12/2014

Revisado: 04/03/2015

Aceptado: 19/03/2015

Disponible online: 13/04/2015

Autor para correspondencia:

juanbusque@cifacantabria.org

ISSN: 2340-1672

Disponible en: <http://polired.upm.es/index.php/pastos>

Palabras clave:

Modelo de simulación PUERTO, escenarios de pastoreo, coeficiente de admisibilidad de pastos, instrumentos de gestión de montes, utilización forrajera.

Keywords:

PUERTO simulation model, grazing scenarios, pasture eligibility coefficient, mountain management plans, forage utilisation.

RESUMEN

La ganadería extensiva de montaña y los pastos comunales son recursos de gran importancia socio-económica y ecológica en Cantabria y en otras regiones montañosas de Europa. Aún así, y a pesar de las exigencias normativas, es notoria la actual carencia de planes de gestión que aseguren un uso silvopastoral sostenible de los terrenos comunales. Resulta paradójico que la Política Agraria Común (PAC), fuente de ingresos más importante de las ganaderías extensivas y basada principalmente en pagos por superficie agraria, no considere explícitamente la necesidad de esta gestión en su apoyo económico a estos sistemas ganaderos. El próximo programa 2015-2020 de la PAC en Cantabria centra buena parte de sus esfuerzos en pagar por el mantenimiento de pastos permanentes, con escasas exigencias sobre cómo hacerlo y con una definición de "pasto permanente" aún controvertida. Las medidas propuestas para este nuevo programa no favorecen la mejora de unos sistemas ganaderos de montaña en declive, siendo necesario considerar una visión sistémica que integre territorio y ganado en pastoreo a la escala de paisaje correcta. Desde el punto de vista técnico, es necesario disponer de herramientas que ayuden en este enfoque. En este sentido, se presenta el modelo de simulación PUERTO, que emula el funcionamiento del pastoreo en pastos comunales de montaña complejos, permitiendo evaluar si la utilización forrajera del territorio es sostenible para el pasto y los herbívoros. Este modelo se ha creado con el objetivo de servir como herramienta de apoyo a la gestión de estos sistemas, pudiendo, por tanto, ayudar desde la investigación a la construcción de una futura PAC que articule de forma más tangible sus objetivos de sostenibilidad de los agro-ecosistemas. Se presentan tres casos diferentes de aplicación del modelo PUERTO a situaciones de complejidad creciente para comprender su funcionamiento y su potencial utilidad práctica. En estos casos se muestra la capacidad del modelo de simular los efectos producidos por distintos escenarios de carga ganadera, tipos de ganado en pastoreo o superficie de pasto mejorado, así como su utilidad en el diseño de instrumentos de gestión de montes comunales de gran superficie y con múltiples rebaños en pastoreo, a través de la interpretación de los resultados predichos sobre variación del peso de los animales y utilización forrajera de la vegetación en unidades territoriales del comunal bien definidas.

ABSTRACT

Extensive livestock farming and communal grazing land are important socio-economic and ecological resources in Cantabria and in other mountainous regions of Europe. However, and even with existing regulatory mandates, it is notorious the current lack of management plans to ensure sustainable silvopastoral use in these commons. It is paradoxical that the Common Agricultural Policy (CAP), which is the most important income source in extensive livestock farms, does not consider explicitly the need for these management plans in their support to these agricultural systems. The next 2015-2020 CAP program in Cantabria focuses most of its budget in paying farmers for the maintenance of permanent pastures, with few requirements on how to do it and even with a definition of what is "permanent pasture" which is still controversial. The proposed measures in this new program do not favour the improvement of these depressed mountain livestock farming systems, as it is still necessary to view them systemically, integrating land and livestock and at a correct landscape scale. From the technical point of view, there is a need to dispose of tools that can aid in this approach. One of these is the simulation model PUERTO, which is introduced in this contribution. PUERTO emulates the functioning of grazing in complex mountainous communal rangelands, allowing for the evaluation of forage utilisation sustainability both for the land and for the herbivores. This model was created with the main objective of serving as a decision support tool to the management of this type of systems, aiming to help in the long term to the construction of a future CAP which considers in a more tangible way its objectives of agro-ecosystems sustainability. Three different cases of application of the model PUERTO are presented, considering situations of increasing complexity to help in understanding how it works and its potentiality of use. These cases show the capacity of the model to simulate the effects of different scenarios of stocking rate, type of grazing livestock species or area of improved grassland. They also demonstrate the utility of PUERTO for the implementation of management planning in large commons with many grazing herds. This is performed interpreting the predicted outputs on animal weight changes and vegetation forage utilisation in well defined land units conforming the communal land.

LA GANADERÍA DE MONTAÑA Y LOS COMUNALES EN CANTABRIA

Cantabria es una región pequeña (5.326 km²) con dos características marcadas que definen su sector agrario: es eminentemente ganadera y montañosa. La ganadería supone más del 85% del valor de la producción agraria regional (www.ican.es), mientras que el territorio de montaña, definido por altitud y pendientes, cubre el 82% de la superficie regional (Programa de Desarrollo Rural de Cantabria 2007-2013). Esta mayoría montañosa de Cantabria alberga principalmente sistemas ganaderos extensivos, definidos por la importancia que tiene el pastoreo en la alimentación animal (Beaufoy y Ruíz-Mirazo, 2013). Las ganaderías de vacas nodrizas de razas autóctonas, o de alóctonas de orientación cárnica, o de sus mezclas, son los sistemas ganaderos extensivos predominantes, por delante del equino, ovino y caprino. Los pastos permanentes son también los pastos mayoritarios, con proporciones de la superficie agraria útil total que en Europa sólo se encuentran en otras pocas regiones: Asturias, algunas regiones montañosas de Alpes, Cárpatos y Gran Bretaña y en Irlanda, Noruega y Córcega (Comisión Europea, 2012). Se trata, además, de pastos permanentes que comprenden comunidades vegetales diversas según su composición botánica y las adaptaciones de sus plantas a diferentes condiciones de clima, suelo y perturbaciones (p.ej. pastoreo y fuego). La mayoría son comunidades vegetales poco productivas, pero muchas de sus plantas aportan características beneficiosas para la salud animal (Moreno *et al.*, 2012) y de los consumidores (Humada *et al.*, 2013), y en general son generadoras de importantes servicios ecosistémicos en mayor medida que los cultivos anuales y en forma similar a los bosques (Moulin, 2014). El interés de conservación de estos pastos en Cantabria se refleja en su alta participación (alrededor del 60%) en la superficie de la Red Natura 2000 de montaña de la región (~146.000 has). El predominio de pastos permanentes diversos y de ganadería extensiva dan como resultado que el porcentaje estimado de la superficie agraria útil regional ocupada por Sistemas Agrarios de Alto Valor Natural sea de los más altos de Europa a escala regional (por encima del 80%; Comisión Europea, 2012; Agencia Europea de Medio Ambiente, 2012).

Como en otras áreas de montaña europeas, los terrenos comunales ocupan la mayor parte de la superficie de los municipios de montaña de Cantabria, principalmente las zonas con peores condiciones ambientales y de acceso. Los pastos comunales proveen la alimentación de la ganadería extensiva durante más de la mitad del año (Vázquez *et al.*,

2011a). Históricamente el uso silvopastoral de los terrenos comunales estaba fuertemente regulado, ya que de ello dependía la supervivencia de las comunidades rurales (García Fernández, 1990). Esta regulación, documentada en forma de ordenanzas de pastos desde la edad media (Gómez Sal *et al.*, 1995), refleja la existencia de culturas que co-evolucionaron con los recursos naturales próximos, y que fueron expertas en su uso sostenible mediante el pastoreo del ganado (Montserrat y Fillat, 1977). Desgraciadamente, en los últimos decenios y debido a múltiples causas (Busqué *et al.*, 2005), se ha producido una pérdida notable de los conocimientos y prácticas de estas culturas, lo que se traduce en una peor adaptación de la ganadería de montaña a su entorno, con consecuencias graves ya visibles en cuanto a degradación de los paisajes pastorales de montaña (Fillat *et al.*, 2012), y productividades ganaderas asociadas a estos excesivamente bajas (Moros y Busqué, 2014). La utilización ganadera de los pastos comunales es hoy mucho más simple de como era antiguamente (García Fernández, 1990). Por último, además de los cambios en los usos es ya evidente la existencia de un cambio climático, que tiene también importantes interacciones con el uso pastoral del territorio (Agencia Europea de Medio Ambiente, 2010; Gutiérrez *et al.*, 2010; Dumont *et al.*, 2014).

LA POLÍTICA AGRARIA COMÚN (PAC) 2015-2020 Y LOS PASTOS PERMANENTES

La superficie de pastos gestionada a nivel de explotación es la referencia utilizada para los pagos más importantes de la PAC a los ganaderos. Dado su preocupante declive en las últimas décadas y su demostrado valor como generadores de servicios ecosistémicos, los pastos permanentes han sido objeto de protección especial en las últimas campañas de la PAC. En la nueva campaña 2015-2020, la existencia de pastos permanentes es uno de los requisitos para acceder al nuevo pago verde del Pilar 1 por prácticas agrícolas beneficiosas para el clima y el medio ambiente (Reglamento 1307/2013, artículo 43). La definición de lo que debe considerarse oficialmente pasto permanente ha sido objeto de un debate intenso en los últimos años, dando como resultado su ampliación desde la normativa del periodo 2007-2014 a la correspondiente al periodo 2015-2020¹. Se han añadido tipos de vegetación no mayoritariamente herbáceos si se justifica adecuadamente la existencia de prácticas tradicionales y locales ligadas a su uso. Con esta nueva normativa se reconoce la existencia de tipos de pasto mayoritariamente leñosos, o con un grado de recubrimiento muy alto del suelo por la proyección vertical de las copas de

¹ Definiciones de pastos permanentes.

Reglamento 1120/2009: "las tierras utilizadas para el cultivo de gramíneas u otros forrajes herbáceos, ya sean naturales (espontáneos) o cultivados (sembrados), y no incluidas en la rotación de cultivos de la explotación durante cinco años o más..."

Reglamento 1307/2013: a la definición anterior se añade: "...pueden incluir otras especies como arbustivos y/o arbóreos que pueden servir de pastos, siempre que las gramíneas y otros forrajes herbáceos sigan siendo predominantes, y, cuando los Estados miembros así lo decidan, pueden asimismo incluir tierras que sirvan para pastos y que formen parte de las prácticas locales establecidas, según las cuales las gramíneas y otros forrajes herbáceos no han predominado tradicionalmente en las superficies para pastos."

arbolado; pero se exige que esto quede claramente documentado (incluso cartografiado) para evitar incluir situaciones donde no se produce actividad ganadera.

La importancia de los pastos arbustivos en la montaña de Cantabria es manifiesta: en 2012 se declararon admisibles casi 111.000 has de pastos comunales (un 56% del total de pastos admisibles declarados en la región), que sirvieron para que 2.800 beneficiarios cobraran 10,3 M € de pago único; un 84% de estos pastos comunales estaban clasificados como pastos arbustivos (PR) en la base de datos del Sistema de Información Geográfica de Parcelas Agrícolas (SIGPAC).

Otra de las novedades de la nueva normativa es que, en ciertos casos, y por las exigencias de conservación de la Directiva Habitats, especialmente en la Red Natura 2000, se facilita la inclusión de pastos permanentes leñosos que pudieran considerarse medioambientalmente sensibles (Reglamento 1307/2013, artículo 45).

La exigencia de distinguir entre pasto leñoso y comunidades vegetales leñosas sin uso pastoral se debe acometer a nivel de recinto de SIGPAC, usando para ello un coeficiente corrector (coeficiente de admisibilidad de pastos, CAP), que defina el porcentaje del recinto que sí se puede considerar como pasto (Reglamento Delegado 639/2014, artículo 8). La Comisión Europea busca, por tanto, que los pagos a los ganaderos se realicen por superficies de pasto (*sensu* nomenclator de la SEEP²), pero, por otro lado, no admite que esto sea verificable mediante declaración de ganado existente en pastoreo y no de superficie, tal como sugieren múltiples organizaciones a nivel de toda Europa (Beaufoy y Poux, 2012; Beaufoy y Ruíz-Mirazo, 2013).

El Fondo Español de Garantía Agraria (FEGA), como organismo estatal encargado de hacer aplicar y gestionar las ayudas de la PAC en coordinación con las Comunidades Autónomas, ha diseñado una metodología de cálculo automático del CAP en recintos SIGPAC basada en combinar datos de pendientes, índice de verdor según valores del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) obtenido de imágenes satelitales, y la altura de la vegetación estimada usando la tecnología LiDAR (acrónimo del inglés *Laser Imaging Detection and Ranking*). A día de publicar este artículo, esta metodología ya se ha aplicado a toda la superficie considerada declarable para recibir ayudas de la PAC (febrero de 2015), pero aún es pronto para juzgar sus resultados. Desde un punto de vista técnico, aunque el esfuerzo realizado se considera un buen comienzo, se detectan aún los siguientes inconvenientes:

- No se tiene en cuenta la naturaleza de la vegetación ni del ganado existente en pastoreo. SIGPAC sólo clasifica los

pastos como PS (pasto mayoritariamente herbáceo), PR (mayoritariamente arbustivo) o PA (pasto arbolado). La metodología de cálculo del CAP del FEGA no busca distinguir entre especies o grupos de especies/grupos funcionales dominantes de herbáceas/arbustos/árboles, que permitiría determinar su idoneidad al pastoreo por cada una de las especies ganaderas habituales. La determinación del tipo de ganado utilizando el recinto podría hacerse a través de la declaración de superficies del ganadero³, o cruzando la información con el Sistema de Trazabilidad Animal implementado para las principales especies usadas en ganadería extensiva.

- El uso de una mancha (recinto) de vegetación leñosa por herbívoros domésticos en pastoreo libre, caso habitual en los pastos comunales de montaña, es función del mosaico de tipos de pasto que los animales tienen en su área general de pastoreo. Además de estudiar las características de un recinto en particular, es necesario considerar los recintos contiguos, y situarse a la misma escala espacial de percepción que la de los rebaños en pastoreo (Laca, 2008).

La escala de paisaje, bien representada en las montañas de Cantabria por los terrenos comunales, es la más adecuada para la gestión pastoral y de la conservación de unos ecosistemas de alto valor en biodiversidad y provisión de servicios ecosistémicos (Rosa *et al.*, 2013). Es también una escala bien entendida por los ganaderos de extensivo y con sentido para lograr un buen funcionamiento del ecosistema pastoral. El efecto que tiene el todo (el paisaje) sobre las partes (las manchas bien definidas de vegetación o hábitats; o recintos) es tan importante, que enfocar la gestión únicamente a la escala de mancha no permite asegurar su mejora o conservación. La PAC considera la gestión agraria sostenible como su principal objetivo, pero está lejos de alcanzarlo si, de partida, no se eligen adecuadamente las escalas en las que trabajar.

INTEGRAR CONOCIMIENTOS PARA DISEÑAR HERRAMIENTAS DE GESTIÓN

La investigación en ecología y productividad de pastos de montaña y en el comportamiento y necesidades del ganado en pastoreo en España y en otros países con buena representación en estos ecosistemas pastorales, pone de relieve una serie de aspectos importantes para la gestión:

- A lo largo de la estación de pastoreo y desde el punto de vista del ganado, el pastoreo es sostenible si los animales pueden cubrir sus necesidades nutritivas con la oferta de los pastos que tienen a su disposición.

² Cualquier recurso vegetal que sirve de alimento al ganado, bien en pastoreo o bien como forraje.

³ El FEGA contempla incluir en la Solicitud Única la indicación del tipo de actividad agraria que realiza el ganadero en el recinto, definiéndose en el caso de pastos arbustivos y arbolados la especie de ganado en pastoreo o las labores para mantener cubierta herbácea. *Plan de Acción en relación con la admisibilidad de las superficies de pastos incluidas en SIGPAC*. FEGA, Octubre de 2014.



© Juan Busqué

Vaca tudanca en pasto de diente dominado por *Agrostis capillaris* y *Festuca rubra*, y con macollas dispersas de *Juncus effusus*. Valle del Nansa, con la Sierra de Peña Sagra (El Cornón, 2.046 m.) al fondo. Junio de 2013.

- De lo anterior se deduce que, para que el ganado en pastoreo consuma pastos de bajo valor nutritivo, tiene que tener también a su disposición pastos de mayor valor nutritivo que permitan, entre todos, cubrir sus necesidades.
- Cada especie de herbívoro doméstico tiene, en pastoreo, distintas necesidades nutricionales, apetencias y capacidad de acceder a las distintas fuentes forrajeras presentes (tipos de pasto o partes de un mismo tipo de pasto).
- Cada tipo de pasto, según su grado de adaptación al pastoreo y a la disponibilidad media de recursos (suelo, temperaturas, etc.), tiene un rango de utilidades forrajeras⁴ considerado sostenible: que permite su mantenimiento en el tiempo sin experimentar cambios importantes en su estructura y composición botánica.
- Utilidades forrajeras por debajo del rango de utilización sostenible indican infra-pastoreo. En el caso de la mayoría de pastos arbustivos, el infra-pastoreo da pie a una acumulación de material muerto, dada su lenta descomposición. Esto suele producir efectos negativos cuando sobrepasa ciertos umbrales: disminución de la biodiversidad, dificultad de tránsito y alto riesgo de incendios.
- Utilidades forrajeras por encima del rango de utilización sostenible señalan sobre-pastoreo, el cual puede ser recomendable para ciertos tipos de pasto y condiciones (p.ej. algún tipo de pasto arbustivo con cobertura alta), pero

negativo en muchas otras (pastos herbáceos de buena productividad o alta biodiversidad).

La gestión sostenible del pastoreo en pastos comunales de montaña busca, por tanto, mantener los animales en condiciones corporales aceptables (que no comprometan su salud ni su rendimiento) y la vegetación en unos niveles de utilización forrajera que maximicen sus valores productivos y ecológicos a unos costes asumibles. Relacionar los pagos de la PAC con el grado de consecución de estos objetivos debería ser un objetivo de referencia importante para los que trabajamos en la investigación y en la gestión de estos recursos pastorales.

Esta visión sistémica e integradora de la gestión de los pastos de montaña y el pastoreo es compleja, con lo que su traducción en herramientas que ayuden a llevarla a cabo tampoco es sencilla. Afortunadamente, además de la investigación existente sobre ecología y productividad de pastos y de las pautas del ganado en pastoreo, en los últimos años se han producido también importantes avances en capacidad computacional y en herramientas estadísticas que han sido utilizadas para modelizar a escalas muy detalladas el clima (Gutiérrez *et al.*, 2010), los suelos (Bock *et al.*, 2007) y la distribución de la vegetación (Bedia *et al.*, 2011). La integración de estos nuevos conocimientos en un modelo dinámico que

⁴ Utilización Forrajera: proporción del pasto producido en un año que es ingerido por los herbívoros en pastoreo.

simula en el espacio y tiempo el funcionamiento del sistema clima-suelo-vegetación-herbívoro-ganadero es el objetivo de la herramienta que se presenta en este trabajo.

EL MODELO DE SIMULACIÓN PUERTO

Este modelo de simulación dinámica (Hernández *et al.*, 2011) simula el funcionamiento de los aspectos más relevantes para la gestión de los sistemas pastorales. El Anexo a este artículo describe en detalle la estructura del modelo, la información de partida necesaria, los procesos que simula, los parámetros que contiene y la programación empleada. PUERTO puede abarcar desde situaciones sencillas (p.ej. un tipo de pasto aprovechado por un tipo de ganado), hasta ecosistemas pastorales complejos, tales como la mayoría de los comunales de montaña, con una distribución espacio-temporal heterogénea de orografía, pastos, clima, disponibilidad forrajera y rebaños ganaderos en pastoreo (Busqué *et al.*, 2006, 2007; Menéndez *et al.*, 2012; Requena, 2014).

El componente suelo-pasto del sistema está representado por teselas *i* compuestas cada una por un suelo con una profundidad y textura determinada, por una vegetación homogénea formada por uno o más tipos de pasto *f* y con unas condiciones de clima (temperaturas, precipitación y radiación solar) y fertilidad (nitrógeno orgánico y mineral) concretas. La existencia de más de un tipo de pasto en una tesela puede deberse a una disposición horizontal en mosaico (p.ej. matorral de *Erica vagans* y *Ulex gallii* en mosaico con pasto herbáceo de *Agrostis curtisii*), o por una disposición vertical de dos estratos leñoso-herbáceo cuando el estrato superior son árboles o arbustos altos (p.ej. escobas de *Genista florida* con pasto herbáceo dominado por *Deschampsia flexuosa* en su sotobosque). **El componente herbívoro** del sistema está representado por rebaños *h* compuestos por un número de animales de la misma especie, pero pudiendo pertenecer a su vez a grupos diferentes *c* según su raza, sexo o estado fisiológico.

El modelo contempla los procesos de crecimiento, senescencia, desfronde y descomposición de la vegetación (partes aérea y subterránea), mineralización del nitrógeno orgánico e ingestión y rendimientos productivos del ganado (Figura 1 del Anexo), simulando estos procesos a lo largo de un año completo en pasos de tiempo *t* cortos (p.ej. cada 10 días). El modelo no considera los procesos de cambios en la composición botánica de la vegetación, lo que limita sus simulaciones a un año completo. Para su funcionamiento, el modelo necesita información de partida sobre la disposición espacial de suelos y vegetación y la disposición espacio-temporal de variables climáticas y de los rebaños en pastoreo. Los siguientes apartados del artículo muestran tres ejemplos de aplicación del modelo simulando tres casos de complejidad creciente: 1) un sólo tipo de pasto y tres situaciones de

pastoreo; 2) una batería de escenarios de pastoreo típicos de comunales de la media montaña cántabra, donde se varía la participación de distintas especies ganaderas, la carga ganadera total y la proporción de la superficie total ocupada por pasto de mejor calidad; y 3) los pastos comunales de un municipio de la montaña media de Cantabria. Es importante remarcar que la simulación de estos casos no ha sido sometida aún a validaciones robustas con datos experimentales reales, aunque sí se ha comprobado que responde adecuadamente a la dinámica esperada desde un conocimiento general del funcionamiento de este tipo de sistemas.

CASO 1. SIMULACIÓN DE UN ÚNICO TIPO DE PASTO Y DISTINTAS PRESIONES DE PASTOREO

Este caso sencillo sirve para entender el tipo de información generada por el modelo PUERTO, es decir la dinámica en los valores de los componentes y procesos principales del sistema suelo-planta-animal, tal como están especificados en la figura 1 del anexo. El modelo simula un pasto permanente de diente productivo de la Europa atlántica, comúnmente denominado *Festuca-Agrostis* (eunis.eea.europa.eu/habitats/1008) en referencia a dos de sus gramíneas más frecuentes: *Festuca gr. rubra* y *Agrostis capillaris*. Como datos climatológicos se utilizan los diarios de 2013 correspondientes a la estación meteorológica de Santander-Parayas. Se considera un suelo de textura franca y espesor de 50 cm, y se simula la aplicación de estiércol a mediados de marzo, equivalente a una aplicación de 30 kg-ha⁻¹ de N orgánico fácilmente mineralizable. Se prueban tres escenarios de pastoreo: (i) sin pastoreo, (ii) pastoreo de una vaca pardo-alpina seca por hectárea y (iii) pastoreo de 2 vacas pardo-alpinas secas por hectárea. Los pastoreos son continuos desde mediados de abril hasta finales de noviembre. Las simulaciones se realizan para 10 años seguidos con las mismas condiciones de clima, pastoreo y manejo, lo que permite alcanzar unos valores de los componentes del pasto y del suelo razonables al inicio del año 10, que es el año de referencia utilizado. Las figuras 1 a 4 y la tabla 1 muestran la dinámica anual y mensual simulada de los procesos y componentes de la parte aérea del pasto de *Festuca-Agrostis* para los tres escenarios de pastoreo.

La estructura del pasto a lo largo del año es marcadamente diferente en cada escenario (Figura 1), con una relación inversa entre los componentes de biomasa viva, muerta en pie y muerta despegada y la presión de pastoreo. Esta relación es más fuerte en el pasto muerto en pie, llegando a ser el componente de biomasa aérea más abundante en el escenario sin pastoreo.

Lógicamente, la ingestión de pasto por los herbívoros (Figura 2, Tabla 1) es la variable que mejor explica el patrón de los componentes de la biomasa aérea según la presión de pastoreo.

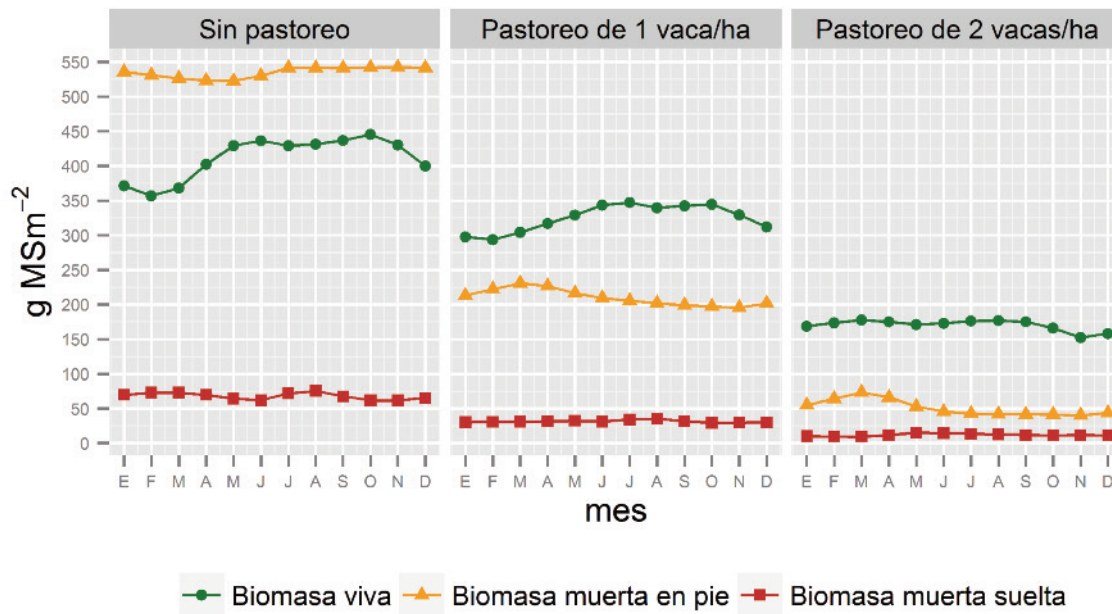


FIGURA 1. Medias mensuales de las simulaciones del modelo PUERTO para los componentes aéreos de la biomasa vegetal de un pasto herbáceo del tipo *Festuca-Agrostis* bajo tres escenarios diferentes de pastoreo.

FIGURE 1. Simulated monthly average values for the aerial biomass components of a *Festuca-Agrostis* grassland under three different grazing scenarios according to the PUERTO model.

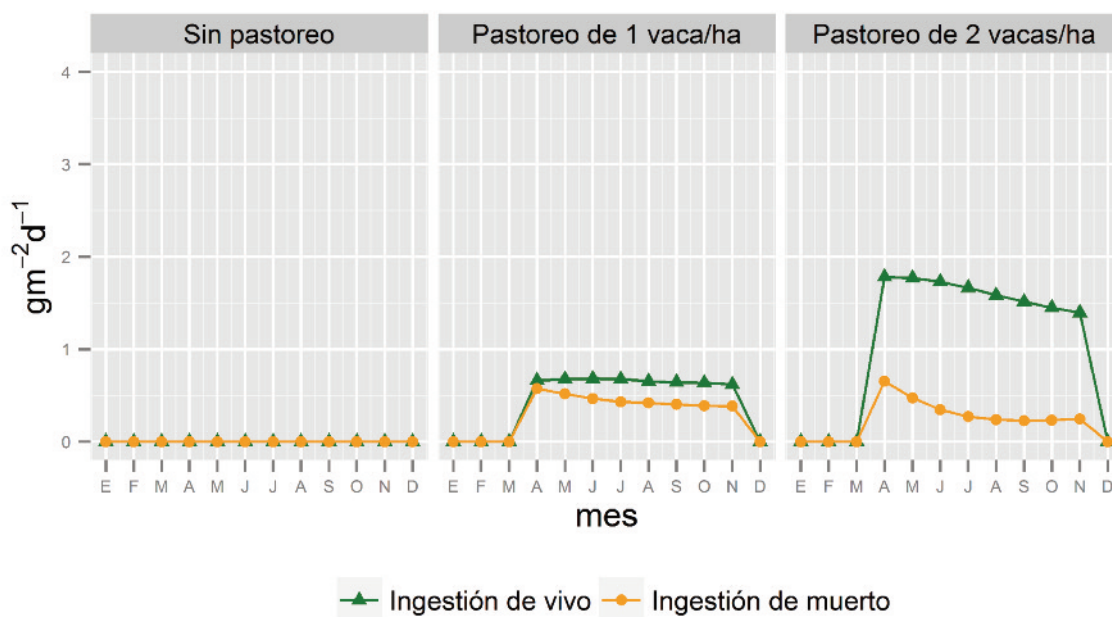


FIGURA 2. Medias mensuales de las simulaciones del modelo PUERTO para la ingestión del material vegetal de un pasto herbáceo del tipo *Festuca-Agrostis* bajo tres escenarios diferentes de pastoreo.

FIGURE 2. Simulated monthly average values of intake of live and dead aerial biomass of a *Festuca-Agrostis* grassland under three different grazing scenarios according to the PUERTO model.

Por su parte, la propia estructura del pasto afecta también la ingestión, al incidir en la capacidad de los animales de seleccionar el pasto vivo frente al muerto en pie. Así se observa que, por unidad animal (vaca), la ingestión de biomasa viva-muerta es mayor-menor para 2 vacas·ha⁻¹ (8,1-1,7 kgMS· vaca⁻¹·d⁻¹) que para 1 vaca·ha⁻¹ (6,6-4,5 kgMS·vaca⁻¹·d⁻¹).

Por su parte, los procesos característicos de la vegetación (crecimiento, senescencia y desfronde; Figura 3), siguen un

patrón relacionado tanto con las condiciones ambientales (Figura 4), como con la propia estructura del pasto (Figura 1). Al igual que con los componentes de la biomasa (Figura 1), la magnitud de los procesos de la vegetación disminuye al aumentar la presión de pastoreo. Esto es más evidente en el caso de la senescencia y el desfronde, ya que su magnitud es función fundamentalmente de la cantidad presente de biomasa viva y muerta en pie respectivamente. Estos procesos también pueden variar por la ocurrencia de condiciones

ambientales extremas: estrés hídrico y bajas temperaturas, algo que no ocurre con el clima simulado; o por cambios en la presión de pastoreo, la cual es estable en cada escenario simulado. Por su parte, el crecimiento del pasto varía poco entre escenarios (Figura 3, Tabla 1), siendo de ello responsable la aparente compensación que se produce entre dos de las

condiciones ambientales: el nitrógeno disponible (más alto con menos pastoreo) y la humedad del suelo (más alta con más pastoreo) (Figura 4).

Las sumas anuales de los valores de crecimiento de pasto y de ingestión de pasto verde, sirven para calcular los valores

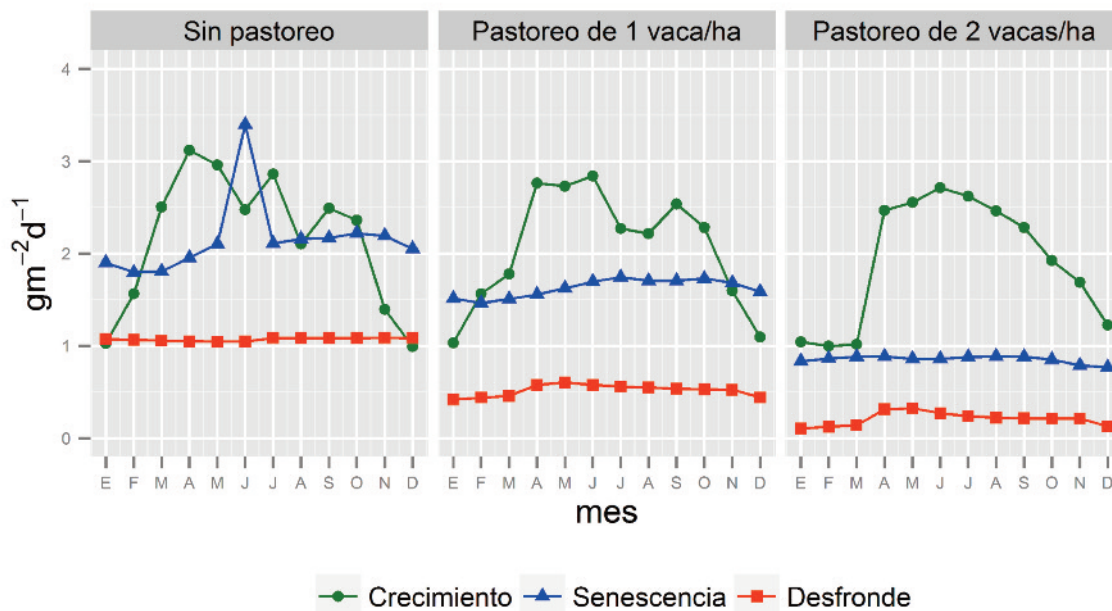


FIGURA 3. Medias mensuales de las simulaciones del modelo PUERTO para los procesos de crecimiento, senescencia y desfronde de la parte aérea de un pasto herbáceo del tipo *Festuca-Agrostis* bajo tres escenarios diferentes de pastoreo.

FIGURE 3. Simulated monthly average values of growth, senescence and litter deposition of the aerial biomass of a *Festuca-Agrostis* grassland under three different grazing scenarios according to the PUERTO model.

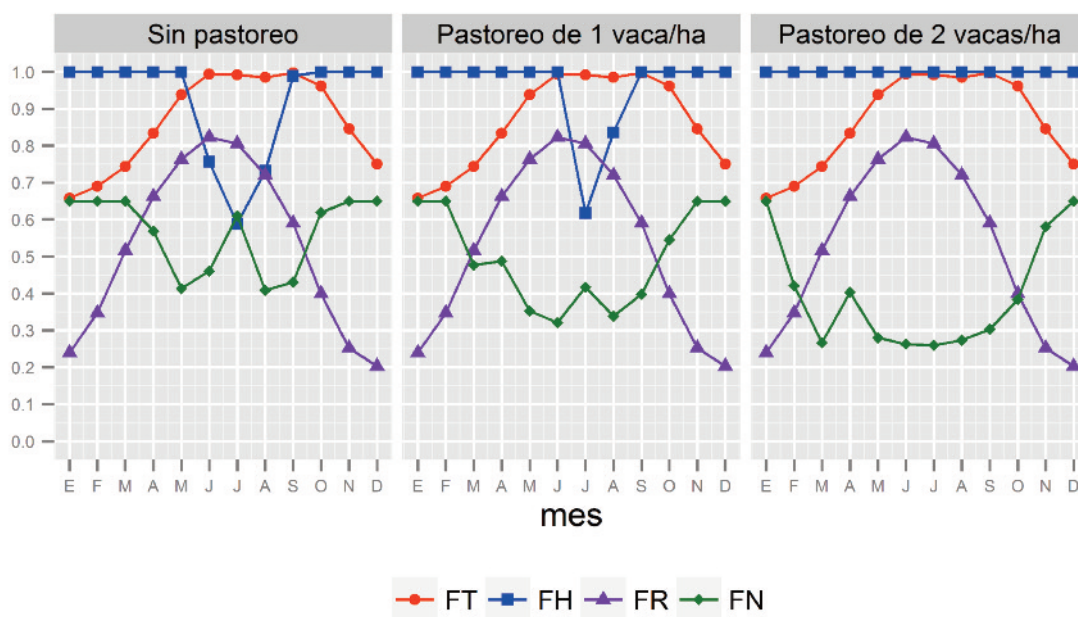


FIGURA 4. Medias mensuales de las simulaciones del modelo PUERTO para los factores de corrección del crecimiento vegetal por temperatura FT, humedad en el suelo FH, radiación FR y nitrógeno FN correspondientes a un pasto herbáceo del tipo *Festuca-Agrostis* bajo tres escenarios de pastoreo diferentes.

FIGURE 4. Simulated monthly average values of vegetation growth correction factors due to temperature FT, soil humidity FH, radiation FR and nitrogen FN of a *Festuca-Agrostis* grassland under three different grazing scenarios according to the PUERTO model.

Escenario	Crecimiento (g·m ⁻² ·año ⁻¹)	Senescencia (g·m ⁻² ·año ⁻¹)	Desfronde (g·m ⁻² ·año ⁻¹)	Ingestión vivo (g·m ⁻² ·año ⁻¹)	Utilización Forrajera
Sin pastoreo	775	775	385	0	0
Pastoreo de 1 vaca·ha ⁻¹	741	585	186	157	0,21
Pastoreo de 2 vacas·ha ⁻¹	690	307	747	386	0,56

TABLA 1. Valores anuales predichos por el modelo PUERTO de variables indicadoras de la dinámica de la biomasa aérea de un pasto herbáceo del tipo *Festuca-Agrostis* bajo tres escenarios diferentes de pastoreo. La utilización forrajera se calcula como la relación entre ingestión y crecimiento.

TABLE 1. Predicted annual values by the PUERTO model of variables explaining the dynamics of the aerial biomass of a *Festuca-Agrostis* grassland under three different grazing scenarios. Forage utilisation is calculated as the ratio between intake and growth.

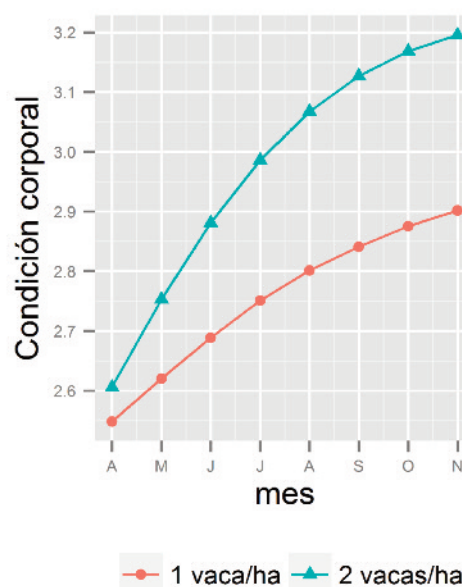
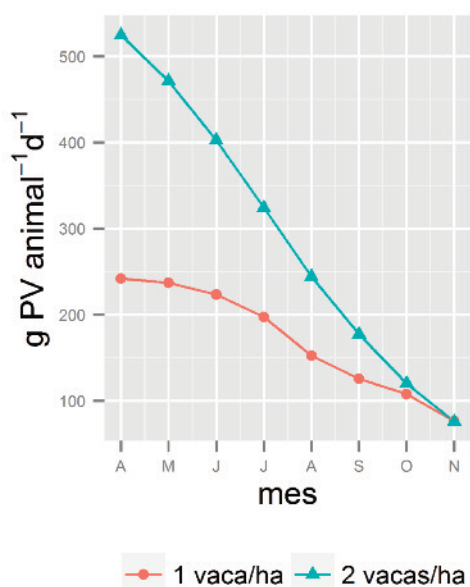


FIGURA 5. Medias mensuales de las simulaciones del modelo PUERTO para la variación diaria de peso (izquierda) y la condición corporal (derecha) de los dos escenarios de vacas en pastoreo sobre pasto de *Festuca-Agrostis*.

FIGURE 5. Simulated monthly average values of change in animal daily live weight (left) and body condition score (right) of the two scenarios of cattle grazing on a *Festuca-Agrostis* grassland according to the PUERTO model.

de utilización forrajera (UF; Tabla 1). La UF para 1 vaca·ha⁻¹ (0,21) se sitúa probablemente por debajo de lo considerado sostenible para pastos de *Festuca-Agrostis*, lo que indicaría una posible degradación del pasto a medio plazo hacia otro tipo de comunidades vegetales de menor valor forrajero.

este caso (p.ej. Wright *et al.*, 1989; Baumont *et al.*, 2006). La simulación de este tipo de sistemas de pastoreo sencillos también resulta adecuada para recrear escenarios donde varíen factores como clima, suelo y presión de pastoreo, con el objetivo de estudiar las posibles interacciones existentes, de gran interés para una gestión adaptativa del pastoreo.

El balance entre la energía neta ingerida y la energía necesaria para cubrir las necesidades del ganado en pastoreo, da como resultado las variaciones en sus pesos y los cambios en sus condiciones corporales (Figura 5). En los dos escenarios de pastoreo contemplados, el balance es siempre positivo y con mejores valores para el caso de 2 vacas·ha⁻¹ (aumento de la condición corporal de las vacas en 7 décimas) que para 1 vaca·ha⁻¹ (aumento de la condición corporal en 4 décimas). La mayor ingestión de forraje vivo por vaca para 2 vacas·ha⁻¹ (Tabla 1), resultado a su vez de la mayor capacidad para seleccionar forraje vivo frente a muerto (Figura 2) dada la estructura del pasto (Figura 1), explica estos resultados.

CASO 2. SIMULACIÓN DE ESCENARIOS DE PASTOREO EN UNA MEZCLA DE VEGETACIÓN TÍPICA DE LA MEDIA MONTAÑA DE CANTABRIA

El uso de este tipo de escenarios sencillos es muy conveniente para validar los aspectos más generales del modelo, ya que es corriente encontrar mucha información de experimentos en la literatura científica semejantes a los ejemplos de

Este caso es un ejemplo que permite ver la utilidad de una herramienta como el modelo PUERTO para estudiar opciones de pastoreo y gestión típicos de los pastos comunales de montaña. El ejemplo considera de partida una mancha de vegetación donde se mezclan en grano fino tipos de vegetación arbustiva-herbácea común en suelos ácidos y podsolizados de la media montaña de Cantabria: 40% de la superficie dominado por *Pseudarrhenatherum longifolium*, gramínea de porte medio y bajo valor forrajero, 40% de matorral de *Ulex gallii* y 20% de matorral de brezos de bajo

porte (p.ej. *Erica cinerea*, *E. vagans*, *E. mackaiana*). Este tipo de vegetación mayoritariamente leñosa suele clasificarse en SIGPAC como pasto arbustivo (PR), y en el caso de la cuantificación del CAP por el método del FEGA, obtendría posiblemente un valor bajo (menor del 50%).

Entre los escenarios a probar se considera la existencia de una cantidad variable de pasto de *Festuca-Agrostis* (0, 10, 20 ó 30% de la superficie total, dispuesto en una mancha continua). Este tipo de pasto, de mayor productividad que los anteriores, es relativamente frecuente en las zonas de menor pendiente, con suelos más fértiles y mayor accesibilidad y uso por el ganado. Las proporciones ensayadas cubren el rango que es habitual encontrarse en la media montaña, o sería viable alcanzar desde un punto de vista económico.

Otra variable utilizada para generar escenarios es la especie ganadera en pastoreo, probándose porcentajes diferentes de vacuno y equino en pastoreo único o mixto (0, 25, 50, 75 y 100% de una de las dos especies frente a la otra). De cara a este ejemplo se ha optado por elegir estas especies por ser las actualmente predominantes, aunque simular escenarios con ganado menor sería también de gran interés para cuantificar sus numerosas ventajas en este tipo de ecosistema pastoral (García Prieto et al., 2009). La última variable a utilizar en la generación de escenarios es la carga ganadera instantánea, probándose cuatro niveles: 0,50, 0,75, 1,00 y 1,25 UGM·ha⁻¹.

Se han tomado condiciones de suelo y clima normales para este tipo de vegetación, y como ganado hembras adultas secas de razas rústicas, con una condición corporal media (2,5) al inicio del pastoreo y con una duración del pastoreo de 8 meses (abril a noviembre).

En total se comparan 80 escenarios diferentes (5 combinaciones de especies ganaderas × 4 cargas ganaderas × 4 proporciones de pasto mejorado). La viabilidad de los escenarios se mide con dos criterios relativamente sencillos: (1) que la utilización forrajera de los cuatro tipos de vegetación presentes se encuentre en unos rangos de interés (Figura 6), y (2) que se produzcan variaciones de peso o condición corporal del ganado dentro de unos rangos razonables (Figura 7).

En cuanto al primer criterio, se distingue entre los tipos de vegetación que se quiere conservar, pastos de *Festuca-Agrostis* y brezal, y los que se quiere mejorar: matorral de *Ulex gallii* y pasto de *Pseudarrhenatherum longifolium*. La conservación del pasto de *Festuca-Agrostis* tiene un objetivo productivo, mientras que la de los brezales, además de por su interés natural (hábitat recogido en el anexo I de la Directiva 92/43), también se justifica por sus efectos saludables sobre el ganado que los ramonea (Moreno et al., 2012). Por la distinta fertilidad de sus suelos y adaptación a la defoliación, estos dos tipos de vegetación tienen unos rangos de utilización forrajera sos-

tenible (RUFs) marcadamente diferentes (Armstrong y MacDonald, 1992; Rickert, 1996). Por su parte, para los pastos de *Pseudarrhenatherum longifolium* y los matorrales de *Ulex gallii* el objetivo es reducir su presencia, o al menos frenar su expansión, algo que se puede conseguir a medio-largo plazo con animales en pastoreo capaces de defoliar o ramonear estas plantas por encima o a niveles similares a su capacidad de regeneración. Los terrenos dominados por *Ulex gallii* son los que tienen mayor incidencia de quemadas provocadas en la media montaña ácida de Cantabria, con lo que resulta primordial reducir su cobertura allí donde se presenta como especie vegetal fuertemente dominante.

La simulación con el modelo PUERTO de los valores de utilización forrajera (Figura 6) muestra que ninguno de los 80 escenarios produce una utilización forrajera del *Ulex* por encima de su rango sostenible, mientras que 15 escenarios al menos consiguen una UF dentro de dicho rango, algo que mantendría su proporción relativamente estable. De esos 15 escenarios, 12 corresponden a situaciones donde las yeguas predominan, siempre bajo las dos cargas ganaderas más altas. Los tres únicos escenarios con UF sostenible de *Ulex* y una proporción idéntica de vacas y yeguas se consideran inviables por producir un elevado sobre-pastoreo del brezal. Por la misma razón se rechazan también dos de los 12 escenarios con UF sostenible de *Ulex* y pastoreo mayoritario de yeguas (escenarios $CG_{1,25}\text{-Yeguas}_{75\%}\text{-F-A}_{20\%}$ y $CG_{1,25}\text{-Yeguas}_{75\%}\text{-F-A}_{30\%}$). Los 10 escenarios considerados viables con respecto a los objetivos de conservación de *Ulex* y brezo cumplen también sobradamente con el objetivo de sobre-utilizar el pasto de *Pseudarrhenatherum*, pero solo dos cumplen con el objetivo de no sobre-pastar el pasto de *Festuca-Agrostis*: $CG_{1,00}\text{-Yeguas}_{75\%}\text{-F-A}_{30\%}$ y $CG_{1,00}\text{-Yeguas}_{100\%}\text{-F-A}_{30\%}$.

El segundo criterio referente al mantenimiento del ganado en unas condiciones corporales adecuadas, se define considerando viables las situaciones en las que las ganancias o pérdidas de condición corporal (CC) no sobrepasen la condición corporal de referencia (2,5) ± 20%. Es decir, que los animales se encuentren en un rango de entre 2 y 3 puntos de condición corporal. Superar la barrera de CC=3 no será razonable para este tipo de ecosistema y ganado porque estaría probablemente asociado a una baja utilización de los peores recursos, y por tanto a procesos de matorralización y embastecimiento. Por su parte, bajar de CC=2 tendría repercusiones graves en la productividad del ganado.

La Figura 7 muestra la evolución de la CC para los 80 escenarios simulados. De los 22 escenarios viables en cuanto a CC, 17 corresponden a las dos cargas ganaderas más bajas. Sólo en un escenario (100% yeguas y 30% F-A) es posible mantener la CC de los animales en el rango establecido a la carga ganadera más alta (1,25 UGM ha⁻¹). El pastoreo de especies únicas es más viable (16 escenarios: 12 de yeguas y 4 de vacas) que los mixtos (6 escenarios). Del pastoreo mixto,

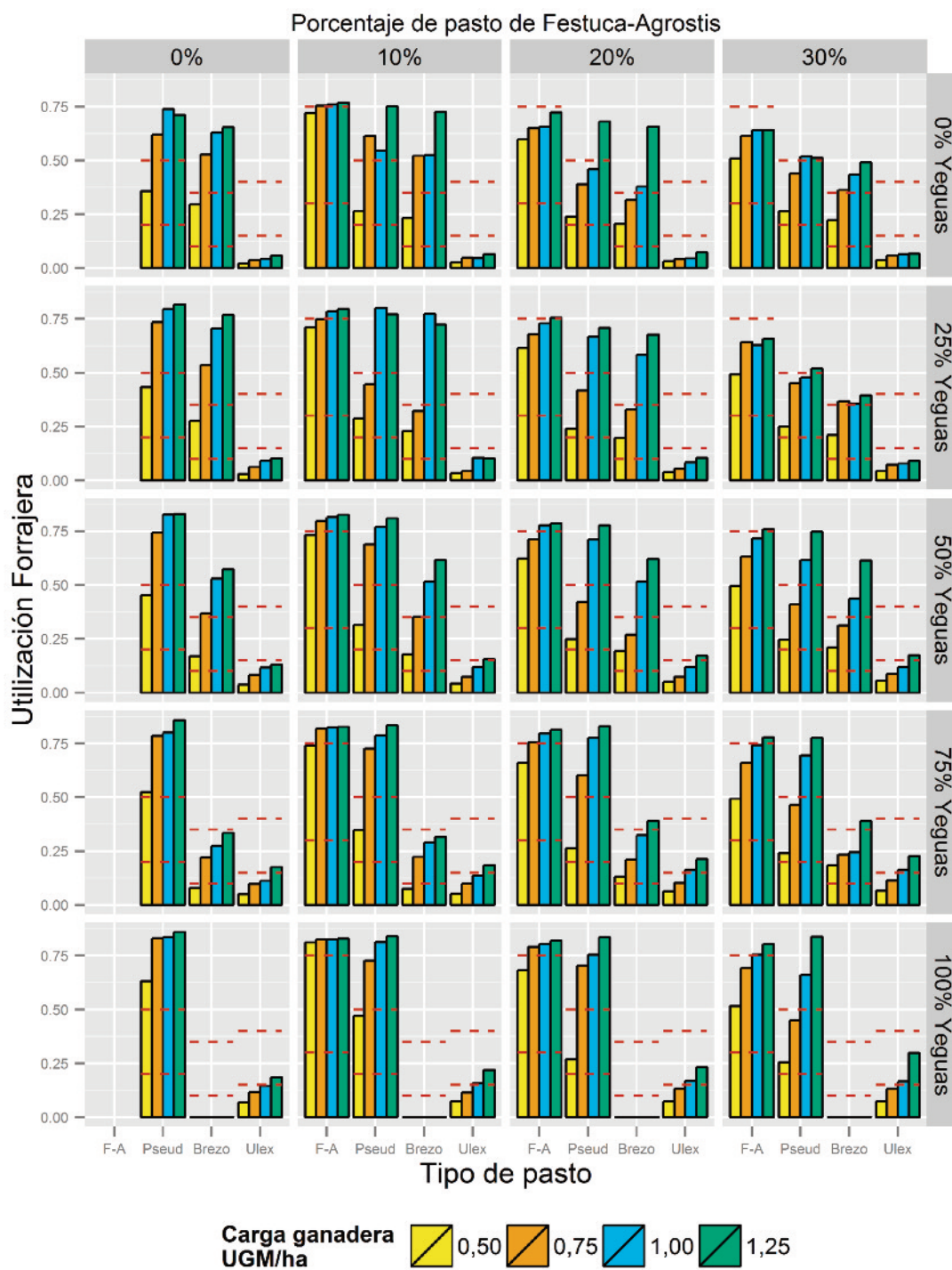


FIGURA 6. Valores simulados de Utilización Forrajera para cada tipo de pasto (eje horizontal de cada figura) en los 80 escenarios recreados con el modelo PUERTO según tipo de ganado en pastoreo (filas; lo que no es yeguas es vacas), porcentaje de pasto mejorado (columnas) y carga ganadera (colores). El espacio delimitado entre las rayas discontinuas para cada tipo de pasto señala su rango de utilización forrajera sostenible.

FIGURE 6. Forage utilisation values for each type of pasture (horizontal axis of each figure) in the 80 scenarios simulated with PUERTO according to the grazing livestock species (rows, the percentage of improved grassland area (columns) and the stocking rate (colours). The area between dashed lines for each type of pasture is the range of sustainable forage utilisation.

la mayoría de escenarios viables (5) corresponden a aquellos con un porcentaje de equino igual o menor al 50%. La ausencia de pasto de *Festuca-Agrostis* sólo consigue ser viable en 3 ocasiones, todas correspondiendo a la CG más baja, y dos de ellas a pastoreo de yeguas exclusivamente.

Si se toman en cuenta de forma conjunta los objetivos de utilización forrajera y de mantenimiento de la condición corporal de los animales, el resultado es que de los escenarios probados sólo resultaría viable el correspondiente al pastoreo único de yeguas, con una carga ganadera de 1 UGM·ha⁻¹ y con un

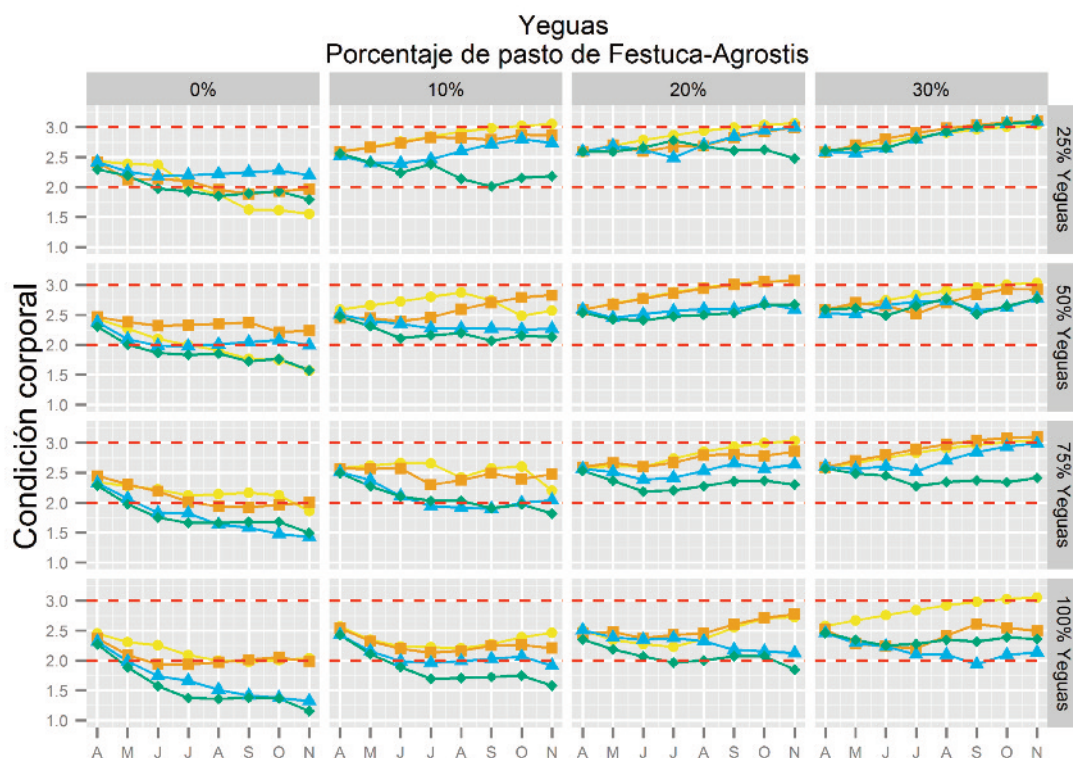
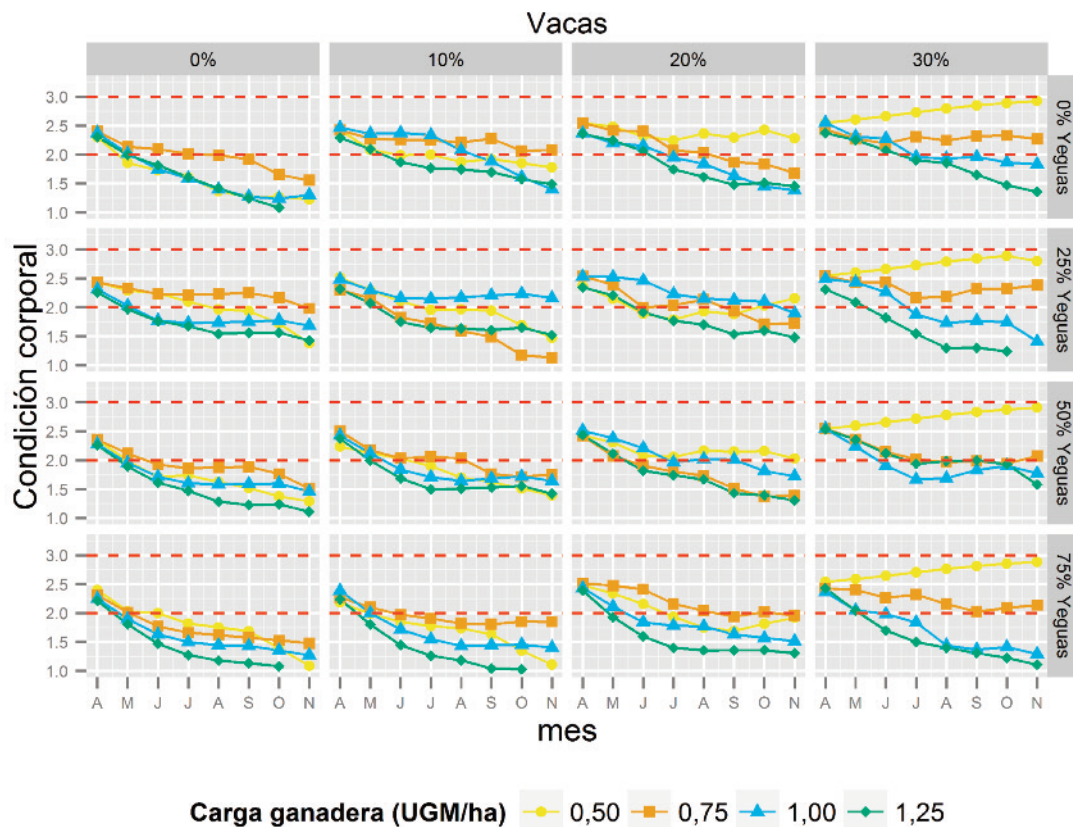


FIGURA 7. Variación mensual simulada de la condición corporal del ganado equino (arriba) y vacuno (abajo) en los 80 escenarios recreados con el modelo PUERTO: tipo de ganado en pastoreo (filas), porcentaje de pasto mejorado (columnas) y carga ganadera (colores). El espacio delimitado entre las dos rayas discontinuas rojas señala el rango de condiciones corporales consideradas viables (2-3).

FIGURE 7. Monthly values of body condition of mares (above) and cattle (below) for the 80 scenarios simulated with PUERTO according to the grazing livestock species (rows), the percentage of improved grassland area (columns) and the stocking rate (colours). The area between dashed lines is the range of viable body condition scores (2-3).

30% de la superficie de pasto de *Festuca-Agrostis*. Si, además de estos objetivos, se añadieran otros de rentabilidad económica sin ayudas externas, este escenario también sería probablemente considerado inviable. Estos resultados ponen en evidencia la dificultad de alcanzar sistemas de pastoreo sostenibles únicamente con ganado mayor en la media montaña ácida de la Cordillera Cantábrica, algo ya puesto de manifiesto en estudios experimentales (García Prieto *et al.*, 2009; Celaya *et al.*, 2011). Con estos resultados, resulta paradójico que la notable carencia actual de pastoreo de ovino y caprino en estos ecosistemas es en buena parte resultado del escaso apoyo que estos sistemas han recibido en comparación con el predominante de vacas nodrizas en los programas de la PAC de las últimas décadas (Osoro *et al.*, 1999).

CASO 3. SIMULACIÓN DEL SISTEMA PASTORAL A ESCALA DE PAISAJE

Los pastos comunales, como parte que son de los montes, están obligados a contar con instrumentos de gestión, tal como queda recogido en la Ley de Montes de 2003. Para la redacción de los primeros instrumentos de gestión de montes en Cantabria (proyectos de ordenación en Montes de Utilidad Pública), y en lo que se refiere a los recursos pastorales, se está actualmente empleando el modelo PUERTO como herramienta de apoyo. La información que se necesita para aplicar PUERTO a nivel de monte cubre varios de los requerimientos mínimos definidos en estos proyectos de ordenación⁵ (p.ej. indicación de las características del clima, suelo, definición de unidades inventariables, infraestructuras, vegetación y características del ganado en pastoreo: titularidad, tipo, cantidad, distribución y manejo). Por su parte, la aplicación del modelo PUERTO en las condiciones actuales de los montes permite evaluar objetivamente el uso de sus recursos pastorales, cuantificando su magnitud e influencia sobre la dinámica de los ecosistemas presentes, aspectos también contemplados en los proyectos de ordenación⁶. Además de esta visión territorial del uso de los pastos, el modelo PUERTO también permite estimar los rendimientos ganaderos generados a escala de unidad inventariable⁷, lo que aporta información difícil de obtener de otra manera para completar el balance económico del monte. La cuantificación por unidad inventariable del uso pastoral y su valor respecto a objetivos de conservación y de producción, permite posteriormente priorizar las necesidades de mejora entre las distintas unidades inventariables del monte, objetivo último de los proyectos de ordenación.

En este apartado se muestra la aplicación del modelo PUERTO en el amplio territorio pastoral de Tudanca, municipio de 5.226 hectáreas, representativo de la media montaña

cantábrica (Vázquez *et al.*, 2011a). La mayor parte de la superficie de Tudanca (83%) es terreno comunal, correspondiendo mayoritariamente a cuatro Montes de Utilidad Pública propiedad de los cuatro pueblos que conforman el municipio (Figura 8). Los pastos comunales son principalmente arbustivos (78% de su superficie es pasto arbustivo –PR– según SIGPAC). La ganadería extensiva es la principal actividad económica, con 24 explotaciones familiares y 787 cabezas de vacuno y 349 de equino (Vázquez *et al.*, 2011b).



FIGURA 8. Ortofoto del municipio de Tudanca (Cantabria). Las líneas amarillas delimitan el terreno abierto al pastoreo (comunal) correspondiente a los cuatro pueblos (con sus nombres). Difuminado en blanco se señalan los terrenos manejados de forma privada, aunque en su mayoría sólo durante una parte del año. Las líneas rojas señalan las unidades inventariables (con sus números) utilizadas para la simulación con el modelo PUERTO.

FIGURE 8. Orthophoto of the municipality of Tudanca (Cantabria). Yellow lines delimit the pastoral commons of the four existing villages (with their names). Blurred in white is the land managed privately, although most of it during just certain periods of the year. Red lines mark the pastoral units (with their numbers) used for the simulation with PUERTO.

⁵ En Cantabria esta legislación es muy reciente: Orden GAN/63/2014, de 9 de diciembre, por la que se aprueban las instrucciones generales de ordenación de montes de Cantabria.

⁶ Esta información también resulta valiosa para los planes de gestión de espacios protegidos, obligatorios para la Red Natura 2000 (Ley 42/2007 del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad). En Cantabria, una proporción alta de los pastos comunales se encuentran dentro de la Red Natura 2000.

⁷ *Sensu* proyecto de ordenación en Cantabria (Orden GAN/63/2014): unidades menores de división del monte, que se pueden diferenciar por su vegetación y por límites naturales o artificiales fácilmente identificables.

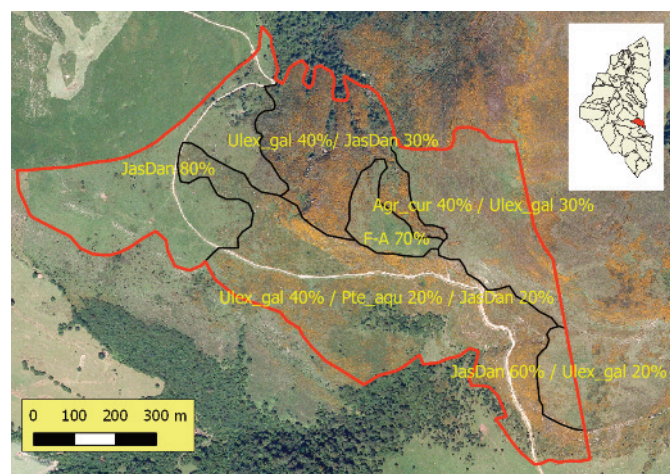


FIGURA 9. Unidad Inventarial n°16 del municipio de Tudanca (ver Figura 8) utilizada como ejemplo para mostrar los resultados del modelo PUERTO a escala de unidad inventarial. Esta unidad tiene una superficie total de 64 hectáreas. Los polígonos delimitados por líneas negras son las teselas de vegetación. El texto en amarillo define su composición dominante. Ulex_gal: matorral de *Ulex gallii*; JasDan: pasto de diente herbáceo asimilable a la asociación fitosociológica *Jasiono laevis-Danthonietum decumbentis*; Agr_cur: pasto de diente herbáceo asimilable a la asociación *Carici piluliferae-Agrostietum curtisii*; F-A: pasto dominante en *Festuca rubra* y *Agrostis capillaris*; Pte_aqu: *Pteridium aquilinum*.

FIGURE 9. Pastoral unit n°16 of the municipality of Tudanca (see Figure 8) used as an example to show the results of the PUERTO model at the level of a pastoral unit. The total area of the unit is 64 hectares. The black lines delimit distinct vegetation patches, which are defined by the yellow text. Ulex_gal: *Ulex gallii* shrub; JasDan: grassland of the phytosociological association *Jasiono laevis-Danthonietum decumbentis*; Agr_cur: grassland of the phytosociological association *Carici piluliferae-Agrostietum curtisii*; F-A: *Festuca-Agrostis* grassland; Pte_aqu: bracken.

La escala más apropiada para representar las características del sistema pastoral y los resultados de las simulaciones del modelo PUERTO es la unidad inventarial (UI; Figura 8). Una vez que se corre el modelo para todo el territorio con la información de partida necesaria (datos de clima, suelo, vegetación y pastoreo de los distintos rebaños; Figura 1 del Anexo), los resultados del modelo por UI pueden consultarse en informes generados automáticamente, permitiendo así interpretar las características y el uso que éstas están experimentando. A continuación se representa la información generada para una UI cualquiera de Tudanca (Figuras 9 y 10 y Tablas 2 y 3).

La Tabla 2 resume características de partida y resultados de aplicar PUERTO sobre los tipos de vegetación presentes en la UI con interés para la gestión. Aspectos como la cobertura, superficie ocupada, pendiente o inclusión del tipo de vegetación en el Anexo I de la Directiva Habitats son importantes para definir qué tipo de actuaciones se podrían programar potencialmente en la UI dentro de un proyecto de ordenación del monte (p.ej. desbroces o enmiendas). La predicción con PUERTO de la utilización forrajera (columna UF de la Tabla 2) permite clasificar el uso pastoral de cada tipo de vegetación como sostenible o no (equilibrado vs. sobre- o infra-pastoreo; última columna de la Tabla 2), ayudando con ello a evaluar la necesidad de acometer las actuaciones potencialmente viables, o planificar mejor el pastoreo. En la UI n°16 existe el potencial de mejorar de forma mecanizada (p.ej. desbroces o fertilización) bastante superficie sin limitaciones por pendiente o por interés de conservación. Por otra parte se pastorea en exceso casi todos sus tipos de vegetación, lo que indica que sería recomendable mejorar la distribución del ganado entre esta UI y las UI vecinas.

Estrato	Nombre	Dir 9243	Tes	Cob (%)	Pend (%)	Sup (ha)	pend35 (%)	UF	RUFS	Grado pastoreo
Herbáceo	JasDan	sí	5	99	29	22,2	42	0,67	0,25-0,65	sobre-
	Agr_cur	no	4	97	35	7,6	36	0,67	0,20-0,60	sobre-
	F_A	no	1	100	22	1,7	44	0,84	0,30-0,75	sobre-
	Sen_jac	no	2	100	22	1,0	38	0,00	0,10-0,40	--
Mat. bajo	Ulex_gal	no	6	98	37	18,1	39	0,18	0,15-0,40	equil.
	Brezo_bajo	sí	6	98	34	6,7	42	0,60	0,10-0,35	sobre-
	Rubus	no	1	95	36	0,5	72	0,71	0,10-0,40	sobre-
Mat. Alto	Eup_pol	no	1	96	32	0,5	33	0,31	0,10-0,40	equil-
	Pte_aqu	no	1	100	41	4,9	25	0,66*	0,30-0,60*	sobre-*
Árboreo	Cra_mon	no	1	100	22	0,8	36	0,82*	0,30-0,60*	sobre-*

JasDan: pasto de diente herbáceo asimilable a la asociación *Jasiono laevis-Danthonietum decumbentis*; Agr_cur: pasto de diente herbáceo asimilable a la asociación *Carici piluliferae-Agrostietum curtisii*; F-A: pasto dominante en *Festuca rubra* y *Agrostis capillaris*; Sen_jac: *Senecio jacobea*; Ulex_gal: matorral de *Ulex gallii*; Brezo_bajo: brezos de baja talla. Rubus: *Rubus ulmifolius*; Eup_pol: *Euphorbia polygalifolia*; Pte_aqu: *Pteridium aquilinum*; Cra_mon: *Crataegus monogyna*. * UF correspondiente al estrato herbáceo presente debajo del dosel superior.

TABLA 2. Comunidades vegetales presentes en la Unidad Inventarial n°16. Dir9243: incluida en el Anexo I de la Directiva Habitats. Tes: número de teselas ocupadas. Cob: cobertura vegetal media de las teselas. Pend: pendiente media de las teselas. Sup: superficie ocupada. pend35: porcentaje de la superficie con pendiente menor de 35% (i.e. fácilmente mecanizable). UF: Utilización forrajera. RUFS: Rango de utilización forrajera sostenible. Grado pastoreo: sobre-pastoreo, equilibrado o infra-pastoreo. Las columnas en itálica son valores predichos por el modelo.

TABLE 2. Vegetation communities of the pastoral unit n°16. Dir9243: included in annex I of the Habitats Directive. Tes: number of vegetation patches. Cob: average vegetation cover of the patches. Pend: average slope of the vegetation patches. Sup: area occupied. pend35: percentage of the area with a slope of less than 35% (i.e. easy to work with tractors). UF: forage utilisation. RUFS: range of sustainable forage utilisation. Grado pastoreo: over-grazed, in equilibrium or under utilised. Columns in italics are predicted values according to PUERTO.



© Germán Maestro

Vacas limusinas pasciendo en un escajal-helechal (*Ulex gallii* y *Pteridium aquilinum*). Detrás, bosque de robles (*Quercus petraea*) y hayas (*Fagus sylvatica*). Hermandad de Campoo de Suso. Septiembre de 2014.

La Tabla 3 cuantifica la ingestión por cada rebaño presente en la UI nº16 del forraje (digestible) existente. Este valor estimado por el modelo PUERTO tiene en cuenta la capacidad de ingestión de cada tipo de ganado (según especie y estado fisiológico)

sobre cada tipo de pasto (según su botánica, estructura y accesibilidad), la selección entre las distintas fuentes de forraje en oferta en el área de pastoreo (esa UI y otras adyacentes que formen su área de pastoreo), y la competencia por el pasto entre

Animal	CEA	UGM	Días	Ing total (kg MSd)	Ing en UI (kg MSd)	UI/Total (%)	UI rebaño / UI todos (%)
Equino	39-015	10,0	360	16.526	11.437	69,2	21,6
	39-037	12,0	360	21.550	5.103	23,7	9,7
	39-113	17,0	150	26.812	3.876	14,5	7,3
	39-112	11,0	150	18.152	2.627	14,5	5,0
	39-114	6,0	150	8.655	1.248	14,4	2,4
	39-011	3,0	150	4.208	599	14,2	1,1
Vacuno	39-015	50,4	150	37.273	10787	28,9	20,4
	39-015	33,6	120	25.530	5.641	22,1	10,7
	39-013	31,1	120	37.609	5.464	14,5	10,3
	39-015	20,0	120	21.439	3.573	16,7	6,8
	39-013	15,0	120	12.804	2.458	19,2	4,7
Total		32.994 UGMxd	230.558	52.813	22,9	100	

TABLA 3. Rebaños utilizando la Unidad Inventarial (UI) nº16. CEA: Código de Explotación Agraria del propietario. UGM: unidades de ganado mayor medias en la UI durante el tiempo de pastoreo. Días: días de pastoreo en la UI. Ing total: Ingestión total del rebaño en pastoreo en todo el territorio (kg de materia seca digestibles). Ing en UI: Ingestión del rebaño correspondiente a la UI. UI/Total: porcentaje de la ingestión total del rebaño en la UI. UI rebaño/UI todos: porcentaje de la ingestión total en la UI que corresponde al rebaño. Las columnas en itálica son valores predichos por el modelo.

TABLE 3. Livestock herds using the pastoral unit (PU) nº16. CEA: farm official code. UGM: average livestock units in the PU during the grazing period. Días: number of grazing days in the PU. Ing total: Herd annual forage intake in all its grazing range (kg of digestible DM). Ing en UI: Herd annual forage intake in the PU. UI/Total: percentage of the herd total forage intake corresponding to the PU. UI rebaño/UI todos: percentage of total forage offtake in the PU which corresponds to the herd. Columns in italics are predicted values according to PUERTO.

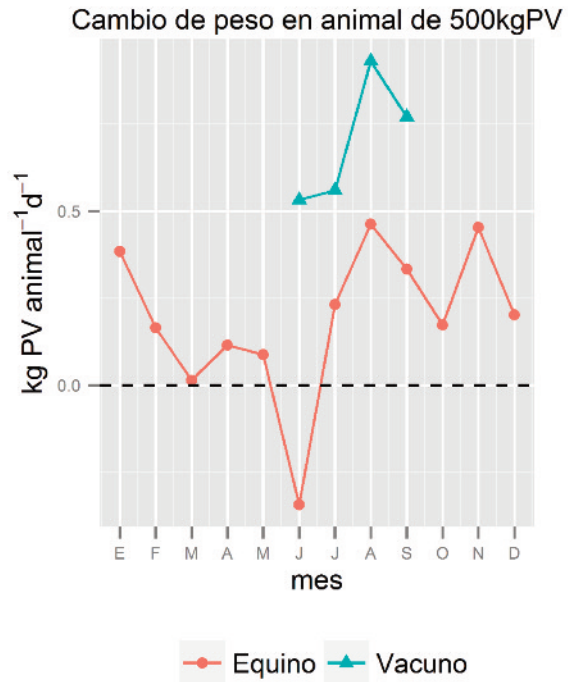
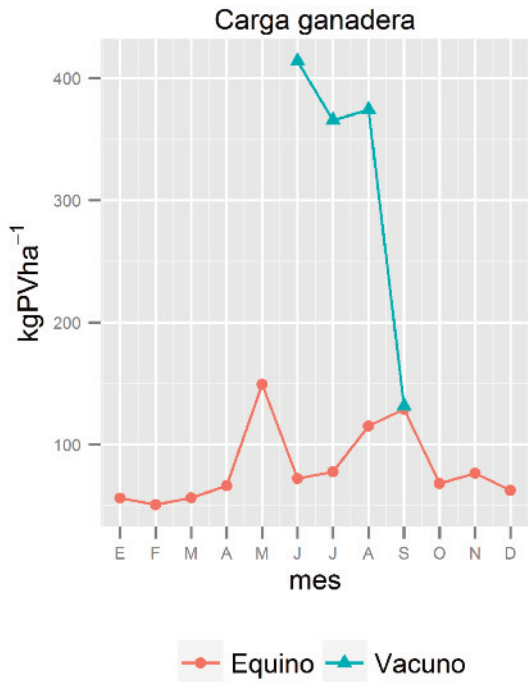
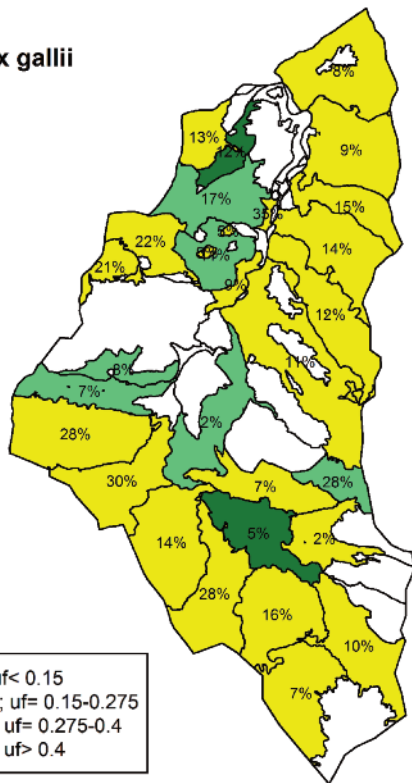


FIGURA 10. Valores mensuales medios predichos de carga ganadera y variación de peso diaria para un animal tipo en la Unidad Inventarial nº16, calculados ponderando por la ingestión de forraje digerible de los rebaños en la UI.

FIGURE 10. Average monthly predicted values of stocking rate (left) and live weight daily changes for a standard animal type (right) in the pastoral unit nº16. Values are calculated weighing according to the intake of digestible forage of the herds using the PU.

Matorral de Ulex gallii



Pasto de Festuca-Agrostis

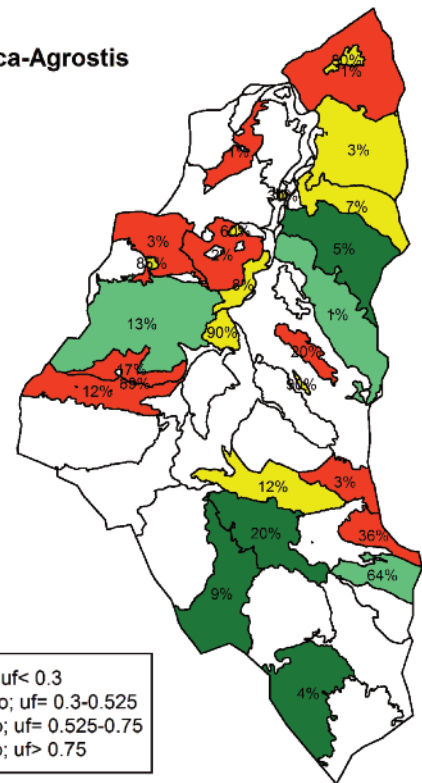
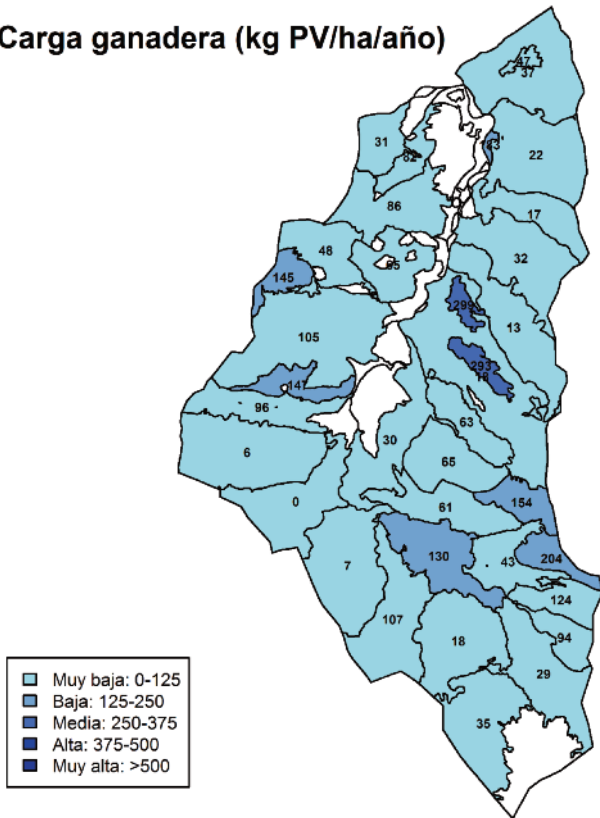


FIGURA 11. Valores predichos por el modelo de la Utilización Forrajera (uf) de dos tipos de vegetación con amplia representación en Tudanca, y su correspondencia con el grado de sostenibilidad del pastoreo. Los valores en las unidades inventariables indican el porcentaje de superficie de estas ocupada por el tipo de vegetación.

FIGURE 11. Predicted values of Forage Utilisation (uf) by the PUERTO model of two common vegetation types in Tudanca, and its correspondence to the degree of grazing sustainability (colours). Values in the pastoral units refer to the percentage of their area occupied by the vegetation type.

Carga ganadera (kg PV/ha/año)



Variación peso (kg PV/ha/año)

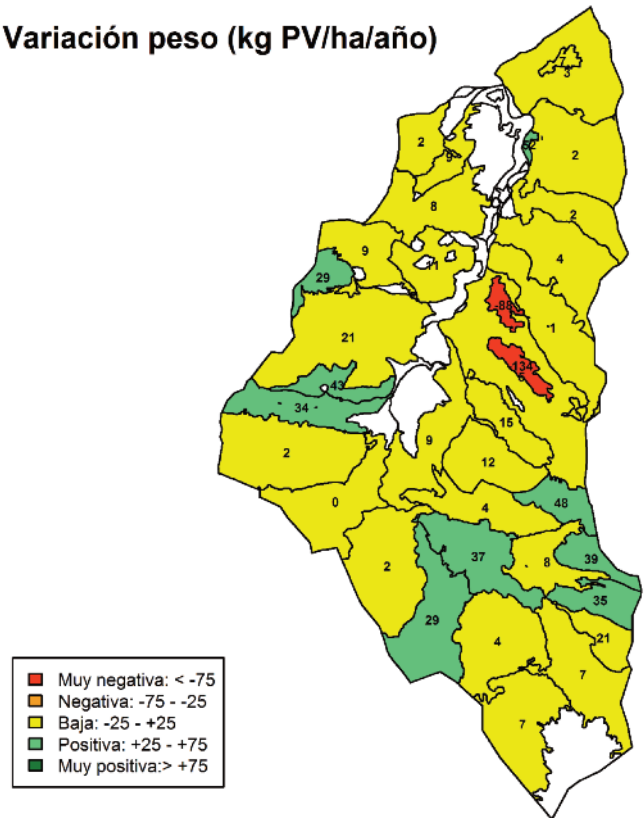


FIGURA 12. Carga ganadera (izquierda) y variación de peso por hectárea (derecha) anuales por unidad inventarial en el municipio de Tudanca.

FIGURE 12. Annual stocking rate (left) and livestock live weight changes per hectare (right) in each pastoral unit of the municipality of Tudanca.

los distintos rebaños compartiendo la UI. De cara a planificar la gestión del monte, y en el caso de esta UI la mejora en la distribución del ganado en pastoreo mencionada, la información aportada en la Tabla 3 permite valorar la viabilidad de realizar posibles cambios, al indicar el grado de dependencia de los rebaños presentes del forraje existente en la UI. Por ejemplo, se puede observar que el ganadero con código de explotación agraria –CEA- terminada en 015 es el más dependiente de esta UI, con un 35% del forraje digestible ingerido por sus rebaños (uno de equino y tres de vacuno) procedente de ella, lo que a su vez supone un 52% del total de forraje digestible consumido en la UI (última columna de la Tabla 3).

El uso directo de la carga ganadera, calculada a partir de las UGM y los días de pastoreo en la UI (ver columnas en Tabla 3) es útil como indicador de presión de pastoreo en sistemas ganaderos sencillos (p.ej. el del caso 1 con un solo tipo de pasto y un solo tipo de ganado). Sin embargo, en sistemas de pastoreo complejos, como el mostrado en este ejemplo de Tudanca, la carga ganadera (Figura 10) no es una variable útil para evaluar si el pastoreo es sostenible, al no considerar los factores ligados a los herbívoros, la orografía y la vegetación mencionados más arriba. La información generada por PUERTO sobre utilización forrajera y rendimientos ganaderos, expresada a escala de unidad inventarial, sí está relacionada de forma directa con la sostenibilidad del uso pastoral. De

cara a valorar la vegetación del comunal como pasto, y como alternativa o complemento a la definición de un coeficiente de admisibilidad de pastos (CAP), o un rango de cargas ganaderas, se debería verificar que, a escala de UI, se cumple que la utilización forrajera se sitúa dentro de los rangos considerados sostenibles, y que el ganado en pastoreo mantiene su condición corporal dentro de unos rangos también sostenibles, tal como quedó expresado en el ejemplo mostrado en el apartado anterior (caso 2).

En el caso de la UI nº16, se observa que el rendimiento ganadero es positivo (Figura 10; balance anual de +48 kg PV·ha⁻¹). Pero esto ocurre a costa de una sobre-utilización de los mejores recursos forrajeros, aunque también parece evitarse la acumulación de biomasa en el matorral (Tabla 2). Todo esto sucede bajo una carga ganadera anual de 154 kgPV·ha⁻¹·año⁻¹, equivalente a 0,31 UGM·ha⁻¹·año⁻¹, valor que podría parecer bajo para inducir a sobre-pastoreo.

Es importante consultar los resultados del modelo PUERTO en todo el territorio de estudio. Para ello, lo más conveniente es representar en mapas las variables de interés para todas las unidades inventariales del territorio (Figuras 11 y 12). La Figura 11 muestra la utilización forrajera de dos de las comunidades vegetales más representativas del paisaje pastoral de Tudanca: los matorrales de *Ulex gallii* y los pastos herbáceos de

Festuca-Agrostis. La utilización forrajera del matorral de *Ulex gallii* (Figura 11 izquierda) se sitúa en casi todas las UI en valores de infra-pastoreo, algo muy característico de la media montaña ácida de Cantabria, y que genera uno de los problemas ambientales más graves de la región, como son los incendios forestales (Carracedo *et al*, 2009). Por su parte, la utilización forrajera del pasto de *Festuca-Agrostis* (Figura 11 derecha) presenta una heterogeneidad alta, desde zonas infrautilizadas y claramente indicadoras de abandono del pastoreo, hasta zonas sobrepastadas ligadas generalmente a los mejores accesos, topografía o proximidad a puntos de agua permanentes.

En la Figura 12 se representan los valores anuales de carga ganadera y de variación de peso por hectárea. Casi todo el territorio pastoral de Tudanca tiene cargas ganaderas muy bajas (media de 57 kgPV·ha⁻¹·año⁻¹), con variaciones de peso en los animales en pastoreo muy ligeras (media de +10 kg·ha⁻¹·año⁻¹). En el rango de cargas ganaderas muy bajas y bajas (0-250 kgPV·ha⁻¹·año⁻¹) parece existir una relación positiva entre carga ganadera y variación de peso, mientras que en las dos UI donde la carga ganadera es superior (UI nº 7 y nº 8 según Figura 8), se producen pérdidas de peso notables. Posiblemente en estas UI exista una suplementación del ganado a principios de primavera con heno almacenado en cabañas localizadas en las propias UI, algo que no se contempló en la información de partida del modelo.

CONCLUSIONES

La gestión de los recursos pastorales de montaña es un objetivo que debería considerarse prioritario en Cantabria por su importancia superficial, socio-económica y ecológica. La administración regional está impulsando medidas para articular esta gestión, pero desde dos visiones diferentes: la territorial y la ganadera, acometiéndose también en departamentos diferentes. Estas dos visiones, el pasto comunal y las ganaderías familiares que lo aprovechan, forman el mismo sistema silvopastoral, y sería conveniente buscar fórmulas de gestión integrada.

La PAC supone la fuente principal de financiación para implementar este tipo de planes de gestión silvopastorales, cuyo objetivo final debería ser mejorar el estado productivo y de conservación de los recursos pastorales, y cuantificar los servicios ecosistémicos generados para su correcto pago a los ganaderos que los hacen posible. Actualmente nada de esto está ocurriendo, y los pastos comunales se relacionan con la PAC principalmente como moneda de cambio superficial para justificar los derechos de ganaderos particulares. Así, la visión ganadera de estos sistemas se lleva la mayor parte de la financiación de la PAC, y la visión enfocada en el territorio adolece de financiación suficiente para poder realizar su gestión con garantías.

Aparte de la mayor facilidad que desde el punto de vista político y de gestión de fondos tiene este enfoque de la PAC, un aspecto que puede también explicarlo es la falta de criterios y capacidad técnica actual de la administración pública para poner en marcha planes de gestión en estos sistemas ganaderos. Además del gran vacío existente en técnicos de la administración asesorando sobre el terreno (no inspeccionando), en esto también somos culpables los investigadores, que no hemos podido o sabido comunicar nuestro trabajo, o incluso trabajamos a una escala diferente de la que necesita la gestión.

El modelo PUERTO presentado en este trabajo, aún a falta de mejoras y trabajos experimentales de validación, es un ejemplo de lo que puede ser una herramienta de apoyo a la gestión, útil también para trabajar en conjunto investigadores, técnicos, gestores, propietarios y ganaderos. Afortunadamente, el modelo está ya siendo aplicado en la gestión de pastos comunales de Cantabria con resultados muy positivos, tanto por las posibilidades que ofrece para invertir adecuadamente los escasos recursos existentes, como por permitir compatibilizar los distintos objetivos que se presentan entre los agentes involucrados. El idioma común que aporta el modelo PUERTO para todos estos agentes facilita su interacción y negociación. Actualmente se está trabajando en la creación de una interfaz de usuario que facilite a los técnicos encargados de la gestión y planificación de los comunales la entrada de la información necesaria para correr el modelo, así como la generación automática de informes con los resultados. Es este un aspecto clave para ampliar el uso de este modelo a otros ámbitos geográficos y poder también, así, validar el modelo en más situaciones y continuar con su mejora.

Desde el punto de vista de la investigación, este tipo de modelos ayuda a organizar los conocimientos existentes de aspectos concretos del sistema, evaluando su importancia, y facilitando la identificación de carencias de conocimientos y, por tanto, focalizando las líneas futuras de investigación. De esta manera, se facilita también la formación y el mantenimiento de redes de investigación entre los investigadores en sistemas ganaderos de montaña, que en nuestro país, aparte de ser pocos, nos encontramos dispersos en distintas comunidades autónomas y organismos de investigación. Finalmente es también importante remarcar que modelos de simulación como PUERTO deben considerarse como una de las posibles herramientas de apoyo a la gestión. Lo ideal sería su empleo en conjunto con otras herramientas, como el monitoreo periódico del pasto y los animales apoyándose en el gran desarrollo tecnológico existente en comunicación, robótica y sensores automáticos (collares GPS en animales, sensores de temperaturas y humedad en el suelo, drones, etc), y el desarrollo de estructuras organizativas de participación social que permitan transmitir ágilmente la información para que todos los actores implicados se involucren en la toma de decisiones.

A pesar de que el programa PAC 2015-2020 ya está prácticamente definido y no acomete de forma decidida un plan para mejorar la ganadería de montaña (Domínguez, 2014; Beaufoy y Ruíz Mirazo, 2013), desde la investigación es conveniente que sigamos pensando en que parte de esta mejora depende de nuestro trabajo, diseñando y mejorando herramientas de apoyo a la gestión que la administración pueda utilizar para emplear de la mejor forma posible los fondos públicos de la PAC. Si conseguimos en los próximos años aplicar con éxito este tipo de herramientas nacidas en proyectos de investigación en proyectos de gestión real del territorio y de la ganadería extensiva, tendremos más posibilidades de que en el próximo programa de la PAC estas herramientas se utilicen para calcular de una forma más solvente los pagos a los ganaderos según los servicios que éstos aportan a la sociedad, impulsando así de forma masiva una mejor gestión de nuestros recursos públicos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGENCIA EUROPEA DE MEDIO AMBIENTE (2010). *Europe's ecological backbone: recognising the true value of our mountains*. 252p. EEA Report 6/2010.
- AGENCIA EUROPEA DE MEDIO AMBIENTE (2012). *Updated High Nature Value Farmland in Europe*. 61p. EEA Technical Report.
- ARMSTRONG H.M. Y MACDONALD A.J. (1992). Test of different methods for measuring and estimating utilization rate of heather (*Calluna vulgaris*) by vertebrate herbivores. *Journal of Applied Ecology* 29, 285-294.
- BAUMONT R., TRACLET M., LE MORVAN A., EGAL D., JUVEN M. Y D'HOOR P. (2006). Diet quality and intake during the grazing season in beef cows on permanent pastures. *Grassland Science in Europe* 11, 496-498.
- BEAUFOY G. Y POUX X. (2012). *Apoyo a los ganaderos que mantienen los territorios pastorales europeos - modificación de las normas de la PAC sobre pastos permanentes*. Informe del European Forum on Nature Conservation and Pastoralism.
- BEAUFOY G. Y RUÍZ MIRAZO J. (2013). Ingredientes para una nueva Política Agraria Común en apoyo de los sistemas ganaderos sostenibles ligados al territorio. *Pastos* 43(2), 25-34.
- BEDIA J., BUSQUÉ J. Y GUTIÉRREZ J.M. (2011). Predicting plant species distribution across an alpine rangeland in northern Spain. A comparison of probabilistic methods. *Applied Vegetation Science*, 14, 415-432.
- BOCK M., BÖHNER J., CONRAD O, KÖTHE R. Y RINGELER A. (2007). Methods for creating functional soil databases and applying digital soil mapping with SAGA GIS. En: Tomislav H. et al. (eds). *Status and prospect of soil information in south-eastern Europe: soil databases, projects and applications*. pp 149-163. Joint Research Council Scientific and Technical Research Report.
- BUSQUÉ J., MORA M.J., FERNÁNDEZ N., CÁMARA M. Y FERNÁNDEZ B. (2005). Problemas y pautas para la gestión del pastoreo en los puertos de Sejos. *Locustella. Anuario de la Naturaleza de Cantabria* 3, 41-54.
- BUSQUÉ J., FERNÁNDEZ N. Y FERNÁNDEZ B. (2006). A decision support tool to design rangeland sustainable grazing systems. *Grassland Science in Europe* 11, 682-684.
- BUSQUÉ J., MORA M., BEDIA J. Y FERNÁNDEZ B. (2007). Sobrepastoreo y degradación de pastos de puerto: quién, cuándo, dónde. Respuestas del modelo de simulación "PUERTO". En: *Los sistemas forrajeros: entre la producción y el paisaje*. pp. 18-23. Vitoria. Sociedad Española para el Estudio de los Pastos.
- CARRACEDO V., DIEGO C., GARCÍA-CODRÓN J.C. Y RASILLA D.F. (2009). Clima e incendios forestales en Cantabria: evolución y tendencias recientes. *Pirineos* 164, 33-48.
- CELAYA R., FERREIRA L.M.M., GARCÍA U., ROSA R. Y OSORO K. (2011). Diet selection and performance of cattle and horses grazing in heathlands. *Animal* 5:9, 1467-1473.
- COMISIÓN EUROPEA (2012). *Rural development in the EU, Statistical and Economic Information Report*. 371p.
- DOMÍNGUEZ M. (2014). Pastos, PAC y bienes públicos: oportunidades ante el período 2014-2020. *Pastos* 43(2), 6-24.
- DUMONT B., ANDUEZA D., NIDERKORN V., LÜSCHER A., PORQUEDDU C. Y PICON-COCHARD C. (2014). A meta-analysis of climate change effects on forage quality in grasslands: perspectives for mountain and Mediterranean areas. En: Baumont R. et al. (eds). *Forage resources and ecosystem services provided by Mountain and Mediterranean grasslands and rangelands*. *Options Méditerranéennes* 109, 49-68.
- FILLAT F., AGUIRRE J., PAUNÉ F. Y FONDEVILLA C. (2012). La conservación de la montaña alpina y el bienestar humano. *Ambienta* 98, 116-133.
- GARCÍA PRIETO U., MARTÍNEZ A., CELAYA R. Y OSORO K. (2009). *Estrategias para la puesta en valor de zonas desfavorecidas*. SERIDA. Principado de Asturias.
- GARCÍA FERNÁNDEZ J. (1990). La organización tradicional del espacio rural en el área cantábrica. En: García Merino L.V. et al. (eds). *Los espacios rurales cantábricos y su evolución*. pp 15-31. Santander. Universidad de Cantabria – Asamblea Regional de Cantabria.
- GÓMEZ SAL A., RODRÍGUEZ E., BUSQUÉ J. Y RODRÍGUEZ M. (1995). *Cuadernos de la trashumancia nº17: Pernía, Páramos, Alto Campoo*. Madrid. Ministerio de Agricultura.
- GUTIÉRREZ J.M., HERRERA S., SAN-MARTÍN D., SORDO C., RODRÍGUEZ J.J., FROCHOSO M., ANCELL R., FERNÁNDEZ J., COFIÑO A.S., PONS M.R., Y RODRÍGUEZ M.A. (2010). *Escenarios regionales probabilísticos de cambio climático en Cantabria: termopluiometría*. Santander. Gobierno de Cantabria – Universidad de Cantabria.
- HERNÁNDEZ C., MARTÍNEZ J. Y CALVETE H. (2011). Modelos para la simulación dinámica del crecimiento y desarrollo de pastos. *Pastos* 41(2), 127-162.

- HUMADA M.J., MATEO J., GARCÍA F.J. Y SERRANO E. (2013). Perfil de ácidos grasos de la grasa intramuscular en cabritos castrados y sacrificados a los 7-8 meses de edad producidos en pastos de montaña de los Picos de Europa. En: *XV Jornadas sobre Producción Animal*. AIDA 42(1), 751-753.
- LACA E.A. (2008). Foraging in a heterogeneous environment. En: Prins H.H.T. y van Langevelde F. (eds). *Resource ecology: spatial and temporal dynamics of foraging*. pp.81-100. Dordrecht, Países Bajos. Springer.
- MENÉNDEZ I., VÁZQUEZ I., BUSQUÉ J. Y BAYARRI E. (2012). Desarrollo de un plan de gestión sostenible de pastos comunales a escala regional. En: Canals R.M. y San Emeterio L. (eds). *Nuevos retos de la ganadería extensiva: un agente de conservación en peligro de extinción*. pp. 255-264. Pamplona. Sociedad Española para el Estudio de los Pastos
- MONTSERRAT P. Y FILLAT F. (1977). La ganadería extensiva y las culturas rurales montañosas, *Anales del Instituto de Estudios Montañeses* 3, 83-120.
- MORENO J., FERRÉ I., CELAYA R., FRUTOS P., FERREIRA L.M.M., HERVÁS G., GARCÍA U., ORTEGA L.M. Y OSORO K. (2012) Potential use of heather to control gastrointestinal nematodes in goats. *Small Ruminant Research* 103, 60-68.
- MOROS R. Y BUSQUÉ J. (2014). Tipificación de la ganadería bovina de carne de Cantabria a escala municipal. En: Busqué J. *et al.* (eds) *Pastos y PAC 2014-2020*. pp. 491-498. Potes, Cantabria. Sociedad Española para el Estudio de los Pastos.
- MOULIN C.H. (2014), Multiple services provided at territory scale from Mountain and Mediterranean livestock systems, En: Baumont R. *et al.* *Forage resources and ecosystem services provided by Mountain and Mediterranean grasslands and rangelands*, *Options Méditerranéennes* 109, 559-572.
- OSORO K., VASALLO J.M., CELAYA R. Y MARTÍNEZ A. (1999). Livestock production systems and the vegetation dynamics of Less Favoured Areas: developing viable systems to manage semi-natural vegetation in temperate LFAs in Spain. En: Laker J.P. y Milne J.A. (eds): *Livestock Production in the European Less Favoured Areas* pp. 133-143. Dublin, Irlanda.
- REQUENA G. (2014). *Mejora y aplicación del modelo de simulación PUERTO en pastos comunales de Cantabria*. Proyecto Fin de Carrera. Ingeniería de Montes. Universidad de Santiago de Compostela. Disponible en: www.cifa-cantabria.org
- RICKERT K.G. (1996). Stocking rate and sustainable grazing systems, *Wageningen Agricultural University Papers* 96-4, 29-67.
- ROSA R., FRASER M.D., CELAYA R., FERREIRA L.M.M., GARCÍA U. Y OSORO K. (2013). Grazing land management and biodiversity in the Atlantic European heathlands: a review. *Agroforestry Systems* 87, 19-43.
- VÁZQUEZ I., PUENTE L. Y BUSQUÉ J. (2011a). Patterns of land use and ownership and their influence on pasture quality in the mountains of northern Spain. *Grassland Science in Europe* 16, 58-60.
- VÁZQUEZ I., PUENTE L. Y BUSQUÉ J. (2011b). Análisis comparativo de los sistemas ganaderos de un valle de montaña cantábrico a partir de indicadores de presión ganadera. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales* 33, 83-88.
- WRIGHT I.A., RUSSEL A.J.F. Y HUNTER E.A. (1989). Compensatory growth in cattle grazing different vegetation types. *Animal Production* 48, 43-50.

ANEXO: EL MODELO DE SIMULACIÓN PUERTO

Juan Busqué Marcos

Centro de Investigación y Formación Agrarias del Gobierno de Cantabria

Este documento tiene el objetivo de explicar en detalle el funcionamiento del modelo de simulación PUERTO. Se presenta como un anexo al artículo “De la investigación a la práctica: herramientas para gestionar la ganadería de montaña y los pastos comunales de Cantabria dentro de la Política Agraria Común” (Busqué, 2014). Además de la información aportada en el documento, el autor enviará a quien lo requiera el código del modelo y los archivos asociados para su uso en una localidad de ejemplo.

ÍNDICE

1. Estructura del modelo	25
2. Información de partida necesaria	27
2.1. La vegetación	27
2.2. El suelo	28
2.3. El clima	28
2.4. Rebaños en pastoreo	28
2.5. Otras actuaciones	29
3. Procesos simulados en el modelo	30
3.1. Suelo – vegetación	30
3.1.1. Crecimiento de la vegetación	30
3.1.1.1. Cálculo de FT_{fit}	30
3.1.1.2. Cálculo de FR_{fit}	30
3.1.1.3. Cálculo de FH_{fit}	31
3.1.2. Senescencia y reabsorción	32
3.1.3. Desfronde	32
3.1.4. Excreción	32
3.1.5. Descomposición	33
3.1.6. Paso de la fracción lenta a la activa de la materia orgánica	33
3.1.7. Mineralización	33
3.1.8. Pérdida de N por percolación	33
3.1.9. Siega	33
3.1.10. Fertilización orgánica	33
3.2. Planta-Animal	33
3.2.1. Selección de la dieta	33
3.2.1.1. Valor pastoral	33
3.2.1.2. Ingestión	34
3.3. Balance energético del ganado	35
3.3.1. Necesidades de mantenimiento ($N_{M_{cht}}$)	35
3.3.2. Necesidades de desplazamiento ($N_{D_{cht}}$)	35
3.3.3. Necesidades de lactación ($N_{L_{c=1,ht}}$)	35
3.3.4. Necesidades de gestación ($N_{gest_{cht}}$)	35
3.3.5. Variación de peso	35
4. Programación	36
4.1. Ficheros de código del modelo	36
4.1.1. CorrerPuerto.R	36
4.1.2. Plant.R	37
4.1.3. Plant1_Comun.R	37
4.1.4. Plant2_CrecR	37
4.2. Organización de carpetas y ficheros	37
5. Índice de variables y parámetros	38
5.1. Componentes	38
5.2. Variables de partida	38
5.3. Variables de estado	39
5.4. Variables de procesos	40
5.5. Parámetros	40
6. Referencias bibliográficas	42

1. ESTRUCTURA DEL MODELO

El modelo PUERTO simula el funcionamiento en el espacio y tiempo de los procesos más relevantes del sistema clima-suelo-pasto-herbívoro-manejo que conforman los agro-ecosistemas pastorales de montaña. Las variables de estado y procesos del sistema considerados en el modelo (Figura 1) se asocian a sufijos en subíndices que señalan dónde actúan y a qué escala están representados:

- **i**: en una **Tesela**: territorio geográfico continuo, homogéneo en su vegetación (una comunidad vegetal o más de una dispuestas horizontalmente en mosaico de grano fino), tipo de suelo (textura y profundidad) y microclima (temperatura, precipitación y radiación solar). En el código del modelo se define con el campo *IDMancha*.
- **f**: en una **Comunidad vegetal**: cada uno de los tipos de vegetación considerados homogéneos en composición florística y funcionalidad ecológica. Pueden ocupar un espacio horizontal en solitario (vegetación herbácea o arbustiva baja), o, en los casos en que sean arbustos altos o árboles, acompañar a otra comunidad vegetal herbácea situada por debajo de ella. En el código del modelo se define con el campo *com*.
- **h**: en un **Rebaño**: conjunto de herbívoros de gran tamaño (domésticos o salvajes) de la misma especie, con la misma distribución espacio-temporal y el mismo gestor/propietario en el caso de herbívoros domésticos. En el código del modelo se define con el campo *IDRebaño*.
- **c**: en un **Sub-rebaño**: cada uno de los grupos de animales diferentes según raza y categoría (sexo o estado fisiológico) que se pueden encontrar dentro de un mismo rebaño. En el código del modelo se define con los campos *Raza* y *Categoría*.
- **t**: en una **Unidad de tiempo**: unidad en la que se cuantifican las variables de los procesos simulados de los componentes vegetal (crecimiento, senescencia, reabsorción y desfronde), edáfico (descomposición, transformación de la materia orgánica, mineralización y percolación), animal (selección e ingestión de forraje, producción de leche, variación de peso y excreción) y de manejo (siega y fertilización), y se actualizan los valores de las variables de estado de dichos componentes. En el código del modelo se define con el campo *t*.
- **v**: en una **Unidad inventarial**: conjunto de teselas contiguas que conforman un territorio continuo con límites físicos o artificiales bien definidos (ver p.ej. Figura 9 de Busqué, 2014), que se corresponden en muchas ocasiones con límites del área de distribución del pastoreo de rebaños concretos. En el código del modelo se define con el campo *UP*.

- **e:** en una **Especie de herbívoro**. En el código del modelo se define con el campo *Especie*.

Una variable de estado o de proceso del modelo se puede expresar a distintos niveles de detalle en el espacio y tiempo, desde un nivel de desagregación (detalle) máximo (p.ej. iv_{chfit} : ingestión de biomasa viva del sub-rebaño c del rebaño h sobre la comunidad vegetal f en la

tesela i en el tiempo t), a niveles de agregación intermedios (p.ej. iv_{vf} : cantidad de biomasa verde ingerida de la comunidad vegetal f en todo el año y por parte de los rebaños con un área de pastoreo que incluye la unidad inventarial v), hasta una agregación espacio-temporal máxima (p.ej. iv : cantidad de biomasa verde ingerida en todo el área de estudio durante todo el año por todos los herbívoros en pastoreo).

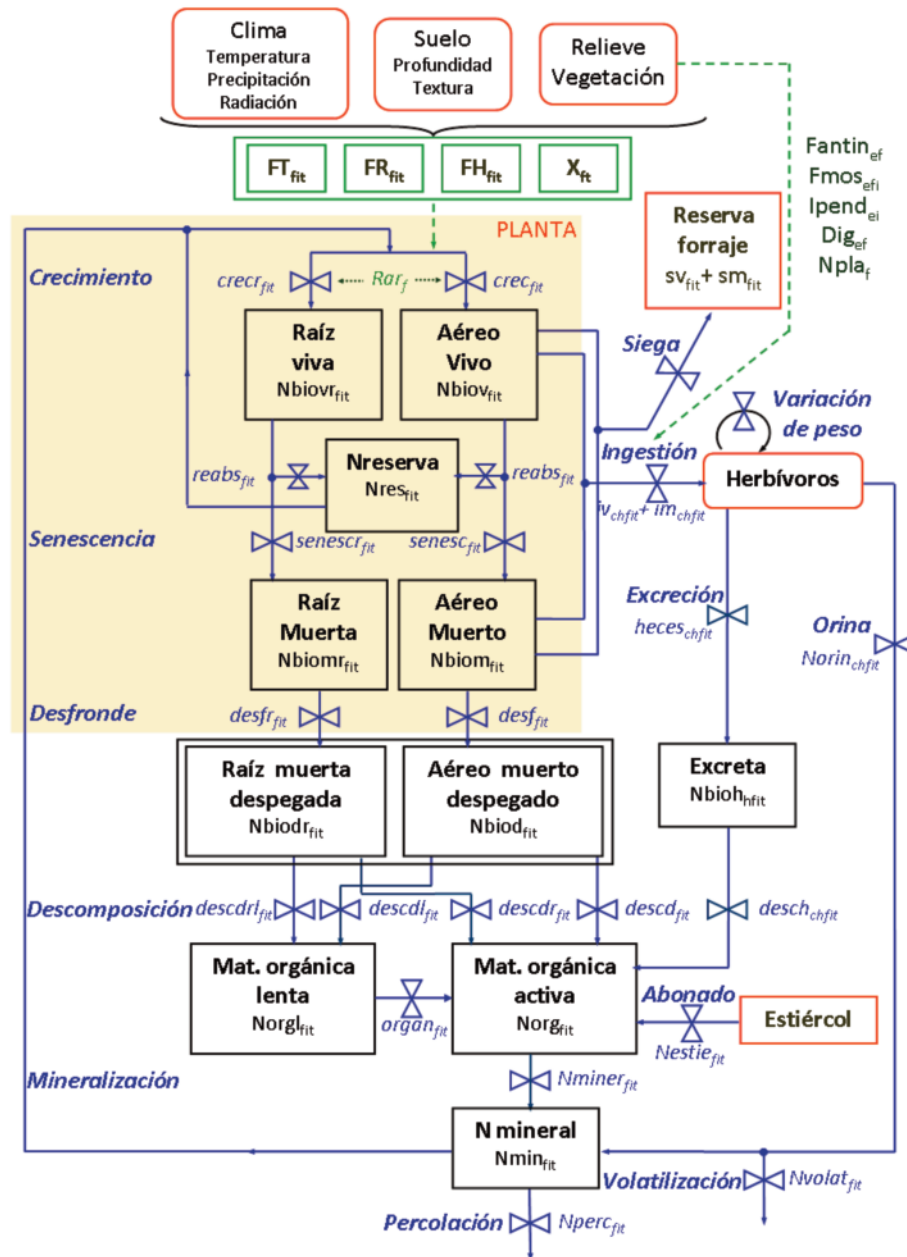


FIGURA 1. Variables principales de estado (cajas negras) y de procesos (azul) simulados por el modelo PUERTO para un tipo de pasto f , localizado en una tesela i , aprovechado por herbívoros de un sub-rebaño c de un rebaño h en un tiempo t . La información de partida necesaria para correr el modelo está contenida en los cuadros de borde rojo. Los cuadros en verde son variables que afectan la velocidad de los procesos. Los nombres de las variables están explicados en el apartado 5.

2. INFORMACIÓN DE PARTIDA NECESARIA

La información necesaria para aplicar PUERTO se puede dividir entre *información genérica*, válida para todas las localidades, e *información específica* de la localidad que se pretende estudiar. La *información genérica* consiste fundamentalmente en los valores de los parámetros de suelos, vegetación, herbívoros y manejo necesarios para correr el modelo en cualquier localidad. La *información específica* de la localidad a estudiar detalla la distribución espacial de la vegetación y el suelo y espacio-temporal del clima, los herbívoros en pastoreo y las actuaciones de manejo. La mayor parte de la información requerida se estructura en ficheros que son tablas (seis tablas de información genérica, con nombres que tienen una *Z* como prefijo, y 11 tablas de información específica), existiendo además parámetros fijos agrupados en un fichero adicional (*Parametros.R*; ver apartados 4 y 5).

2.1. La vegetación

Para aplicar el modelo en una localidad concreta, se necesita confeccionar un mapa en formato vectorial (.shp) definido por teselas *i* de vegetación homogénea. Las comunidades vegetales *f* que formen la leyenda del mapa deben ser tipos funcionales (i.e. conjunto de especies con comportamiento semejante en cuanto a sus efectos sobre el funcionamiento del ecosistema - p.ej. palatabilidad para los herbívoros presentes- y en cuanto a sus respuestas a las condiciones ambientales existentes -p.ej. efecto del clima sobre la tasa de senescencia-). En ciertos casos, la clasificación fitosociológica de la vegetación a escala de alianza o asociación puede ser adecuada, mientras que en otros casos se necesita una clasificación más detallada. Por ejemplo, los brezales-tojales típicos de la cornisa cantábrica son considerados desde el punto de vista fitosociológico como una sola comunidad vegetal (asociación *Daboecio-Ulacetum gallii*), mientras que para el modelo conviene distinguir entre los brezos bajos (*Erica vagans*, *E. cinerea*, etc.) y el tojo (*Ulex gallii*), por su distinta dinámica de crecimiento y su distinta interacción con los herbívoros domésticos (p.ej. los équidos pueden consumir activamente el tojo y rechazar al mismo nivel los brezos, mientras que el vacuno se puede comportar al contrario).

Por otro lado, el pasto herbáceo encontrado debajo de las copas de árboles o debajo de arbustos altos, también se considera en el modelo como una comunidad vegetal diferente de las leñosas que tiene por encima. La definición de los tipos de vegetación *f* tiene asociada la cuantificación de un importante número de parámetros específicos (tabla *ZB3_ComFisio*) y de otros que regulan su interacción con las distintas especies de herbívoro *e* (tabla *ZBA_ValorPastoral*; ver apartado 5).

La confección del mapa de vegetación mediante métodos clásicos muy costosos en trabajo especializado es posiblemente

el mayor esfuerzo requerido para aplicar PUERTO. Se prevé que en un futuro cercano la teledetección y la estadística permitan generar mapas de vegetación de gran precisión en territorios grandes de forma económica (MHNN-EEA, 2014), facilitando así un mayor uso del modelo PUERTO.

La información de la disposición de la vegetación en una localidad concreta se aporta en dos tablas: *D1_Manchas* y *D2_ManchasCom*. La primera tabla ***D1_Manchas***, con un registro por tesela, se compone de los siguientes campos:

- *IDMancha*. Identificación numérica de la tesela *i*.
- *has*. Superficie en hectáreas.
- *cob*. Cobertura vegetal de la tesela vista en plano (%) = 100 - cobertura de suelo desnudo (%).
- *pend*. Pendiente media de la tesela (%).
- *UP*. Identificación numérica de la unidad inventarial *v* donde se encuentra la tesela.
- *inc*. Localización (1: dentro; 2: fuera) de la tesela respecto al área que se quiere estudiar. No se utiliza en el modelo, pero es importante para el análisis de sus resultados. Las teselas localizadas fuera se sitúan en zonas adyacentes al área de estudio, sin interés en el análisis territorial, pero importantes para la simulación porque para alguno de los rebaños presentes forman parte de su área de pastoreo.
- *prmen35*. Proporción del área de la tesela con una pendiente menor al 35%. No se utiliza en el modelo, pero sirve para el análisis posterior de los resultados: indica la superficie potencialmente mecanizable para cierto tipo de mejora de pastos.

La tabla ***D2_ManchasCom***, con uno o más registros por tesela, tiene los siguientes campos:

- *IDMancha*. Identificación numérica de la tesela *i*.
- *com*. Identificación numérica de la comunidad vegetal *f* (la más alta si existen dos comunidades vegetales en la misma proyección vertical).
- *cobv*. Cobertura ocupada por la comunidad vegetal *f* en la tesela *i* (%). La suma de *cobv* de todos los registros de una misma tesela es siempre 100.

Otra tabla ***ZB2_Pastos*** contiene información genérica sobre las comunidades vegetales que pueden compartir la misma proyección vertical. Tiene los siguientes campos:

- *com*. Identificación numérica de la comunidad vegetal *f* (la más alta si existen dos comunidades vegetales en la misma proyección vertical).
- *com2*. Identificación numérica de la comunidad vegetal existente cuando la comunidad vegetal más alta es *com*. Cuando la comunidad vegetal en *com* es herbácea o arbustiva baja, solo hay un registro, siendo *com=com2*. Cuando la comunidad vegetal en *com* es arbustiva alta o arbórea, hay dos registros por *com*, uno en que *com=com2*,

y otro en que $com \neq com2$, donde $com2$ es una comunidad vegetal herbácea.

2.2. El suelo

El modelo necesita conocer la textura y profundidad del suelo a escala de tesela i . Para su aplicación en localidades de Cantabria se han utilizado los mapas *raster* regionales generados en el proyecto Zonificación Agroecológica de Cantabria (ZAE; Alonso *et al.*, 2007), con tamaño de píxel de 25x25m, y con valores categóricos para la textura (arenoso, franco o arcilloso) y profundidad (menos de 10, de 10 a 25, de 25 a 50, de 50 a 100 y más de 100 cm).

La información resultante para una localidad se recoge en la tabla **D1b_ManchasSuelo**, que tiene los siguientes campos:

- *IDMancha*. Identificación numérica de la tesela i .
- *prof*. Profundidad del suelo (mm). Agregación de los datos de ZAE.
- *text*. Textura del suelo (1: arenoso; 2: franco; 3: arcilloso). Agregación de los datos de ZAE.

La textura de los suelos define los valores de parámetros relacionados con su capacidad de almacenar agua disponible para las plantas. Estos datos quedan recogidos en la tabla genérica *Z1_SuelosText* (ver apartado 5).

2.3. El clima

El modelo requiere de datos, al menos mensuales, de temperaturas medias, mínimas y máximas y precipitaciones. Para usar el modelo en localizaciones de Cantabria y con valores climáticos medios, se han utilizado los datos del estudio de regionalización climática realizado para Cantabria a escala de píxeles de 1km de lado (Gutiérrez *et al.*, 2010). A partir de estos datos, y para la temperatura, se ha realizado un escalamiento posterior para obtener valores por píxel de 25x25m, mediante una interpolación lineal seguida de la aplicación de un algoritmo empírico que relaciona de forma lineal la temperatura con la radiación:

(*ec. 1*)

$$T_{kt} = T_{Kt} + 0,463 \times (Rg_{kt} - Rg_{Kt})$$

Donde:

T_{kt} es la temperatura media (°C) estimada en el cuadrado k de 25 x 25 m en el tiempo t .

T_{Kt} es la temperatura media en t en el cuadrado K de 1 km² donde se encuentra k .

Rg_{kt} es la radiación global (MJ·m⁻²·d⁻¹) del píxel k de 25 x 25 m en cada tiempo t .

Rg_{Kt} es la radiación global del cuadrado K de 1 km² donde está el cuadrado k en t .

Los valores de radiación solar se han obtenido por dos vías diferentes, con resultados muy similares. Por un lado, se ha calculado la insolación potencial directa y difusa a partir de un modelo de elevación del terreno con píxeles de 25m y parámetros geográficos, utilizando el módulo *Potential Incoming Solar Radiation* del SIG SAGA (Conrad, 2010). Por otro lado, se han utilizado las estimaciones de AEMET para toda España (Sancho *et al.*, 2012), con medias mensuales a una escala de resolución de 3x3 km para el periodo 1983-2005.

Del mismo modo que con la información de los suelos, los datos climáticos se promedian para cada tesela i del mapa de vegetación. El paso de valores mensuales a valores cada 10 días (t del modelo) se realiza ajustando los valores medios (o un tercio de los valores mensuales en el caso de la precipitación) a una función polinómica de grado 9 o superior (fichero *PuertoClima.R*; ver apartado 4.1.1).

En el caso de valores mensuales, la información climática necesaria se recoge en la tabla **D1c_ManchasClima**, que contiene los siguientes campos:

- *IDMancha*. Identificación numérica de la tesela i .
- *mes*. Número del mes.
- *rg*. Radiación solar global sobre la biosfera (MJ·m⁻²·d⁻¹).
- *prec*. Precipitación (mm).
- *tmed*. Temperatura media (°C).
- *tmin*. Temperatura mínima media (°C).
- *tmax*. Temperatura máxima media (°C).

El modelo tiene también la capacidad de utilizar datos climáticos diarios (tabla *D1c_ManchasClimaDia*), si se dispone de ellos.

El modelo simula la existencia de nieve cuando la temperatura media en un periodo t es menor de 3°C. En este caso, y principalmente para reducir la senescencia de la biomasa viva por bajas temperaturas (ver apartado 3.1.2), se corrige la temperatura media de las comunidades vegetales herbáceas, arbustivas bajas y arbustivas altas (IDHL=1, 2 y 3; ver apartado 5) a $tmed_{fit}=3^{\circ}C$, manteniéndose la de las arbóreas (IDHL=4). Se realiza una corrección adicional de $tmed_{fi}$ en el caso de las comunidades vegetales herbáceas con un dosel leñoso superior ($tmed_{fit}=2+0,8 \times tmed_{fi}$).

2.4. Rebaños en pastoreo

El modelo actualmente puede simular el pastoreo de rebaños h de vacuno, equino, ovino y caprino. En todas las especies se consideran distintos tipos de animal c según su raza y categoría (sexo-estado fisiológico): machos adultos, hembras adultas secas, hembras adultas en lactación y animales jóvenes en

pastoreo activo. No se consideran explícitamente los animales aún lactantes, al asumirse en ellos una ingestión de pasto insignificante. La información sobre el estado y la composición de los rebaños en una localidad concreta se realiza generalmente mediante entrevista con los ganaderos involucrados o con responsables de la gestión pastoral de la localidad. Es también muy útil apoyarse en la información oficial de las bases de datos del Sistema de Trazabilidad Animal (SITRAN¹) que, adecuadamente procesadas (ver p.ej. Moros y Busqué, 2013, 2014), aportan información precisa sobre la composición de las ganaderías. Los datos necesarios para PUERTO sobre composición y estado de los rebaños se recogen en cuatro tablas.

La tabla **A0_Rebaños** contiene los siguientes campos:

- *IDRebaño*. Identificación numérica del rebaño *h*.
- *Gestor*. Identificación numérica del ganadero responsable del rebaño. No utilizado en el modelo, pero con interés para interpretar los resultados.
- *Especie*. Identificación numérica de la especie de herbívoro (1: equino; 2: vacuno; 3: ovino; 4: caprino).

La tabla **A1_Numeros** define la composición numérica de cada rebaño – sub-rebaño a lo largo del año. Se compone de los siguientes campos:

- *IDRebaño*. Identificación numérica del rebaño *h*.
- *Raza*. Identificación numérica del tipo de animal *c* según su raza.
- *Categoría*. Identificación numérica del tipo de animal *c* según su categoría (1: hembra lactante; 2: hembra seca; 3: animal joven; 4: semental).
- *t*. Unidad de tiempo empleada por el modelo. Hasta el momento se ha empleado siempre una unidad de tiempo equivalente a 10 días, lo que equivale a tres unidades por mes, y un total de 36 unidades en un año.
- *n*. Número de ejemplares presentes.

La tabla **A0b_Gestantes** sirve para identificar a lo largo del año los animales del rebaño que están en sus últimos meses de gestación y, por lo tanto, tienen mayores requerimientos nutricionales. Contiene los siguientes campos:

- *IDRebaño*. Identificación numérica del rebaño *h*.
- *Raza*. Identificación numérica del tipo de animal *c* según su raza.
- *Categoría*. Identificación numérica del tipo de animal *c* según su categoría.
- *t*. Unidad de tiempo empleada por el modelo.
- *prgest*. Proporción de animales en los últimos meses de gestación (tres últimos meses en yeguas y vacas, y dos últimos meses en ovejas y cabras).

La tabla **A1b_Inicio** define la condición corporal de los animales de cada rebaño al inicio de su actividad de pastoreo (en

la primera *t* especificada para cada tipo de animal *ch* de la tabla **A1_Numeros**). Contiene los siguientes campos:

- *IDRebaño*. Identificación numérica del rebaño *h*.
- *Raza*. Identificación numérica del tipo de animal *c* según su raza.
- *Categoría*. Identificación numérica del tipo de animal *c* según su categoría.
- *CCini*. Condición corporal al inicio del pastoreo (según la escala 0-5).

Además de la composición y estado de los rebaños, se necesita conocer la localización espacio-temporal de estos dentro del territorio a estudiar y a nivel de unidades inventariables *v*. Esta información es relativamente fácil de recopilar de ganaderos y gestores, y SITRAN también permite verificarla, aunque generalmente con menos precisión que en el caso de la composición de los rebaños. Los datos recopilados se ordenan en la tabla **A2_Alcances**, que tiene los siguientes campos:

- *IDRebaño*. Identificación numérica del rebaño *h*.
- *t*. Unidad de tiempo empleada por el modelo.
- *UP*. Identificación numérica de la unidad inventariable *v*.

Los herbívoros en pastoreo tienen unos parámetros ligados a la especie (subíndice *e*) que regulan su capacidad de selección, ingestión y accesibilidad al pasto recogidos en la tabla **ZA4_Especies**. También, a nivel de especie, raza y categoría (*ce*) existen otros parámetros que definen distintas necesidades y eficiencias de transformación de la energía de forraje ingerido, que se recogen en la tabla **ZA6_Necesidades** (ver apartado 5).

2.5. Otras actuaciones

El modelo contempla la posible existencia de dos tipos de actuaciones sobre el pasto: la siega y la fertilización orgánica. Esta información se recoge en la tabla **D2b_Accion**, que contiene los siguientes campos:

- *IDMancha*. Identificación numérica de la tesela *i*.
- *com*. Identificación numérica de la comunidad vegetal *f*.
- *accion*. Tipo de actuación (1: siega; 2: fertilización orgánica).
- *t*. Unidad de tiempo cuando se produce la acción.
- *Nestie*. En el caso de la aplicación de fertilización orgánica, cantidad de N (orgánico) aportado ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$).

¹ <http://www.magrama.gob.es/es/ganaderia/temas/trazabilidad-animal/registro/>

3. PROCESOS SIMULADOS EN EL MODELO

3.1. Suelo – vegetación

3.1.1. Crecimiento de la vegetación

El crecimiento potencial de las plantas de una comunidad vegetal *f* en una tesela *i* en un tiempo *t* (*crecpot_{fit}* y *crecpotr_{fit}* para la parte aérea y las raíces respectivamente) se calcula como:

(ec. 2)

$$crecpot_{fit} = X_f \times FT_{fit} \times FH_{fit} \times FR_{fit} \times ph_{fit} \times ts$$

$$crecpotr_{fit} = X_f \times FT_{fit} \times FH_{fit} \times FR_{fit} \times ph_{fit} \times ts \times \frac{Rar_f}{1 - Rar_f}$$

Donde *X_f* es el crecimiento diario de la parte aérea (gMS·m⁻²·d⁻¹) sin limitaciones ambientales; *FT_{fit}*, *FH_{fit}* y *FR_{fit}* son factores de corrección ambientales (con valores entre 0 y 1) debidos a la temperatura, humedad y radiación respectivamente (ver apartados 3.1.1.1 a 3.1.1.3); *ph_{fit}* es un efecto de la fenología que sólo toma valores 0 ó 1; *ts* es el número de días que comprende la unidad de tiempo *t*, fijada hasta el momento en 10 días; y *Rar_f* es la proporción de biomasa viva de la vegetación que, en condiciones de equilibrio (i.e. sin perturbaciones que eliminen directamente biomasa), corresponde a las raíces.

Este crecimiento potencial coincide con el crecimiento real (*crec_{fit}* y *crecr_{fit}*) si existe (i) suficiente nitrógeno disponible y (ii) un equilibrio entre la biomasa viva de la parte aérea (*biov_{fit}*) y las raíces (*biovr_{fit}*).

El nitrógeno disponible para el crecimiento proviene del nitrógeno mineral existente en el suelo (*Nmin_{fit}*) y del nitrógeno de las reservas de las plantas (*Nres_{fit}*). Por cada gramo de biomasa vegetal que se produce, se necesitan *Npl_f* gramos de nitrógeno proveniente de estas dos fuentes. El valor de *Nmin_{fit}* se calcula realizando un balance de todos los flujos de biomasa y nitrógeno entre las variables de estado que conforman el sistema suelo-planta-animal (Figura 1) descritos en este apartado 3.1. El cálculo de *Nres_{fit}* se describe en el apartado 3.1.2.

Las comunidades vegetales activamente defoliadas por pastoreo, difícilmente mantienen un equilibrio entre la biomasa viva aérea y la subterránea fijada por el parámetro *Rar_f*. En estos casos, el modelo simula que las plantas crecerán inicialmente para intentar alcanzar este equilibrio (p.ej. creciendo solamente la parte aérea). Si logran ese objetivo y aún sobra nitrógeno, crecerán después en su parte aérea y radicular de forma equilibrada según el parámetro *Rar_f*.

La relación entre crecimiento y fenología se aborda en el modelo de forma muy simple, considerando solamente que la fe-

nología está afectada por la integral térmica. Se define un parámetro *ddcrec_f*, que señala los grados-día por encima de los cuales no se produce más crecimiento de biomasa aérea o radicular. Este parámetro esta pensado para aplicarse sólo en comunidades vegetales leñosas, en donde existe una marcada diferenciación temporal entre crecimiento vegetativo y reproductivo. En el momento que, para una comunidad vegetal *f* localizada en una tesela *i* se produzca una temperatura acumulada *Tac_{fit}* superior a *ddcrec_f*, el valor *ph_{fit}* pasará de 1 a 0.

3.1.1.1. Cálculo de FTfit

El efecto de la temperatura sobre el crecimiento del pasto se simula con una función cuadrática (Coughenour, 1993; Tappeiner y Cernusca, 1998):

(ec. 3)

$$FT_{fit} = \left(\frac{T_{max_f} - tmed2_{fit}}{T_{max_f} - T_{opt_f}} \right) \times \left(\frac{tmed2_{fit} - T_{min_f}}{T_{opt_f} - T_{min_f}} \right) \left(\frac{T_{opt_f} - T_{min_f}}{T_{max_f} - T_{opt_f}} \right)$$

Donde *tmed2_{fit}* es la temperatura media en la comunidad vegetal *f* de la tesela *i* en el tiempo *t* (temperatura media *tmedi*, corregida por la posible existencia de nieve y por el amortiguamiento causado por un dosel de vegetación superior en el caso de vegetación arbustiva alta o arbórea; ver apartado 2.3); *Topt_f* es la temperatura a la que se da el crecimiento máximo para el tipo de vegetación *f*, y *Tmin_f* y *Tmax_f* las temperaturas con crecimientos nulos más alta y más baja respectivamente.

3.1.1.2. Cálculo de FRfit

El efecto de la radiación, aunque en general correlacionado con el efecto de la temperatura, puede marcar diferencias en estaciones con temperaturas medias similares pero con diferencias apreciables en las horas de luz, como es el caso de la primavera y el otoño. La radiación solar global (directa más difusa) que llega a la biosfera (*rg_{fit}*; MJ·m⁻²·d⁻¹; ver apartado 2.3) se corrige inicialmente (*Rg2_{fit}*) para considerar la atenuación en las comunidades vegetales herbáceas situadas debajo de un dosel leñoso (en ese caso: *Rg2_{fit}*=0,2×*rg_{fit}*).

FR_{fit} se calcula mediante una relación lineal con la radiación solar sobre la comunidad vegetal (*Rg2_{fit}*), con una pendiente inversa a la radiación solar a la que se alcanza la máxima fotosíntesis por las plantas (*Rgmax_f*):

(ec. 4)

$$\begin{aligned} \text{Si } Rg2_{fit} < Rgmax_f: & \quad FR_{fit} = \frac{Rg2_{fit}}{Rgmax_f} \\ \text{Si } Rg2_{fit} \geq Rgmax_f: & \quad FR_{fit} = 1 \end{aligned}$$

3.1.1.3. Cálculo de FH_{fit}

El valor del factor que define el efecto de la humedad del suelo sobre el crecimiento y otros procesos vegetales y edáficos depende de características climáticas (precipitación, temperatura, radiación solar, viento), edáficas (textura, profundidad, permeabilidad) y vegetales (profundidad de las raíces, transpiración). Es, por tanto, un factor complejo que requiere del cálculo de un balance de entradas y salidas en el sistema atmósfera-suelo-planta, para lo que se ha seguido y adaptado la metodología propuesta por la FAO (Allen *et al.*, 2006). Se transcriben a continuación los cálculos realizados.

En primer lugar, para cada tesela *i* (tipo de suelo) y tipo de vegetación *f* se calcula la cantidad de agua potencialmente disponible en la zona de las raíces (ADT_{fi} ; mm):

(ec. 5)

$$ADT_{fi} = (FC_i - PWP_i) \times profR_{ci} \times prpr_f$$

Donde FC_i y PWP_i son los contenidos de agua (m^3m^{-3}) a capacidad de campo y en el punto de marchitez permanente respectivamente (parámetros función de la textura del suelo), $profR_{ci}$ es la profundidad media de las raíces (mm; se calcula como el valor menor entre la profundidad potencial de las raíces para ese tipo de vegetación ($profR_i$) y la profundidad del suelo en esa tesela: $prof_i$), y $prpr_f$ es la proporción de la biomasa radicular que corresponde a la comunidad vegetal *f*. En el caso de dos tipos de vegetación herbácea-leñosa en la misma proyección vertical, el valor de $prpr_f$ para cada una de las dos comunidades será función de la profundidad potencial de sus raíces ($profR_i$) y de su capacidad para absorber agua cuando ésta empieza a escasear en el suelo (parámetro p_i).

Cuando el contenido de humedad del suelo se encuentra por debajo de cierto valor umbral (p_i), el agua no puede ser absorbida por las raíces con la velocidad suficiente para satisfacer la demanda transpiratoria, y las plantas comienzan a sufrir estrés hídrico. El agua que un determinado tipo de vegetación puede extraer fácilmente de su zona radicular (sin experimentar estrés hídrico) se denomina agua fácilmente aprovechable (AFA; mm), y es una fracción $pc2$ del ADT :

(ec. 6)

$$AFA_{fi} = pc2_{fit} \times ADT_{fi}$$

$pc2_{fit}$ es una variable que depende principalmente del tipo de vegetación *f* (parámetro p_i), pero también de la evapotranspiración existente (ETC_{fit}) y de la textura del suelo *i*:

(ec. 7)

$$pc_{fit} = p_f + 0,04 \times (5 - ETC_{fit})$$

(ec. 8)

-En suelos arenosos:

$$pc2_{fit} = pc_{fit} - 0,075 \times pc_{fit}$$

-En suelos francos:

$$pc2_{fit} = pc_{fit}$$

-En suelos arcillosos:

$$pc2_{fit} = pc_{fit} + 0,075 \times pc_{fit}$$

A continuación se calcula el grado de agotamiento de agua en la zona radicular (DRi_{fit} ; mm) mediante el balance entre entradas y salidas de agua en dicho horizonte del suelo:

(ec. 9)

$$DRi_{fit} = DRi_{fit(t-1)} + ETC_{fit} - Prec_{it}$$

Donde ETC_{fit} es la evapotranspiración de referencia en la comunidad vegetal *f* de la tesela *i* en el tiempo *t* y $Prec_{it}$ es la precipitación en la tesela *i* en *t*.

Los valores de DRi_{fit} negativos (percolación), se igualan a 0 (suelo a capacidad de campo), y en el caso opuesto de obtener valores de DRi_{fit} mayores que ADT_{fi} , se igualan a ADT_{fi} (suelo en el punto de marchitez permanente). ETC_{fit} se calcula con la ecuación de Hargreaves:

(ec. 10)

$$ETC_{fit} = Kc_{fit} \times (0,000939 \times (Tmed2_{fit} + 17,8) \times Rg2_{fit} \times K_{Rs}^{-1})$$

Donde $Tmed2_{fit}$ y $Rg2_{fit}$ son la temperatura media y la radiación solar global respectivamente a nivel de la comunidad vegetal (ver apartados 2.3 y 3.1.1.2); Kc_{fit} es un coeficiente dependiente de la biomasa de hoja verde presente, con valores mínimos por debajo de cierto umbral (simulación de evaporación, con transpiración nula), valores máximos por encima de cierto valor de biomasa de hoja verde, y una relación lineal positiva entre ambos umbrales mínimo y máximo (simulación de transpiración). K_{Rs} es un coeficiente de ajuste empírico que define el carácter más o menos oceánico de la localidad (valores de 0,16 a 0,19).

Finalmente, el factor FH_{fit} será:

(ec. 11)

$$FH_{fit} = \frac{ADT_{fi} - DRi_{fit}}{ADT_{fi} - AFA_{fi}}$$

ajustándose a 1 cuando tome valores mayores a la unidad.

El valor FH_{fit} obtenido se multiplica por ETC_{fit} para calcular la evapotranspiración real ET_{fit} . Esta servirá para recalcular la ecuación 9 (sustituyendo ETC por ET) y obtener así el valor de partida $DRi_{fit(t-1)}$ para el siguiente paso temporal del modelo.

3.1.2. Senescencia y reabsorción

El paso de biomasa vegetal viva (bio_{fit} y bio_{vfit} ; aérea y subterránea respectivamente) a biomasa vegetal muerta pegada ($biom_{fit}$ y $biom_{rfit}$) se simula con fórmulas adaptadas de Coughenour (1993), que calculan la proporción de la biomasa viva muriéndose diariamente ($prsen_{fit}$) según las condiciones de humedad (Sh_{fit}) y frío (St_{fit}) existentes. Se asume que la senescencia es la misma en la parte aérea y en las raíces ($senesc_{fit} = senesc_{rfit}$).

Para cada comunidad vegetal f la senescencia por falta de agua será máxima (Sh_0) cuando el factor de humedad FH_{fit} sea nulo, disminuyendo linealmente hasta un valor de senescencia mínima constante (Sh_1) cuando FH_{fit} sobrepase cierto umbral (Fhs). Este tipo de función compuesta, con dos o tres rangos de valores, uno central de una función lineal creciente o decreciente, y uno o dos laterales de funciones con valores estables en el eje de coordenadas (figura 2), se implementan mediante una función denominada *Tri*, incluida en el fichero *FuncModPlanta.R*. La función *Tri* se emplea para varios procesos del modelo PUERTO.

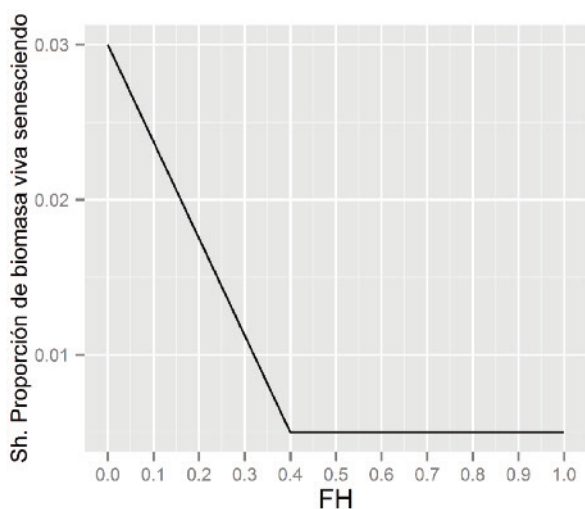


FIGURA 2. Ejemplo de función *Tri* (ver fichero *FuncModPlanta.R*) para determinar la relación entre humedad del suelo (FH) y senescencia de la biomasa vegetal viva. Parámetros: $Sh_0=0,03$; $Sh_1=0,005$; $FH_s=0,4$.

En cuanto a la senescencia por frío, el mecanismo de simulación es semejante: con valores máximos y constantes (St_0) por debajo de ciertos valores de temperatura media (t_0), y valores nulos cuando los valores de temperatura sean superiores a cierto umbral (t_1) (uso de la función *Tri*).

La proporción diaria de biomasa viva senesciendo ($prsen_{fit}$) será la mayor de los dos valores estimados Sh_{fit} y St_{fit} . En este paso de materia viva a muerta pegada, se estima que una proporción ($prvm_{fit}$) de todo el peso y nutrientes de la planta se reabsorbe como reservas para el crecimiento posterior de

las plantas ($Nreabs_{fit}$; componente de reserva para el nitrógeno: $Nres_{fit}$).

3.1.3. Desfronde

El paso de la materia vegetal muerta pegada ($biom_{fit}$ y $biom_{rfit}$) a materia vegetal muerta despegada ($biod_{fit}$ y $biod_{rfit}$) se simula de forma diferente para la parte aérea y para las raíces.

En la parte aérea el desfronde ($desf_{fit}$) se considera función de la biomasa muerta pegada ($biom_{fit}$) y del nivel de pastoreo que experimente la comunidad vegetal f en la tesela i . El nivel de pastoreo se mide como la proporción de la biomasa viva ingerida diariamente en la unidad de tiempo anterior ($ivgm_{2fit-1}/bio_{vfit-1}$). Se fija una proporción mínima de desfronde ($fmin_i$) por debajo de cierto umbral de pastoreo ($pimn$) y una proporción máxima (fmx_i) cuando se supera un umbral máximo de pastoreo ($pimx$). Entre ambos umbrales la relación proporción de biomasa aérea ingerida - proporción de desfronde se hace lineal (uso de la función *Tri*). En el caso de siega, se añade además al desfronde aéreo la parte de lo segado (vivo y muerto) perdido en la recogida, que se calcula como 1 menos el valor de cada uno de los parámetros que definen la eficiencia de la recogida (ksv y ksm).

Para las raíces, la tasa de desfronde ($desfr_{fit}$) se simula como una fracción constante (Dr_i) de la biomasa muerta pegada ($biom_{rfit}$).

3.1.4. Excreción

La cantidad de N excretado en forma de heces por los animales de un rebaño (NH_{cht}) se asume como la fracción no digestible del pasto ingerido. Este nitrógeno excretado se distribuye entre las comunidades vegetales del área de pastoreo del rebaño ($NHgm_{2fit}$) en proporción a la ingestión de éstas, pero con una corrección ($probH_i$) según el grado de adecuación de los distintos tipos de vegetación para el descanso del ganado. La cantidad de N de heces presentes sobre el terreno ($Nbioh_{fit}$) es un balance entre lo remanente del t anterior, la aportación por el ganado en pastoreo ($NHgm_{2fit}$) y lo transformado en materia orgánica por descomposición ($Ndesch_{fit}$).

El N excretado en la orina por los animales de un rebaño (asumido como N mineral; NO_{cht}) se calcula como, de lo ingerido, lo correspondiente a la fracción digestible no metabolizable. Este N posteriormente se reduce por pérdidas de volatilización ($Nvolat_{fit}$) definidas simplemente como una proporción fija ($prvolat_{fit}$) de la orina excretada. La distribución espacial de la orina (NO_{cht}) se simula igual a la de las heces. No existe una variable de estado de nitrógeno de orina presente, ya que directamente pasa a ser parte del nitrógeno mineral del suelo ($Nmin_{fit}$).

3.1.5. Descomposición

El nitrógeno de heces presente en una comunidad vegetal de una tesela ($N_{bioh_{fit}}$) se descompone ($N_{desch_{fit}}$) para formar parte del N de la materia orgánica “activa” del suelo ($N_{org_{fit}}$). Esta descomposición ocurre a una tasa máxima $TN_{desch_{fi}}$ multiplicada por los factores ambientales FH_{fit} y FT_{fit} , que regulan la actividad de los microorganismos descomponedores.

Por su parte, el N en el desfronde vegetal aéreo y subterráneo ($N_{biod_{fit}}$ y $N_{biodr_{fit}}$) se descompone ($N_{descd_{fit}}$, $N_{descdr_{fit}}$, $N_{descdl_{fit}}$, $N_{descdrl_{fit}}$) para formar parte del N de las dos fracciones en que se divide la materia orgánica: la “activa” ($N_{org_{fit}}$) y la “lenta” ($N_{orgl_{fit}}$). Al igual que en el caso de las heces, estas descomposiciones se producen a unas tasas máximas (parámetros $TN_{descd_{fi}}$, $TN_{descdr_{fi}}$, $TN_{descdl_{fi}}$ y $TN_{descdrl_{fi}}$) multiplicadas por los factores de humedad y temperatura que regulan la actividad microbiana descomponedora.

3.1.6. Paso de la fracción lenta a la activa de la materia orgánica

Este paso ($N_{organ_{fit}}$) se simula multiplicando un valor máximo de proporción de paso diario (TN_{Orgmx}) por los factores FH_{fit} y FT_{fit} .

3.1.7. Mineralización

El paso ($N_{miner_{fit}}$) del N orgánico activo ($N_{org_{fit}}$) a N mineral ($N_{min_{fit}}$), forma ya asimilable por las plantas para su crecimiento, se simula de forma similar a la descomposición: multiplicando una proporción máxima de N orgánico mineralizable (TN_{minmx}) por $N_{org_{fit}}$ y por los factores FH_{fit} y FT_{fit} , moduladores de la actividad de los microorganismos encargados de la mineralización.

3.1.8. Pérdida de N por percolación

El N mineral puede perderse por percolación cuando la cantidad de agua en el suelo sobrepasa su capacidad de campo. La percolación ($N_{perc_{fit}}$) se calcula como:

(ec. 12)

$$N_{perc_{fit}} = \frac{Perc_{fit}}{Perc_{fit} + ADT_{fi}} \times N_{min_{fit-1}}$$

$Perc_{fit}$ es la cantidad de agua por encima de la capacidad de campo del suelo. Se calcula tras hacer el balance entre el agua presente en el suelo en la unidad de tiempo previa, más lo posteriormente aportado por precipitación y menos lo perdido por evapotranspiración. ADT_{fi} es el agua disponible en el suelo a capacidad de campo (ecuación 5). $N_{min_{fit-1}}$ es la cantidad de N mineral presente al final de la unidad de tiempo anterior.

3.1.9. Siega

La siega se simula sacando del sistema toda la biomasa verde-muerta aérea presente menos una cantidad remanente fija ($bio00_{fi}$ y $biom00_{fi}$ respectivamente). Las cantidades de biomasa viva ($svgm2_{fit}$) y muerta ($smgm2_{fit}$) realmente cosechadas se calculan considerando una eficiencia de recogida de las biomásas aéreas fijada por los parámetros ksv y ksm respectivamente.

3.1.10. Fertilización orgánica

Esta acción se simula sencillamente como la aplicación de una cantidad determinada de nitrógeno orgánico ($N_{estie_{fit}}$), que se incorpora directamente en el componente $N_{org_{fit}}$.

3.2. Planta-Animal

3.2.1. Selección de la dieta

La ingestión de un tipo de pasto f en una tesela i por los animales de la misma categoría-raza c de un rebaño h en una unidad de tiempo t (iv_{chit} e im_{chit} para la biomasa aérea viva y muerta respectivamente) se simula mediante una serie de algoritmos que consideran el valor pastoral de cada tipo de vegetación existente en el área de pastoreo de cada rebaño, la posible competencia por estos recursos entre distintos rebaños que se solapan en las mismas unidades inventariables de forma total o parcial, y las limitaciones a la ingestión máxima que pueden ocurrir por eficiencia energética o condicionantes fisiológicos de los animales.

3.2.1.1. Valor pastoral

El valor pastoral de un recurso forrajero fi localizado en alguna de las unidades inventariables que conforman el área de pastoreo de un rebaño h de una especie e de herbívoro se calcula como:

(ec. 13)

$$VP_{hefi} = \left[(DigV_{ef} \times Npl_f \times bio_{fit}) + (DigM_{ef} \times Npl_f \times prtvm_f \times biom_{fit}) \right] \times Fantin_{ef} \times Fmos_{ef} \times sel_{efi} \times ch_{hfi} \times Ipend_{ei}$$

Donde:

Entre corchetes se representa la cantidad de nitrógeno digestible de la vegetación en pie por unidad de superficie.

$Fantin_{ef}$ es la proporción máxima (0-1) que un tipo de pasto f puede formar parte en la dieta global diaria de los animales de

una especie e de herbívoro. Tiene un valor 1 para tipos de pasto sin ningún tipo de rechazo (p.ej. pastos de *Festuca-Agrostis*), y valores menores de 1 para plantas con mecanismos de defensa a la herbivoría (metabolitos secundarios o características morfológicas, p.ej. espinas).

$F_{mos_{efi}}$ es un factor (0-1) que cuantifica el grado de accesibilidad por matorralización que tiene un herbívoro a un tipo de pasto f localizado en una tesela i (0: no accesible; 1: accesibilidad total). Su cálculo comienza considerando que cada comunidad vegetal f , en condiciones de cobertura total, tiene un grado de accesibilidad fijo por cada especie de herbívoro e : Mat_{ef} . Así, por ejemplo, los pastos herbáceos de *Festuca-Agrostis* para vacuno tienen accesibilidad total, $Mat_{e=2,f=7}=1$; mientras que un matorral exclusivamente formado por *Ulex gailii* no es accesible para vacuno $Mat_{e=2,f=28}=0$. Para una tesela real, El grado de accesibilidad para una especie de herbívoro (IM_{ei}) se calcula como:

(ec. 14)

$$Nperc_{fit} = \frac{Perc_{fit}}{Perc_{fit} + ADT_{fi}} \times N \min_{fit-1}$$

Se considera que a partir de cierto valor IM_1 de IM_{ei} , $F_{mos_{efi}}$ será máximo (F_{mos_1}), y por debajo de cierto valor IM_0 de IM_{ei} , $F_{mos_{efi}}$ será mínimo (F_{mos_0}). Entre ambos valores (IM_0-IM_1), $F_{mos_{efi}}$ variará linealmente entre F_{mos_0} y F_{mos_1} (uso de la función Tri).

sel_{efit} es un coeficiente (0-1) que indica la capacidad de selección por una especie de herbívoro en una comunidad vegetal de la parte de la vegetación verde frente a la muerta. Por encima de cierto valor ($selectmax_e$) de proporción de biomasa viva en el pasto ($prbiov_{fit}$) los herbívoros pueden seleccionar todo el forraje verde ($sel_{efit}=1$); por debajo de otro valor ($selectmin_e$) de $prbiov_{fit}$ los herbívoros no son capaces de seleccionar nada de forraje verde ($sel_{efit}=0$); y entre ambos valores la relación es lineal (uso de la función Tri).

ch_{efit} es un coeficiente (0-1) que indica la regulación de la ingestión según la biomasa disponible. Tiene valor 1 cuando la cantidad de forraje en pie por unidad de superficie ($biov_{fit}+biom_{fit}$) no es limitante ($lsup_e$) para que el herbívoro pueda ingerir a su capacidad máxima, y valor 0 cuando la cantidad de forraje en pie es menor a un valor ($linf_e$) que impide al herbívoro ingerir nada (uso de la función Tri).

$lpend_{ei}$ es un coeficiente (0-1) que contempla el grado de facilidad de las distintas especies de herbívoros de aprovechar la vegetación según la pendiente. Se calcula usando una función de Hill (Figura 3; fichero *FuncModPlanta.R*), donde cada especie animal tiene valores para dos parámetros: kp_e (valor de la pendiente a la que $lpend_{ei}=0,5$) y np_e (grado de descenso de $lpend_{ei}$ con el incremento de la pendiente).

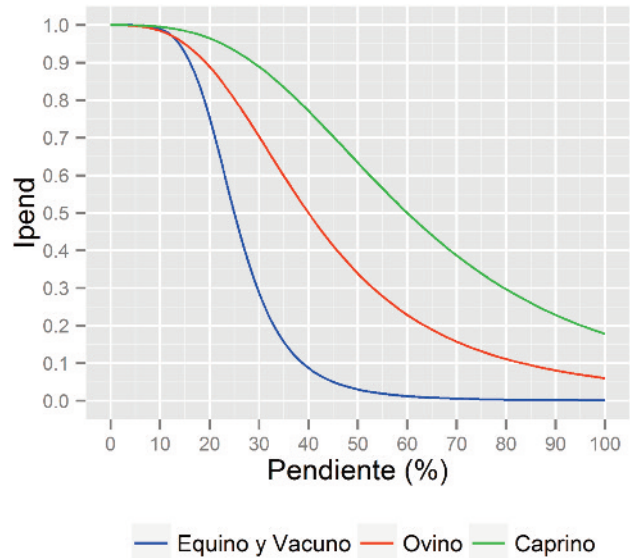


FIGURA 3. Relación entre la pendiente de una tesela i y el factor $lpend_e$, que es un componente del valor pastoral de la vegetación para distintas especies de herbívoros.

3.2.1.2. Ingestión

Con VP_{hfit} se calcula la variable $DIAS_{hfit}$, que estima la proporción de cada pasto fi que ingeriría un rebaño h en su área de pastoreo en el tiempo t si no hubiera solapamiento con otros rebaños:

(ec. 15)

$$DIAS_{hfit} = \frac{VP_{hfit}}{VP_{ht} = \sum_{fi} (VP_{hfit})}$$

Para tener en cuenta la posible existencia de más de un rebaño aprovechando las mismas unidades inventariables, se calcula una nueva variable (PP_{hfit}) que computa la proporción de la ingestión total de un determinado pasto fi en una t , correspondiente al rebaño h :

(ec. 16)

$$PP_{hfit} = \frac{IMax_{ht} \times DIAS_{hfit}}{IMax_{fit} = \sum_h (IMax_{ht} \times DIAS_{hfit})}$$

Donde $IMax_{ht}$ es la ingestión potencial que tendría un rebaño h sin limitaciones de biomasa forrajera. Se estima como un porcentaje fijo del peso vivo del animal. El peso vivo varía según la especie, raza, categoría y condición corporal del herbívoro.

La combinación de las dos variables anteriores (VP_{hfit} y PP_{hfit}) permite obtener una última variable (CIR_{hfit}) que estima la proporción potencial de la ingestión total de un rebaño h correspondiente al pasto fi en el tiempo t :

(ec. 17)

$$CIR_{hfit} = \frac{DIAS_{hfit} \times PP_{hfit}}{DIAS_{ht} \times PP_{ht} = \sum_{fi} (DIAS_{hfit} \times PP_{hfit})}$$

La proporción real de la ingestión del rebaño *h* en la vegetación *fi* (CIR_{2hfit}) será el menor valor entre CIR_{hfit} y *ch*_{hfit}. También se tiene que cumplir que CIR_{2hfit} sea menor o igual que *Fan*_{hfit}. Tras realizar estos ajustes, se debe comprobar si se puede aumentar la CIR_{2hfit} de otros pastos. Estos ajustes se realizan mediante un proceso recursivo que se simula mediante un bucle repetido un número limitado de veces.

Una vez calculada la ingestión *i*_{chfit}, la correspondiente a biomasa viva (*iv*_{chfit}) y muerta (*im*_{chfit}) se calculan usando la función *sele*_{fit} (ver apartado 3.2.1.1).

3.3. Balance energético del ganado

Las ganancias/pérdidas de peso de los herbívoros se estiman en base a un balance energético entre la energía contenida en el forraje ingerido y las necesidades energéticas de los animales para los distintos usos: mantenimiento, desplazamientos, gestación, lactación, movilización de reservas y ganancias de peso (expresadas como MJ de energía neta). Para ello, se utilizan las fórmulas empíricas del ARC (McDonald *et al.*, 1995).

3.3.1. Necesidades de mantenimiento (Nm_{cht})

Para el vacuno y el equino se utilizan las siguientes fórmulas de necesidades:

(ec. 18)

$$Nm_{HEMBRAS} = 0,53 \times (0,93 \times PV_t)^{0,67} + (0,0091 \times PV_t)$$

$$Nm_{JOVENES} = 0,53 \times (0,93 \times PV_t)^{0,67} + (0,0071 \times PV_t)$$

$$Nm_{MACHOS} = 1,15 \times (0,53 \times (0,93 \times PV_t)^{0,67} + (0,0071 \times PV_t))$$

Para el ovino y caprino:

$$Nm_{HEMBRAS} = 0,226 \times (0,93 \times PV_t)^{0,75} + (0,007 \times PV_t)$$

$$Nm_{MACHOS} = 1,15 \times (0,226 \times (0,93 \times PV_t)^{0,75} + (0,007 \times PV_t))$$

3.3.2. Necesidades de desplazamiento (Nd_{cht})

Para el vacuno se consideran unas necesidades de desplazamiento del 25% de las necesidades de mantenimiento, tal como se ha señalado en zonas de montaña (Osoro *et al.*, 2003). Para el equino se estiman unas necesidades de un 40% las de mantenimiento, por el mayor tiempo de pastoreo diario con respecto a los rumiantes (Duncan *et al.*, 1990; Mora *et al.*,

2010). Para el ovino y caprino se toman los mismos valores relativos del vacuno (25% de las necesidades de mantenimiento).

3.3.3. Necesidades de lactación (Nl_{c=1,ht})

Las necesidades energéticas de producción de leche se calculan con la ecuación:

(ec. 19)

$$N_l = 1,509 + 0,0406 \times 40 \frac{g_{grasa}}{kg_{leche}} = 3.133 \frac{MJ}{kg_{leche}}$$

Se asume que, en condiciones adecuadas de condición corporal, cada especie de ganado producirá una cantidad de leche máxima (Lmx_{c=1,e}). Para condiciones corporales sub-óptimas se utiliza una función correctora de la producción de leche (Kccl_{c=1,ht}) según el valor de la condición corporal (CC_{c=1,ht}), tomando en cuenta dos valores umbrales de CC (ccLmx: CC a partir de la cual la producción de leche es máxima; ccLmn: CC por debajo de la cual el animal no produce leche).

(ec. 20)

$$\begin{aligned} \text{Si } CC_{c=1ht} \leq ccLmn & \quad Kccl_{cht} = 0 \\ \text{Si } CC_{c=1ht} \geq ccLmx & \quad Kccl_{cht} = Lmx_{ce} \\ \text{Si } ccLmn < CC_{c=1ht} < ccLmx & \quad Kccl_{cht} = \frac{Lmx \times (CC_{c=1t} - ccLmn)}{ccLmx - ccLmn} \end{aligned}$$

3.3.4. Necesidades de gestación (Ngest_{cht})

Las necesidades de gestación se estiman como valores fijos diarios proporcionales al peso vivo de referencia de cada tipo de animal (especie-raza) para el último tercio de la gestación (tres últimos meses para vacas y yeguas, y últimos dos meses para ovejas y cabras; Osoro *et al.*, 2003).

3.3.5. Variación de peso

Una vez computadas las necesidades energéticas del ganado para cada uso (sin considerar aún los gastos energéticos asociados a ganancias/pérdidas de peso), se calcula la EN que supone el forraje ingerido en pastoreo para cada una de las diferentes necesidades de uso. Para ello, se traduce inicialmente el valor energético de las fracciones viva y muerte de los distintos tipos de pasto *f* ingeridos, desde energía bruta (EB; constante para todos los forrajes: 18,4 MJ·kgMS⁻¹), a energía digestible (ED; multiplicando EB por la digestibilidad de forraje: Dig_{ef}), energía metabolizable (EM; fracción constante de la ED: 0,8), y finalmente a EN de cada uso. El paso final de EM a EN se realiza multiplicando las EM de los forrajes por coeficientes de uso, diferentes según el tipo de ganado (Km_e para

mantenimiento y desplazamiento; Kl_e para lactación; $Kgest$ para gestación; y KG_{ec} para las ganancias de peso según el tipo de animal). Si a continuación se computa para cada t la ingestión total de EN de cada uso y la EM para cada rebaño y categoría-raza (hc), la relación de las primeras con la segunda resultará en la obtención de los valores medios de los coeficientes de eficiencia de transformación de EM en EN de cada uso para cada situación concreta ($KmProm_{cht}$, $KIProm_{cht}$, $KgestProm_{cht}$ y $KganProm_{cht}$).

Finalmente, el balance entre la EM ingerida (EMI_{cht}) y las necesidades de EM de mantenimiento-movimiento, lactación y gestación, es la EM que sobra o falta ($EMAPeso_{cht}$), y que se traducirá posteriormente en ganancias o pérdidas de peso:

(ec. 21)

$$EMAPeso_{cht} = EMI_{cht} - \left(\frac{Nmd_{cht}}{KmProm_{cht}} + \frac{NI_{cht}}{KI Prom_{cht}} + \frac{Ngest_{cht}}{Kgest Prom_{cht}} \right)$$

En el caso de que $EMAPeso_{cht}$ sea negativo, se produce movilización de reservas, y por tanto pérdidas de peso:

(ec. 22)

$$PérdidaPeso(kg)_{cht} = EMAPeso_{cht} \times \frac{Kreservas}{ENmovil}$$

Donde $Kreservas$ es la eficiencia de utilización de la EM para movilizar reservas corporales y $ENmovil$ es el valor energético que se genera con la movilización de dichas reservas ($MJ \cdot kg^{-1}$). Ambos parámetros se asumen en el modelo constantes para todas las especies y categorías-razas de animales.

En el caso de que $EMAPeso_{cht}$ sea positivo, se producirán ganancias de peso:

(ec. 23)

$$GananciaPeso(kg)_{cht} = EMAPeso_{cht} \times \frac{KganProm_{cht}}{EGKg_{ce}}$$

Donde $EGKg_{ce}$ es la EN necesaria para ganar un kg de peso, bien diferente según que los animales sean jóvenes en crecimiento o adultos. Para animales jóvenes, se ha utilizado la ecuación de McDonald *et al.* (1995):

(ec. 24)

$$EGKg_{c=3,e=2} = \frac{4,1 + 0,0332 \times PV - 0,000009 \times PV^2}{1 - 0,1475 \times \Delta P} \times fcr \times fcs$$

Donde ΔP es el aumento esperable de peso, fijado en $0,5 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$, y fcr y fcs son factores de corrección de las necesidades de crecimiento según la precocidad de la raza y el sexo respectivamente. Para animales adultos, $EGKg_{ce}$ se considera como un valor fijo ($26 \text{ MJ EN} \cdot \text{kg}^{-1}$).

4. PROGRAMACIÓN

El modelo PUERTO está implementado en el lenguaje de programación R (R core team, 2014), basándose fundamentalmente en la consulta de tablas (uniones, agregaciones, filtrados, transformaciones, etc) mediante el uso de funciones de la librería *data.table* (Dowle *et al.*, 2014). El código del modelo está escrito en cuatro ficheros que se comunican entre ellos: *CorrerPuerto.R*, *Plant.R*, *Plant1_Comun.R* y *Plant2_Crec.R*.

4.1. Ficheros de código del modelo

4.1.1. CorrerPuerto.R

Este fichero es el único que se necesita correr para realizar una simulación del modelo PUERTO completa. La primera vez que se quiere simular una nueva localización, se debe correr inicialmente la función *puerto clima* contenida en el fichero *PuertoClima.R*, pero accesible desde *CorrerPuerto.R*. Esta función transforma los datos de clima (mensuales o diarios) a la escala temporal del modelo, creando la tabla *c1* en un fichero denominado *clima.Rdata*. Si se quiere volver a correr el modelo para la misma localización sin variar los datos del clima, no se necesita volver a correr *puerto clima*, por lo que se mantiene desactivada esta línea de código en *CorrerPuerto.R*.

Las variables que necesitan definirse en *CorrerPuerto.R* para correr el modelo son:

- *runtotf*: número de años que se quiere correr el modelo para conseguir una simulación de un año con unos valores iniciales de las variables de estado razonables. Para el primer año, el modelo usa para estas variables de estado unos valores iniciales contenidas en *ZB3_ComFisio* (*Remv_f* para *biov_{fit}* y *biovr_{fit}*; *RemM_f* para *biom_{fit}* y *biomr_{fit}*; *RemD_f* para *biod_{fit}* y *biodr_{fit}*; *NorglO_f* para *Norgl_{fit}*; *NorgO_f* para *Norg_{fit}*; *NminO_f* para *Nmin_{fit}*; y *NresO_f* para *Nres_{fit}*).
- *disk*: ruta de acceso hasta el directorio donde se encuentran la raíz *Puerto* del modelo (ver apartado 4.2).
- *site*: nombre de la localización que se quiere simular. Debe corresponder con uno de los nombres de los sub-directorios tanto del directorio "Inputs" como "Outputs" (ver apartado 4.2).

Además de estas variables, el fichero *CorrerPuerto.R* tiene valores de otras variables (*tmax*, *i*, *z*, *runtotf*) que tienen interés para correr el modelo por tramos, que sirve para analizar el

funcionamiento del modelo o poder detectar la localización de posibles fallos en la información de partida utilizada.

CorrerPuerto.R consiste en un bucle que corre la función *plantf* contenida en el fichero *Plant.R* tantas veces como los años definidos en *runtotf*. Los resultados de cada año se salvan en un fichero cuyo nombre tiene como prefijo "result" y como sufijo el número de año seguido de *.Rdata* (ruta *Puerto/Outputs/sites/SiteX/resultY.Rdata*; ver apartado 4.2). Estos ficheros contienen una lista con las tablas de los resultados de la simulación: *Fhijt*, *TT*, *lhcif* y *BalanceAnimal* (ver apartado 5).

4.1.2. *Plant.R*

Fichero que contiene la función *plantf*, que realiza los siguientes pasos:

- Carga la librería *data.table*.
- Carga ficheros con los parámetros más generales del modelo (*Parametros.R*), o con funciones sencillas que hacen cálculos que se repiten varias veces en la simulación (*FuncModPlanta.R* y *FuncModAnimal.R*).
- Carga el fichero *Plant1_Comun.R*, para con ello correr la función *plant1comunf*, y almacenar las tablas producidas por esta función en una lista llamada *pl1*.
- Carga el fichero *Plant2_Crec.R*, para con ello correr la función *plant2crecf* las veces definidas en un bucle que contempla (i) el número de unidades de tiempo *t* fijadas en *tmax* (hasta ahora siempre 36) y (ii) cada uno de los años *z* comprendidos entre *runtoti* y *runtotf*.

4.1.3. *Plant1_Comun.R*

Fichero que contiene la función *plant1comunf*, cuyo objetivo es cargar toda la información del modelo PUERTO que no cambia a lo largo del tiempo, y que por tanto no necesita incluirse dentro de un bucle que contemple cada una de las unidades de tiempo. Además de la carga de las tablas con la información de partida (ver apartado 2 y ficheros terminados en *.txt* de apartado 5), en este fichero se realizan algunas consultas a partir de estas tablas para facilitar los cálculos posteriores.

4.1.4. *Plant2_CrecR*

Este fichero contiene la función *plant2crecf* que realiza la simulación del modelo PUERTO correspondiente a cada unidad de tiempo *t*. Se estructura en las siguientes partes:

- Cálculo de los factores de crecimiento FT, FR y FH. Tabla resultante: *Fhijt*. Juntando todas las unidades *t* de un año se crea la tabla *Fhijt*.

- Cálculo de las variables de procesos y estado del sistema planta-suelo. Tabla resultante para cada unidad *t*: *T41*.
- Cálculo de la ingestión de los herbívoros. Tabla resultante para cada unidad *t*: *lhcif*. Juntando todas las unidades *t* de un año se crea la tabla *lhcif*.
- Inclusión de las variables de procesos y estado del sistema animal-suelo a *T41*, para crear la tabla *T6*. Juntando todas las unidades *t* de un año se crea la tabla *TT*.
- Cálculo del balance energético en los animales y de las variaciones de sus pesos. Tabla resultante para cada unidad *t*: *Balance*. Juntando todas las unidades *t* de un año se crea la tabla *BalanceAnimal*.

4.2. Organización de carpetas y ficheros

Los ficheros necesarios para correr el modelo (con código, con funciones o con información de partida) y los ficheros generados como resultados del modelo están ordenados en un sistema de carpetas jerarquizadas, donde la raíz inicial es una carpeta denominada *Puerto*. A partir de ésta hay cuatro carpetas de primer nivel:

- *Código*. Contiene los ficheros con el código para correr el modelo.
- *Funciones*. Contiene ficheros con funciones auxiliares y parámetros generales.
- *Inputs*. Contiene subcarpetas con los nombres de las localidades donde se aplica el modelo. Cada una de estas subcarpetas tiene a su vez ficheros con todas las tablas con la información de partida necesaria para correr el modelo, además de ficheros de SIG con la representación geográfica de teselas y unidades inventariales.
- *Outputs*. Se divide en dos subcarpetas:
- *Sites*. Donde a su vez se incluyen las subcarpetas con los nombres de las localidades donde se aplica el modelo, que contienen los resultados de las simulaciones (un fichero por cada año simulado).

InformesGestion. Ficheros de tipo *R markdown* (*.Rmd*) que generan informes automáticos sobre distintos aspectos de los resultados del modelo, combinando tablas, figuras y mapas.

Las tablas con la información de partida se pueden organizar y recopilar en una base de datos tipo ACCESS. Esto permite verificar que las relaciones existentes entre las distintas tablas son coherentes. Transformar el formato de las tablas contenidas en ACCESS a ficheros *.txt* requeridos en la programación de la simulación de PUERTO se realiza de forma sencilla con un módulo de VisualBasic creado dentro de la misma base de datos. Se ha creado un fichero *.mdb* denominado *Inputs-Template.mdb* que sirve de plantilla para meter la información de partida.

5. ÍNDICE DE VARIABLES Y PARÁMETROS

En este apartado se recogen todas las variables y parámetros utilizados en la simulación del modelo PUERTO con el mismo nombre con el que aparecen en el código del programa. No se recogen variables creadas como pasos intermedios necesarios en la programación. Las variables/parámetros se ordenan en orden alfabético en cada una de varias tablas según su naturaleza: componentes, variables de partida, variables de estado, variables de proceso y parámetros.

En cada tabla y para cada variable/parámetro se detalla su *nombre*, apartado del texto donde aparece con mayor detalle (*apdo*), definición, escala (*esc*) en la que se representa según lo especificado en el apartado 1, unidad (*ud*), localización (*loc*) en tabla (.txt), fichero de R (.R) o tabla de resultado (sin extensión) y *uso* (0: no usado en el modelo, pero importante para interpretar los resultados; 1: usado en el modelo).

5.1. Componentes

Nombre	apdo	Definición	esc	ud	loc
Categoría	1	Identificación del tipo de animal (1: hembra lactante; 2: hembra seca; 3: joven; 4: semental)	c		A1_Numeros.txt
com	1	Identificación de una comunidad vegetal	f		ZB3_ComFisio.txt
IDMancha	1	Identificación de una tesela	iv		D1_Manchas.txt
IDRebaño	1	Identificación de un rebaño	he		A0_Rebaños.txt
Raza	1	Identificación de la raza del herbívoro	c		A1_Numeros.txt
t	1	Identificación de la unidad de tiempo	t	d	A1_Numeros.txt
UP	1	Identificación de la Unidad Inventarial donde se encuentra un rebaño	v		A2_Alcances.txt

5.2. Variables de partida

Nombre	apdo	Definición	esc	ud	loc	uso
accion	2.5	Tipo de actuación (1: siega; 2: fertilización orgánica)	fit		D2b_Accion.txt	1
Ccini	2.4	Condición corporal al inicio del pastoreo	cht		A1b_Inicio.txt	1
cob	2.1	Cobertura vegetal de una tesela	i	%	D1_Manchas.txt	1
cobv	2.1	Cobertura de la comunidad vegetal en la tesela	fi	%	D2_ManchasCom.txt	1
Gestor	2.4	Identificación del ganadero responsable del rebaño	h		A0_Rebaños.txt	0
has	2.1	Superficie de una tesela	i	ha	D1_Manchas.txt	1
inc	2.1	Localización de la tesela dentro (1) o fuera (2) de la zona de estudio	i		D1_Manchas.txt	0
mes	2.3	Número de mes	t		D1c_ManchasClima.txt	1
n	2.4	Número de animales presentes	cht		A1_Numeros.txt	1
Nestie	3.1.10	Cantidad de N aportado por el estiércol	fit	gNm ⁻²	D2b_Accion.txt	1
pend	2.1	Pendiente de una tesela	i	%	D1_Manchas.txt	1
prec	2.3	Precipitación	it	mm mes ⁻¹	D1c_ManchasClima.txt	1
prgest	2.4	Proporción de animales en los últimos meses de gestación	cht		A0b_Gestantes.txt	1
prmen35	2.1	Proporción del área de la tesela con una pendiente menor al 35%	i		D1_Manchas.txt	0
prof	2.2	Profundidad del suelo	i	mm	D1b_ManchasSuelo.txt	1
rg	2.3	Radiación solar incidente	it	MJm ⁻² d ⁻¹	D1c_ManchasClima.txt	1
text	2.2	Textura del suelo (valores de 1 a 3; 1: arenoso, 2: franco, 3: arcilloso)	i		D1b_ManchasSuelo.txt	1
tmax	2.3	Temperatura máxima media	it	°C	D1c_ManchasClima.txt	1
tmed	2.3	Temperatura media	it	°C	D1c_ManchasClima.txt	1
tmin	2.3	Temperatura mínima media	it	°C	D1c_ManchasClima.txt	1

5.3. Variables de estado

Nombre	apdo	Definición	esc	ud	loc
ADT	3.1.1.3	Cantidad de agua que el suelo puede albergar y que las raíces de la comunidad vegetal presente podrían absorber	fi	mm	FhijtT
AFA	3.1.1.3	Agua fácilmente aprovechable	fit	mm	FhijtT
biod-Nbiod	3.1.3	Biomasa-N vegetal de parte aérea muerta despegada	fit	gMS-Nm ⁻²	TT
biodr-Nbiodr	3.1.3	Biomasa-N vegetal de raíces muerta despegada	fit	gMS-Nm ⁻²	TT
bioh-Nbioh	3.1.4	Biomasa-N de heces presente	fit	gMS-Nm ⁻²	TT
biom-Nbiom	3.1.2	Biomasa-N vegetal de parte aérea muerta en pie	fit	gMS-Nm ⁻²	TT
biomr-Nbiomr	3.1.2	Biomasa-N vegetal de raíces muerta en pie	fit	gMS-Nm ⁻²	TT
biov-Nbiov	3.1.1	Biomasa vegetal - N de parte aérea viva	fit	gMS-Nm ⁻²	TT
biovr-Nbiovr	3.1.1	Biomasa vegetal - N de raíces viva	fit	gMS-Nm ⁻²	TT
cc	3.3.3	Condición corporal (escala 0-5)	cht		Balance Animal
ch	3.2.1.1	Coefficiente (0-1) que indica la regulación de la ingestión según la biomasa disponible	efit		
CIR	3.2.1.2	Proporción potencial de la ingestión total de un rebaño correspondiente a un tipo de pasto	hfit		
CIR2	3.2.1.2	Proporción real de la ingestión de un rebaño correspondiente a un tipo de pasto	hfit		
crecpota	3.1.1	Crecimiento potencial de la parte aérea de la comunidad vegetal con las condiciones existentes de temperatura (FT), radiación (FR) y humedad (FH)	fit	gm ⁻² t ⁻¹	
crecpotr	3.1.1	Crecimiento potencial de las raíces de la comunidad vegetal con las condiciones existentes de temperatura (FT), radiación (FR) y humedad (FH)	fit	gm ⁻² t ⁻¹	
DIAS	3.2.1.2	Proporción potencial de cada pasto que ingeriría un rebaño en su área de pastoreo si no hubiera solapamiento con otros rebaños	hfit		
DRi	3.1.1.3	Grado de agotamiento de agua en la zona radicular	fit	mm	FhijtT
EMAPeso	3.3.5	Energía sobrante (+) o faltante(-) del balance entre EM ingerida y EM requerida para las necesidades de mantenimiento, desplazamientos, gestación y lactación	cht	MJt ⁻¹	Balance Animal
EMI	3.3.5	Ingestión de Energía Metabolizable	chfit	MJt ⁻¹	
ET	3.1.1.3	Evapotranspiración real: Etc x FH	fit	mm	FhijtT
ETc	3.1.1.3	Evapotranspiración de referencia	fit	mm	FhijtT
FH	3.1.1.3	Factor (0-1) del efecto del agua en el suelo sobre procesos vegetales (crecimiento, enescencia) y del suelo (descomposición, mineralización)	fit		FhijtT
FR	3.1.1.2	Factor (0-1) del efecto de la radiación sobre el crecimiento de la vegetación	fit		FhijtT
FT	3.1.1.1	Factor (0-1) del efecto de la temperatura sobre procesos vegetales (crecimiento) y del suelo (descomposición, mineralización)	fit		FhijtT
im	3.2.1.2	Ingestión de biomasa aérea muerta en pie	chfit	gt ⁻¹	lhcif
iv	3.2.1.2	Ingestión de biomasa aérea viva	chfit	gt ⁻¹	lhcif
Kc	3.1.1.3	Coefficiente que multiplica la ET potencial para obtener la Etc. Tiene en cuenta la cantidad de biov presente.	fit		FuncMod Planta.R
Kccl	3.3.3	Coefficiente (0-1) corrector de la producción de leche según la condición corporal del animal	cht		
KG	3.3.5	Eficiencia de uso de la EM para ganancia de peso (McDonal, 1995, p.251). Se computa como KG1*Dig+KG2	ef		ZA6_ Necesidades. txt
KganProm	3.3.5	Eficiencia media de utilización de la EM de toda la dieta para ganancia de peso	cht		
KgestProm	3.3.5	Eficiencia media de utilización de la EM de toda la dieta para gestación	cht		ZA6_ Necesidades. txt
Kl	3.3.5	Eficiencia de la utilización de la EM para lactación (McDonald, 1995, p. 251). Se computa como Kml1*Dig+Kml2	ef		Necesidades. txt
KIProm	3.3.5	Eficiencia media de utilización de la EM de toda la dieta para lactación	cht		
Km	3.3.5	Eficiencia de la utilización de la EM para mantenimiento y desplazamientos (McDonald, 1995, p.251). Se computa como Kml1*Dig+Kml2	ef		ZA6_ Necesidades. txt
KmProm	3.3.5	Eficiencia media de utilización de la EM de toda la dieta para mantenimiento	cht		
NI	3.3.3	Necesidades diarias de energía neta para lactación	cht	MJt ⁻¹	
Nmin	3.1.7	Nitrógeno mineral	fit	gNm ⁻²	TT
Nres	3.1.2	N de reserva en la comunidad vegetal	fit	gNm ⁻²	Plant2_Crec.R
orgl-Norgl	3.1.5	Materia orgánica lenta-N orgánico lento	fit	gMS-Nm ⁻² t ⁻¹	TT
org-Norg	3.1.5	Materia orgánica activa-N orgánico activo	fit	gMS-Nm ⁻²	TT
pc	3.1.1.3	p corregido según la evapotranspiración existente (ETc)	fit		
pc2	3.1.1.3	pc corregido según la textura del suelo	fit		
Perc	3.1.8	Cantidad de agua por encima de la capacidad de campo del suelo	fit	mm	
ph	3.1.1	Estado fenológico de la vegetación (1: vegetativo; 0: no vegetativo)	fit		TT
PP	3.2.1.2	Proporción potencial de la ingestión total de un determinado pasto que corresponde a un rebaño	hfit		
profRc	3.1.1.3	Profundidad media de las raíces, considerando posibles limitaciones por espesor de suelo	fi	mm	
prsen	3.1.2	Proporción diaria de biomasa viva senesciendo	fit	d ⁻¹	Plant2_Crec.R
Rg2	3.1.1.2	Radiación solar sobre la comunidad vegetal	fit	MJm ⁻² d ⁻¹	
sel	3.2.1.1	Coefficiente (0-1) que indica la capacidad de selección por cada especie de herbívoro de la vegetación verde frente a la muerta	efit		
Sh	3.1.2	Coefficiente (0-1) de senescencia función de la humedad (FH). Función Trí	fit		FuncMod Planta.R
smgm2	3.1.9	Biomasa muerta cosechada tras la siega	fit	gMSm ⁻²	TT
St	3.1.2	Coefficiente (0-1) de senescencia función de la temperatura. Función Trí	fit		FuncMod Planta.R
svgm2	3.1.9	Biomasa viva cosechada tras la siega	fit	gMSm ⁻²	TT
Tac	3.1.1	Temperatura acumulada a lo largo del tiempo	fit	°C	
tmed2	2.3	Temperatura media corregida por la nieve y por el dosel leñoso superior	it	°C	
VP	3.2.1.1	Valor pastoral	hefit	gNdigm ⁻² t ⁻¹	

5.4. Variables de procesos

Nombre	apdo	Definición	esc	ud	loc
crec	3.1.1	Crecimiento de biomasa vegetal aérea	fit	$\text{gMSm}^{-2}\text{t}^{-1}$	TT
crecr	3.1.1	Crecimiento de biomasa vegetal de raíces	fit	$\text{gMSm}^{-2}\text{t}^{-1}$	TT
descdl-Ndescdl	3.1.5	Descomposición de la biomasa-N de la parte aérea despegada hacia la biomasa-N orgánico lento	fit	$\text{gMS-Nm}^{-2}\text{t}^{-1}$	TT
descd-Ndescd	3.1.5	Descomposición de la biomasa-N de la parte aérea despegada hacia la biomasa-N orgánico activo	fit	$\text{gMS-Nm}^{-2}\text{t}^{-1}$	TT
descdr1-Ndescdr1	3.1.5	Descomposición de la biomasa-N de las raíces despegadas hacia la biomasa-N orgánico lento	fit	$\text{gMS-Nm}^{-2}\text{t}^{-1}$	TT
descdr-Ndescdr	3.1.5	Descomposición de la biomasa-N de las raíces despegadas hacia la biomasa-N orgánico activo	fit	$\text{gMS-Nm}^{-2}\text{t}^{-1}$	TT
desf-Ndesf	3.1.3	Desfronde de la biomasa vegetal aérea	fit	$\text{gMS-Nm}^{-2}\text{t}^{-1}$	TT
desfr-Ndesfr	3.1.3	Desfronde de la biomasa vegetal de las raíces	fit	$\text{gMS-Nm}^{-2}\text{t}^{-1}$	TT
H-NHgm2	3.1.4	Biomasa-N excretada de heces	fit	$\text{gMS-Nm}^{-2}\text{t}^{-1}$	TT
Ndesch	3.1.5	Descomposición del N de las heces a N orgánico activo	fit	$\text{gNm}^{-2}\text{t}^{-1}$	TT
Nminer	3.1.7	Mineralización de la materia orgánica activa	fit	$\text{gNm}^{-2}\text{t}^{-1}$	TT
NOgm2	3.1.4	Nitrógeno de orina excretado	fit	$\text{gNm}^{-2}\text{t}^{-1}$	TT
Nperc	3.1.8	Nitrógeno mineral que se pierde por percolación	fit	$\text{gNm}^{-2}\text{t}^{-1}$	TT
Nreabs	3.1.2	Tasa de N que se reabsorbe durante la senescencia	fit	$\text{gNm}^{-2}\text{t}^{-1}$	Plant2_Crec.R
Nvolat	3.1.4	Pérdidas del N de orina por volatilización	chfit	$\text{gNm}^{-2}\text{t}^{-1}$	TT
organ-Norgan	3.1.6	Paso de MO-Norgánico lento a activo	fit	$\text{gMS-Nm}^{-2}\text{t}^{-1}$	TT
senesc	3.1.2	Senescencia de la biomasa vegetal aérea	fit	$\text{gMSm}^{-2}\text{t}^{-1}$	TT
senescr	3.1.2	Senescencia de la biomasa vegetal de las raíces	fit	$\text{gMSm}^{-2}\text{t}^{-1}$	TT

5.5. Parámetros

Nombre	apdo	Definición	esc	uds	loc
biom00	3.1.9	Biomasa muerta remanente tras una siega	fi	gMSm^{-2}	Parametros.R
biov00	3.1.9	Biomasa viva remanente tras una siega	fi	gMSm^{-2}	Parametros.R
ccLmn	3.3.3	Condición corporal por debajo de la cual el animal no produce leche			Parametros.R
ccLmx	3.3.3	Condición corporal por encima de la cual la producción de leche por el animal es máxima			Parametros.R
com2	2.1	Comunidades vegetales encontradas en la misma proyección vertical de la comunidad vegetal com	f		ZB2_Pastos.txt
ddcrec	3.1.1	Grados-día necesarios para pasar de un crecimiento vegetativo a uno reproductivo	f	$^{\circ}\text{Cxd}$	ZB3_ComFisio.txt
DigM	3.2.1.1	Digestibilidad de la biomasa aérea muerta	ef		ZBA_ValorPastoral.txt
DigV	3.2.1.1	Digestibilidad de la biomasa aérea viva	ef		ZBA_ValorPastoral.txt
Dr	3.1.3	Tasa de desfronde de las raíces muertas	f	d^{-1}	ZB3_ComFisio.txt
Ebiom	3.1.1.3	Biomasa viva de referencia: aquella con $\text{kc}=1$	f	gm^{-2}	ZB3_ComFisio.txt
EGKg	3.3.5	EN necesaria para aumentar 1 kg de peso (cat3: con un objetivo de crto. de 500 g/d e incluye ya fcr y fcs; otras cat: McDonald, 1995, p.363)	ce	MJ EN kg^{-1}	ZA6_Necesidades.txt
Ek0	3.1.1.3	Kc mínimo y constante	f		ZB3_ComFisio.txt
Ek1	3.1.1.3	Define la pendiente de la función entre kc y biov cuando biov/Ebio está entre Epr0 y Epr1	f		ZB3_ComFisio.txt
ENI	3.3.3	Necesidades diarias de energía neta para lactación	cet	MJd^{-1}	ZA6_Necesidades.txt
ENmovil	3.3.5	Valor energético de la movilización de reservas corporales en todas las categorías		MJ EN kg^{-1}	Parametros.R
Epr0	3.1.1.3	Proporción de la biov de referencia por debajo de la cual Kc es mínimo y constante (Ek0)	f		ZB3_ComFisio.txt
Epr1	3.1.1.3	Proporción de la biov de referencia a la que $\text{Kc}=\text{Kcmax}$	f		ZB3_ComFisio.txt
Especie	2.4	Identificación de la especie de herbívoro (1: equino; 2: vacuno; 3: ovino; 4: caprino)	e		ZA4_Especies.txt
Fantin	3.2.1.1	Proporción máxima que un forraje de un tipo de vegetación puede participar en la dieta de un herbívoro.	ef		ZBA_ValorPastoral.txt
FC	3.1.1.3	Contenido de agua del suelo a capacidad de campo. Función de la textura	i	m^3m^{-3}	Z1_SuelosText.txt
fcr	3.3.5	Factor de corrección de las necesidades de crecimiento según la precocidad de la raza. Incluido ya en el valor de Egkg	ce		ZA6_Necesidades.txt
fcs	3.3.5	Factor de corrección de las necesidades de crecimiento según el sexo. Incluido ya en el valor de Egkg	ce		ZA6_Necesidades.txt
Fhs	3.1.2	FH a partir de la cual la senescencia es mínima (estable)	f		ZB3_ComFisio.txt
fmn	3.1.3	Tasa mínima de desfronde de la materia muerta aérea en pie cuando el grado de pastoreo es $\leq \text{pimn}$	f	d^{-1}	ZB3_ComFisio.txt
Fmos	3.2.1.1	Factor (0-1) que cuantifica la limitación de un herbívoro a ingerir pasto por la dificultad de acceso por excesiva matorralización. $F(\text{Fmos1}, \text{Mat}, \text{IMO}, \text{IM1})$	efi		(Parámetro derivado)
Fmos0	3.2.1.1	Fmos mínimo. Máxima penalización al pastoreo			Parametros.R
fmx	3.1.3	Tasa máxima de desfronde de la materia muerta aérea en pie cuando el grado de pastoreo es $\geq \text{pimx}$	f	d^{-1}	ZB3_ComFisio.txt
IDHL	2.3	Tipo de comunidad vegetal según su altura (1: herbácea; 2: arbustiva baja; 3: arbustiva alta; 4: arbórea)	f		ZB3_ComFisio.txt
IMO	3.2.1.1	Grado de accesibilidad por debajo del cual Fmos será mínimo (Fmos0)			Parametros.R
IM1	3.2.1.1	Grado de accesibilidad por encima del cual Fmos será máximo (1)			Parametros.R
ingmax	3.2.1.2	Ingestión máxima diaria de cada especie-raza-categoría	cet	kgMSd^{-1}	ZA6_Necesidades.txt
lpend	3.2.1.1	Coefficiente (0-1) que indica la capacidad de los herbívoros de pastorear según la pendiente. Función Hill	ei		FuncModPlanta.R
Kgest	3.3.5	Eficiencia de uso de la EM para gestación			Parametros.R
kp	3.2.1.1	Pendiente a la que el valor de lpend (corrección de Valor Pastoral por la pendiente) es 0,5 (Función de Hill)	e	%	ZA4_Especies.txt
Kreservas	3.3.5	Eficiencia de la utilización de la EM para movilización de reservas			Parametros.R
KRs	3.1.1.3	Coefficiente de ajuste empírico para definir el carácter más o menos oceánico de la localidad			Parametros.R
ksm	3.1.9	Eficiencia de recogida de la biomasa aérea muerta segada			Parametros.R
ksv	3.1.9	Eficiencia de recogida de la biomasa aérea viva segada			Parametros.R
linf	3.2.1.1	Biomasa aérea de una comunidad vegetal por debajo de la cual la ingestión es nula	e	gm^{-2}	ZA4_Especies.txt
Lmx	3.3.3	Producción de leche máxima en hembras lactantes (se produce cuando la condición corporal $\text{CC} > \text{CCLmx}$) (kg leche/d)	e	kg leche d^{-1}	ZA4_Especies.txt
lsup	3.2.1.1	Biomasa aérea de una comunidad vegetal por encima de la cual la ingestión diaria no está restringida	e	gm^{-2}	ZA4_Especies.txt

5.5. Parámetros (continúa)

Nombre	apdo	Definición	esc	uds	loc
Mat	3.2.1.1	Factor (0-1) que cuantifica el grado de accesibilidad y circulación de los herbívoros en teselas puras de un tipo de vegetación	ef		ZBA_ValorPastoral.txt
Nd	3.3.2	Necesidades diarias de energía neta desplazamientos	cet	MJd ⁻¹	ZA6_Necesidades.txt
Ngest	3.3.4	Necesidades diarias de energía neta para gestación	cet	MJd ⁻¹	ZA6_Necesidades.txt
Nm	3.3.1	Necesidades diarias de energía neta para mantenimiento	cet	MJd ⁻¹	ZA6_Necesidades.txt
np	3.2.1.1	Grado de descenso del valor de lpend con el incremento de la pendiente (Función de Hill)	e		ZA4_Especies.txt
Npla	3.2.1.1	Concentración de N biomasa aérea viva	f		ZB3_ComFisio.txt
p	3.1.1.3	Fracción de agua en el suelo por encima de la cual ésta es fácilmente disponible para las plantas de la comunidad vegetal	f		ZB3_ComFisio.txt
pimn	3.1.3	Proporción diaria de biov ingerido por debajo del cual la tasa de desfronde es mínima (fmn)		d ⁻¹	Parametros.R
pimx	3.1.3	Proporción diaria de biov ingerido a partir del cual se produce un desfronde máximo de lo muerto aéreo en pie (fmx)		d ⁻¹	Parametros.R
pingmax	3.2.1.1	Ingestión máxima como porcentaje del peso vivo	ht	%	ZA4_Especies.txt
probH	3.1.4	Coefficiente (0-1) que cuantifica la probabilidad de depositar excrementos en esa comunidad respecto a su utilización (0,5: proporcional a la ingestión)	f		ZB3_ComFisio.txt
profR	3.1.1.3	Profundidad de la raíces de una comunidad vegetal cuando no hay limitación en profundidad del suelo	f	mm	ZB3_ComFisio.txt
prpr	3.1.1.3	Proporción del ADT disponible para las raíces. Valor	f		(parámetro derivado)
prvm	3.2.1.1	Proporción de biomasa verde/nutrientes de la comunidad vegetal que se reabsorbe en la senescencia hacia la reserva de nutrientes	f		ZB3_ComFisio.txt
prvolatN	3.1.4	Proporción de la orina excretada por los herbívoros que se volatilizaba			Parametros.R
PV	3.2.1.2	Peso vivo de referencia para cada especie, raza y categoría de herbívoro	ce	kg	ZA6_Necesidades.txt
PWP	3.1.1.3	Contenido de agua del suelo en el punto de marchitez permanente. Función de la textura	i	m ³ m ⁻³	Z1_SuelosText.txt
Rar	3.1.1	Proporción de la biomasa viva que es raíz en condiciones de equilibrio (sin perturbaciones)	f		ZB3_ComFisio.txt
Rgmax	3.1.1.2	Radiación solar a la que se alcanza la máxima capacidad fotosintética. A valores mayores se mantiene dicha capacidad.	f	MJm ⁻² d ⁻¹	ZB3_ComFisio.txt
selectmax	3.2.1.1	Proporción de biomasa viva por encima de la cual el animal selecciona solo vivo en el pastoreo de esa comunidad vegetal	e		ZA4_Especies.txt
selectmin	3.2.1.1	Proporción de biomasa viva por debajo de la cual el animal no puede seleccionar vivo en el pastoreo de esa comunidad vegetal	e		ZA4_Especies.txt
Sh0	3.1.2	Proporción de hoja muriéndose diariamente a FH=0	f		ZB3_ComFisio.txt
Sh1	3.1.2	Proporción de hoja muriéndose diariamente a FH de senescencia mínima (Fhs)	f		ZB3_ComFisio.txt
St0	3.1.2	Proporción de hoja muriéndose cuando t<=t0 (máxima senescencia)	f		ZB3_ComFisio.txt
St1	3.1.2	Proporción de hoja muriéndose cuando t>=St1 (mínima senescencia)	f		ZB3_ComFisio.txt
t0	3.1.2	Temperatura extrema por debajo de la cual se produce máxima senescencia:St0	f	°C	ZB3_ComFisio.txt
t1	3.1.2	Temperatura por encima de la cual se produce mínima senescencia: St1	f	°C	ZB3_ComFisio.txt
Tmax	3.1.1.1	Temperatura por encima de la cual la comunidad vegetal deja de crecer por calor	f	°C	ZB3_ComFisio.txt
Tmin	3.1.1.1	Temperatura por debajo de la cual la comunidad vegetal deja de crecer por frío	f	°C	ZB3_ComFisio.txt
Tndescd	3.1.5	Tasa máxima de paso de incorporación a la MO-N orgánico activo del desfronde de la parte aérea (d ⁻¹)	f	d ⁻¹	ZB3_ComFisio.txt
Tndescdl	3.1.5	Tasa máxima de paso de incorporación a la MO-N orgánico lento del desfronde de la parte aérea (d ⁻¹)	f	d ⁻¹	ZB3_ComFisio.txt
Tndescdr	3.1.5	Tasa máxima de paso de incorporación a la MO-N orgánico activo del desfronde de las raíces (d ⁻¹) (1,5xTndescd)	f	d ⁻¹	ZB3_ComFisio.txt
Tndescdrl	3.1.5	Tasa máxima de paso de incorporación a la MO-N orgánico lento del desfronde de las raíces (d ⁻¹) (1,5xTndescdl)	f	d ⁻¹	ZB3_ComFisio.txt
Tndesch	3.1.5	Tasa máxima de incorporación al suelo de N orgánico de las heces (d ⁻¹)	f	d ⁻¹	ZB3_ComFisio.txt
TNMinmx	3.1.7	Tasa de mineralización máxima del N orgánico activo	f	d ⁻¹	ZB3_ComFisio.txt
TNOrgmx	3.1.6	Tasa máxima de paso de MO-Norg lento a activo	f	d ⁻¹	ZB3_ComFisio.txt
Topt	3.1.1.1	Temperatura óptima de crecimiento de la comunidad vegetal	f	°C	ZB3_ComFisio.txt
X	3.1.1	Crecimiento potencial de la comunidad vegetal	f	gm ⁻² d ⁻¹	ZB3_ComFisio.txt

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN R.G., PEREIRA L.S., RAES D. Y SMITH M. (2006) *Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Estudio FAO Riego y Drenaje nº 56. Roma, Italia.
- ALONSO F.J., COFIÑO A., DEL CORRAL D., FERNÁNDEZ J.M., FERRER F., FRANCÉS E., GUTIÉRREZ J.M. Y FELICÍSIMO A. (2007). Zonificación agro-ecológica de Cantabria: un estudio del potencial regional para el desarrollo de actividades agroganaderas. *Actas del IV Congreso Nacional y I Congreso Ibérico de Agroingeniería*.
- BUSQUÉ J. (2014). De la investigación a la práctica: herramientas para gestionar la ganadería de montaña y los pastos comunales de Cantabria dentro de la Política Agraria Común. *Pastos* 44(1), 6-42.
- CONRAD, O (2010). Módulo: *Potential Incoming Solar Radiation*. SAGA-GIS. System for Automated Geoscientific Analyses. www.saga-gis.org.
- COUGHENOUR M.B. (1993). *Savanna-Landscape and Regional Ecosystem Model. Model Description*. Colorado State University. Colorado. EEUU. 57p.
- DOWLE M., SHORT T., LIANOGLU S. Y SRINIVASAN A. (2014). *Package data.table*. <http://cran.r-project.org/web/packages/data.table/data.table.pdf>.
- DUNCAN P., FOOSE T.J., GORDON I.J., GAKAHU C.G. Y LLOYD M. (1990). Comparative nutrient extraction from forages by grazing bovinds and equids: a test of the nutritional model of equid/bovid competition and coexistence. *Oecologia*, 84, 411-418.
- GUTIÉRREZ J.M., HERRERA S., SAN-MARTÍN D., SORDO C., RODRÍGUEZ J.J., FROCHOSO M., ANCELL R., FERNÁNDEZ J., COFIÑO A.S., PONS M.R. Y RODRÍGUEZ M.A. (2010). Escenarios regionales probabilísticos de cambio climático en Cantabria: termopluviometría. Gobierno de Cantabria – Universidad de Cantabria. Santander, 108p + mapas. <http://www.meteo.unican.es/projects/escenariosCantabria>
- MHNN-EEA. MUSÉUM NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE – EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (2014). *Terrestrial habitat mapping in Europe: an overview*. EEA Technical Report 1/2014. 152p.
- McDONALD P., EDWARDS R.A., GREENJALGH J.F.D. Y MORGAN C.A. (1995). *Nutrición animal*. Zaragoza. Editorial Acribia.
- MORA M.J., BUSQUÉ J. Y FRUTOS P. (2010), *Invasión de pastos de montaña por lecherina (Euphorbia polygalifolia): estudios dirigidos al desarrollo de un sistema de control biológico basado en el pastoreo*. CIFA - Gobierno de Cantabria. 223p.
- MOROS R. Y BUSQUÉ J. (2013). Generación automática de estadísticas zootécnicas bovinas a escala municipal a partir de bases de datos oficiales. En: *XV Jornadas sobre Producción Animal*. AIDA 42(1), 55-57.
- MOROS R. Y BUSQUÉ J. (2014). Tipificación de la ganadería bovina de carne de Cantabria a escala municipal. En: Busqué J. et al. (eds) *Pastos y PAC 2014-2020*. pp. 491-498. Potes, Cantabria. Sociedad Española para el Estudio de los Pastos.
- OSORO K., MARTÍNEZ A. Y CASTRO P. (2003). *Desarrollo de Sistemas Eficientes de Producción de Carne de Calidad en Zonas Bajas*. Oviedo. KRK Ediciones.
- R CORE TEAM (2014). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. <http://www.R-project.org/>.
- SANCHO J.M., RIESCO J., JIMÉNEZ C., SÁNCHEZ M.C., MONTERO J. Y LÓPEZ M. (2012) *Atlas de radiación solar en España utilizando datos del SAF de Clima de EUMETSAT*. Agencia Estatal de Meteorología.
- TAPPEINER U. Y CERNUSCA A. (1998). Model simulation of spatial distribution of photosynthesis in structurally differing plant communities in the Central Caucasus. *Ecological Modelling* 113, 201-223.