

Impactos y adaptación al cambio climático en rumiantes

A. del Prado*, E. Galán, I. Batalla y G. Pardo

Basque Centre for Climate Change (BC3), Edificio Sede nº 1, Planta 1, Parque Científico de UPV/EHU, Barrio Sarriena s/n, 48940 Leioa, Bizkaia, España

Resumen

El cambio climático afectará a los sistemas de rumiantes a través de efectos directos sobre el rendimiento de los animales y efectos indirectos sobre la disponibilidad de pastos y forrajes. Como los impactos serán muy desiguales entre las diferentes regiones y sistemas de producción, el sector de rumiantes requerirá estrategias de adaptación para cada contexto específico. Este documento de revisión examina los principales impactos del cambio climático en la productividad animal y forrajera y las principales estrategias de adaptación al cambio climático. Además, mostramos diferentes ejemplos de modelización a nivel de explotación de cómo el cambio climático afectará diferentes sistemas de producción y viendo en qué medida algunas estrategias de adaptación pueden mejorar estos impactos. El estrés por calor es el factor más importante que afecta los sistemas de producción de rumiantes en condiciones de cambio climático, lo que resulta en pérdidas de productividad y cambios en la calidad del producto. Para el forraje, se espera que la productividad y la calidad del alimento se alteren con los cambios en las concentraciones de dióxido de carbono, temperatura y los patrones de lluvia y factores estresantes (p. ej. ozono). La magnitud de los impactos en animales y forrajes dependerán de interacciones complejas entre condiciones ambientales específicas, especies, razas, fase del animal o sistemas específicos de producción. Además, los impactos y las adaptaciones al cambio climático a nivel animal y de alimentación se traducirán de diferentes maneras cuando se considere el nivel de explotación y el sistema productivo.

Palabras clave: Calentamiento global, emergencia climática, vacas, ovejas, cabras.

Impacts and adaptations to climate change in ruminants

Abstract

Climate change will affect ruminant systems through direct effects on animal performance, and indirect effects on pasture and forage availability. As impacts will be very unequal amongst different regions and production systems, the ruminant sector will require adaptation strategies that are tailored to each specific context. This review paper examines, first, the main impacts of climate change on animal and forage productivity, followed by a description of the main adaptation strategies to climate change and finished, by showing different modelling examples at the farm level of how climate change will impact different production systems, and the extent some adaptation strategies can ameliorate these impacts. Heat stress is the most important factor affecting ruminant production systems under climate change conditions, resulting in productivity losses and changes in product quality. For forage, produc-

* Autor para correspondencia: agustin.delprado@bc3research.org

Cita del artículo: del Prado A, Galán PE, Batalla U, Pardo G (2020). Impactos y adaptación al cambio climático en rumiantes. ITEA-Información Técnica Económica Agraria 116(5): 461-482. <https://doi.org/10.12706/itea.2020.038>

tivity and quality of the feed is expected to alter with changes in concentrations of carbon dioxide, changes in temperature and rainfall patterns and stressors such as ozone concentration. The extent heat stress and variables affecting feed production can affect ruminant production systems will depend on complex interactions between specific ambient conditions, species, breeds, animal stage or production systems. Moreover, impacts and adaptations to climate change at the animal and feed level will translate in different ways when the farm level and production system is considered.

Keywords: Global warming, climate emergency, cattle, sheep, goats.

Introducción

El cambio climático es una amenaza importante para la sostenibilidad de los sistemas de producción ganadera a nivel mundial. Hay pocas dudas de que el cambio climático tendrá un gran impacto en la producción ganadera a menos que se implementen estrategias de adaptación a lo largo de toda la cadena de suministro de alimentos. Los rumiantes, debido en parte a su diversidad, están sujetos a desafíos muy variados con respecto a su futuro. Por un lado, podrían ser particularmente vulnerables al cambio climático y a otros cambios ambientales globales, ya que una parte de la producción se lleva a cabo en áreas marginales y/o en condiciones semiáridas, que, en general, se encuentran en áreas económicamente desfavorecidas. Sin embargo, por otro lado, los rumiantes, especialmente aquellos de razas más rústicas, tienen características que brindan ventajas competitivas frente a un clima cambiante en comparación a otras especies de ganado.

El cambio climático afecta a la ganadería de rumiantes de diferentes formas: directamente, sobre el animal (productividad, reproducción, bienestar, salud) e indirectamente, a través de la disponibilidad de alimentos (Figura 1).

En los últimos tiempos se ha estudiado en profundidad todos los aspectos mencionados en la Figura 1 y ha habido un esfuerzo considerable a nivel de proyectos a nivel europeo (más información en Complemento 1).

El objetivo de esta revisión es destacar los aspectos más relevantes en relación a los im-

pactos del cambio climático sobre los sistemas de rumiantes, sobre todo desde el punto de vista productivo, y las potenciales adaptaciones a dichos impactos.

Primero, detallando los impactos a nivel del animal, seguido por los impactos a nivel de planta y luego evaluando diferentes estrategias de adaptación, finalizando con una integración de impactos y adaptaciones al cambio climático en sistemas ganaderos de rumiantes a través de ejemplos simulados con modelos de explotación. Con estos ejemplos pretendemos poner en valor, de forma ilustrativa, el papel que este tipo de herramientas (modelos a escala de explotación: Del Prado et al., 2013) pueden tener como ayuda a la toma de decisiones en este ámbito. El contexto de la revisión está enfocado principalmente a la ganadería de rumiantes en Europa y muy especialmente, a la región mediterránea, donde se esperan y se están viendo ya los cambios en el clima más drásticos.

Dentro de la gran variedad de impactos que el cambio climático se espera pueda afectar en relación a los diferentes sistemas productivos, la revisión se enfoca más mayoritariamente en sistemas de ganadería intensiva o semi-intensiva. Los sistemas ganaderos de rumiantes en extensivo, aunque se espera también sufran impactos considerables, son en gran medida los sistemas más resilientes y adaptados a los cambios climáticos. Para conocer con mayor profundidad sobre esta temática en sistemas ganaderos extensivos se recomienda la lectura de revisiones existentes disponibles (p. ej. Rubio y Roig, 2017).

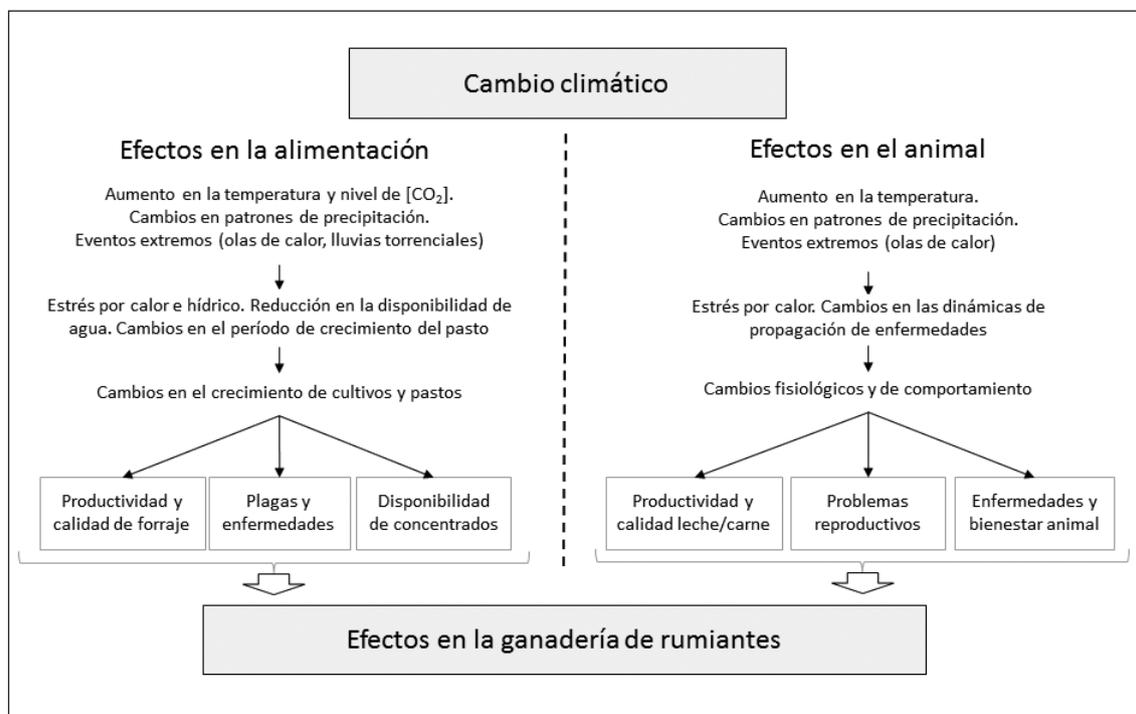


Figura 1. Diagrama de posibles efectos del cambio climático en los sistemas de producción de pequeños rumiantes (basado en diagrama de Mullender et al., 2017).

Figure 1. Diagram illustrating the potential effects of climate change on small ruminants' production systems (based on diagram by Mullender et al., 2017).

Impactos a nivel del animal

Para relacionar los efectos del estrés por calor en el ganado se suele usar el índice de temperatura y humedad (ITH) (p. ej. Bertocchi et al., 2014). Este índice tiene en cuenta, como su nombre ya indica, la temperatura y la humedad relativa del ambiente. El ITH se utiliza de forma generalizada ya que necesita de datos fácilmente disponibles en zonas cercanas a las explotaciones. Obviamente, no está exento de limitaciones. Por ejemplo, no tiene en cuenta los efectos de la velocidad del viento o la radiación solar, lo que dificulta la interpretación de los efectos de las medidas de reducción del estrés por calor, como la ventilación natural, mecánica o la sombra. Ade-

más, la mayoría de los estudios utilizan datos diarios de ITH con lo cual no se contempla la potencial recuperación nocturna si refresca, ni tampoco el potencial efecto acumulativo del stress en los animales.

El estrés por calor en rumiantes induce cambios en sus metabolismos de agua y energía, reacciones enzimáticas y secreciones hormonales. Todos estos mecanismos implican un consumo adicional de energía y un cambio en los patrones de ingesta. Con estrés por calor, por ejemplo, disminuye la ingesta en materia seca (MS) y consecuentemente, se reduce la productividad a la vez que se induce a una mayor ingesta de agua (Hamzaoui et al., 2013). Los animales, además, cambian las preferencias alimenticias en condiciones de

estrés por calor y tienden a consumir concentrados, si los tienen al alcance, en lugar de forrajes, debido que estos generan más calor al fermentar en el rumen (Lu, 1989).

El efecto de unas condiciones determinadas de estrés por calor sobre el ganado, por ejemplo, sobre sus rendimientos, depende, en gran medida de la especie, raza, y manejo y, por tanto, de forma muy importante, de su nivel de productividad. De hecho, con el aumento de la producción los rumiantes tienden a desarrollar una mayor sensibilidad a sufrir estrés térmico (Kadzere et al., 2002).

El ganado vacuno es el más susceptible de sufrir estrés por calor, debido a su mayor tamaño y menor superficie para disipar calor. Dentro del vacuno, los sistemas de producción de leche, son los más afectados porque la lactación ya supone intrínsecamente un importante esfuerzo metabólico (West, 2003).

La literatura sobre estrés por calor describe los umbrales de ITH para vacas lecheras, comenzando desde el intervalo de 68-72 ITH. La Figura 2 muestra los umbrales propuestos por Collier et al. (2012), que están relacionadas con el estrés por calor de acuerdo con los

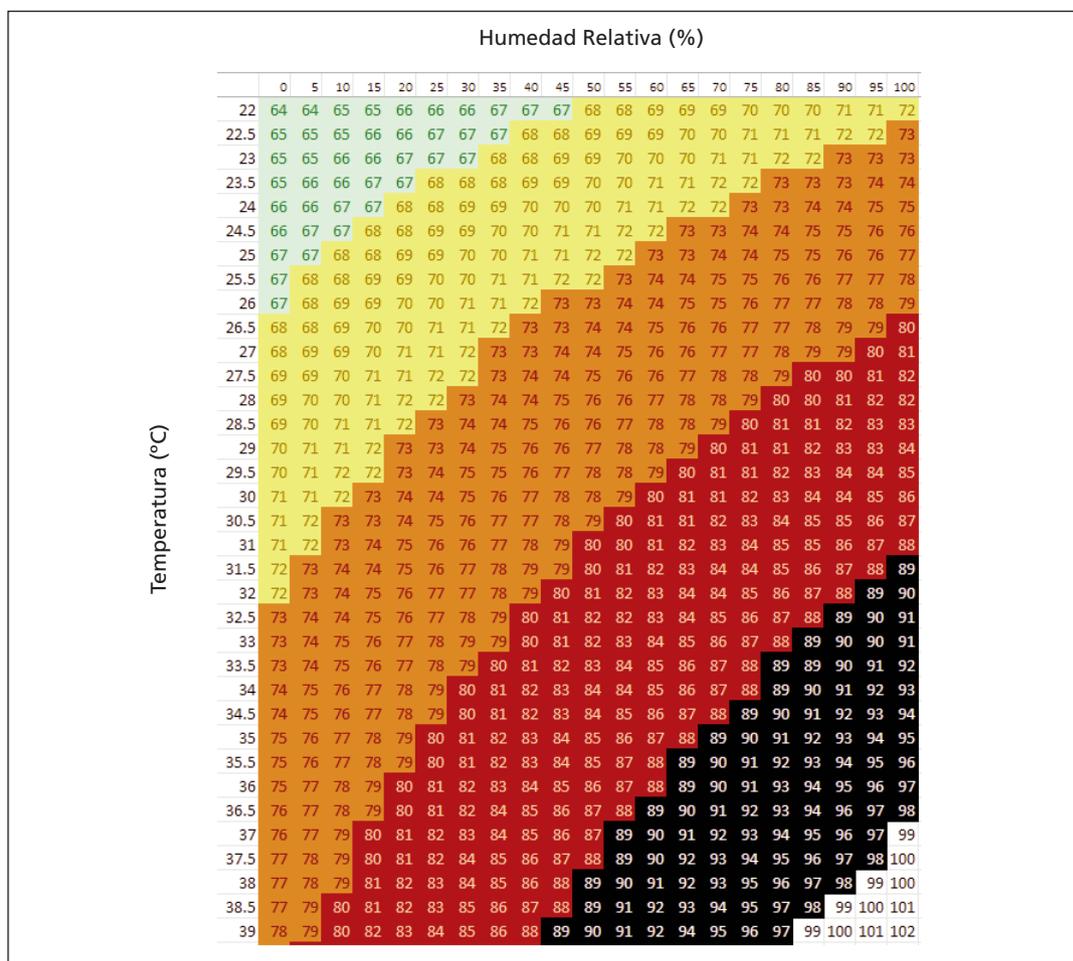


Figura 2. Umbrales de índice de temperatura y humedad (ITH) para vacuno de leche según lo descrito por Collier et al. (2012).

Figure 2. Temperature-humidity index (THI) thresholds for dairy cattle according to Collier et al. (2012).

efectos fisiológicos en vacas lecheras en sus experimentos en Arizona (USA).

Los pequeños rumiantes (p. ej. ovejas y las cabras) parecen ser menos susceptibles al estrés que otras especies de rumiantes domesticados (Lu, 1989). Las ovejas muestran una zona termoneutral entre 12 °C y 25 °C de temperatura media diaria (p. ej. Mishra, 2009). Se puede esperar un umbral de estrés térmico más alto para las cabras, ya que tienden a tolerar el calor mejor que las ovejas, debido a los diferentes mecanismos de adaptación (es decir, anatómicos, morfológicos, fisiológicos, metabólicos) especialmente adecuados para climas cálidos y áridos (p. ej. Al-Dawood, 2017).

Aunque todavía no están claros los impactos ni los mecanismos de desarrollo de la aclima-

tación en el largo y corto plazo (Bernabucci et al., 2010), podría afectar al umbral de ITH de estrés por calor. Así, se ha observado que las olas de calor son más letales a principios de verano que a finales (Nienaber y Hahn, 2007), los animales expuestos a los rangos de temperatura de regiones templadas, tienen umbrales más bajos (p. ej. en Alemania, vacas Holsteins de alto rendimiento estabuladas con ITH de 62: Gorniak et al., 2014).

En vacuno de leche existe bastante literatura, de hecho, sobre el efecto del estrés por calor sobre la productividad lechera (ver figura 3 basada en diferentes estudios: referencias en Complemento 1).

Respecto a diferencias entre razas a las diferentes razas, West et al. (2003), por ejemplo,

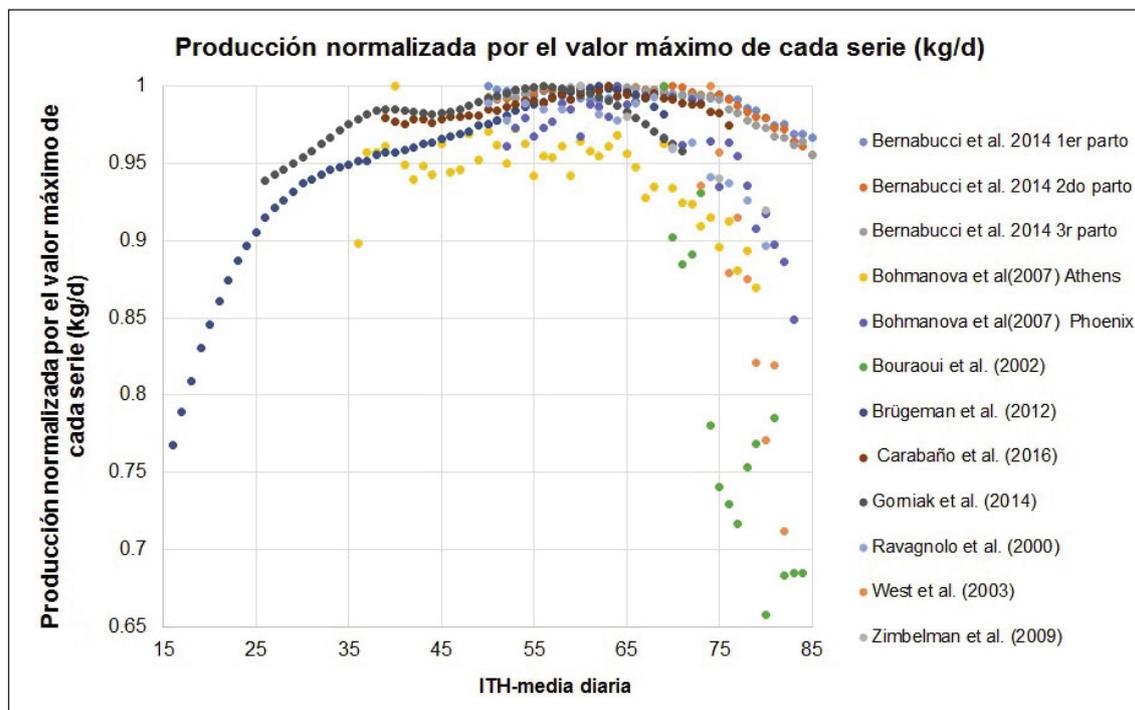


Figura 3. Efectos cuantitativos del estrés por calor en el rendimiento lechero encontrados en la literatura para raza Holstein-Friesian completamente estabulada (referencias en Complemento 1). ITH: Índice de temperatura y humedad.

Figure 3. Heat stress quantitative effects on milk productivity for fully-housed Holstein-Friesian breed cattle as found in the literature (references in Complement 1). ITH: Temperature-humidity index.

en vacuno encontraron que, aun con el mismo umbral diario de ITH de 72, para Holsteins y Jerseys, la disminución del rendimiento de lechero fue mayor para Holsteins que para Jerseys, aunque las Holstein mantuvieron una producción superior.

En estudios con pequeños rumiantes, los resultados cambian también dependiendo de las razas, favoreciendo habitualmente a aquellas originarias de zonas más cálidas y áridas. De este modo, ante las mismas condiciones de estrés por calor, Brown et al. (1988) registraron una mayor reducción en la producción de leche de cabras de raza Alpina en comparación con las de raza Nubia. Algo similar observaron Barnes et al. (2004) en un ensayo con corderos, donde los de raza Awassi mostraron tener un umbral de estrés por calor más alto que los de raza Merina. No obstante, estas diferencias pueden existir incluso entre razas de oveja de una misma región con condiciones climáticas severas, como la cuenca Mediterránea. Peana et al. (2007) vieron que la producción de leche disminuye en un 30 % (0,39 kg/d) en ovejas de raza Sarda cuando las temperaturas máximas y medias eran mayores de 21 °C a 24 °C y de 15 °C a 21 °C respectivamente, mientras que Finocchiaro et al. (2005) observaron que la producción de leche disminuye en 62,8 g por unidad de índice de temperatura y humedad (ITH) en una raza lechera siciliana. Del mismo modo, Sevi et al. (2001) indicaron que la producción de leche en ovejas disminuye en un 20 % (alrededor de 70 g/d) cuando las temperaturas exceden los 35 °C en la raza Comisana.

Como antes hemos mencionado, las cabras tienden a tolerar mejor el calor que las ovejas y vacas. El-Tarabany et al. (2016) vieron disminuciones de entre 27 % y 19 % en la producción de leche para el estrés por calor elevado en comparación con los niveles de ITH bajos y moderados respectivamente en cabras Baladi. Salama et al. (2014), encontraron una disminución de la leche del 1 %

por cada aumento de unidad de ITH (en el rango de ITH: 64-78).

Los estudios con corderos también muestran que el estrés por calor perjudica la tasa de crecimiento y el aumento de peso corporal (Mahjoubi et al., 2014).

Existen otros factores que pueden condicionar la movilización de grasas y el consumo de alimento y por tanto, afectar al grado de afección del estrés por calor en ganado orientación lechera como el número de lactación (p. ej. en vacuno; Bernabucci et al., 2014), el momento de preñez en el que coincide el evento de estrés por calor y la fase de la curva de lactancia (p. ej. Brügemann et al. (2011). Hamzaoui et al. (2013) también han observado esas diferencias en cabras dependiendo de la etapa de la lactación (principio o final).

Uno de los efectos mencionados anteriormente del estrés por calor es la disminución en la ingesta de MS, que está fuertemente relacionada con la producción de leche. Por ejemplo, se estima que, para vacuno de leche, por cada disminución de 1 kg en la ingesta de materia seca, se pierden 2 kg de producción de leche (Atrian y Shahryar, 2012). Sin embargo, la disminución de ingesta de MS no explica toda la caída de rendimiento experimentada por el estrés por calor y los principales estudios dudan si se debe a mayores requisitos de mantenimiento o cambios en el metabolismo energético (Baumgard y Rhoads, 2013). Así se estima que la reducción en ingesta de MS sólo representa aproximadamente el 35 % de la disminución de la producción de leche en vacas estresadas por el calor (Rhoads et al., 2009). Para ovejas, Mahjoubi et al. (2014) consideraron que los efectos directos del calor (no mediados por una reducción de ingesta en MS) son sólo parcialmente responsables del crecimiento reducido en los animales con estrés por calor. Para el ganado caprino, se ha hipotetizado que, por el contrario, toda la reducción en la producción de leche podría ser causada por la caída en el consumo de MS (Hamzaoui et al., 2013).

El estrés por calor también afecta de forma considerable a la calidad del producto ganadero (i.e. carne o leche). El contenido de grasa en la leche se sabe que disminuye en verano (p. ej. Lambertz *et al.*, 2014). Los ácidos grasos (AG) y el contenido de grasa total de la leche dependen de una variedad de factores, como la composición del alimento, especie, la raza, la etapa de lactancia, la paridad y la estación (De la Fuente *et al.*, 2009). Además, la influencia de la temporada no solo se debe a la temperatura, sino también al fotoperíodo (p. ej. Bertocchi *et al.*, 2014). Sevi *et al.* (2002) encontraron que la exposición prolongada a la radiación solar durante el verano en comparación con animales en sombra condujo a cambios en el perfil de AG insaturados (-4 % de AG de cadena larga a corta), niveles reducidos de AG insaturada y un aumento de los AG saturadas (-13 % insaturado respecto a AG saturados). Se ha encontrado también una disminución en el contenido de proteínas en la leche en verano (p. ej. Ramón *et al.*, 2016). Las propiedades de coagulación en la leche también pueden verse afectadas en verano debido al uso de reservas de grasa y N para suministrar energía a través de la gluconeogénesis a expensas de la glándula mamaria y la reducción del contenido de caseína y grasa (p. ej. Abdel-Gawad *et al.*, 2012). La exposición a la radiación solar tiene un efecto perjudicial sobre la calidad higiénica de la leche (Sevi y Caroprese, 2012) y en especial sobre el aumento en el recuento de células somáticas (CCS o RCS) en la leche.

Impactos indirectos sobre la disponibilidad de forrajes y piensos

Concentraciones elevadas de dióxido de Carbono (CO₂)

Existen numerosos estudios que confirman que una mayor concentración de CO₂ atmosférica aumenta el crecimiento y el rendimiento de las

plantas (p. ej. Tubiello *et al.*, 2007). Este aumento se debe principalmente a la estimulación fotosintética en las plantas de tipo C3 y a una mayor eficiencia en el uso del agua a través del cierre de las estomas. En ausencia de otros factores climáticos, los árboles y, sobre todo los arbustos y dicotiledóneas (Dellar *et al.*, 2018) parecen tener una respuesta mayor a concentraciones elevadas de CO₂ en aire. A su vez, en pastos, las leguminosas tienden a mostrar una mayor respuesta productiva a concentraciones elevadas de CO₂ que aquellos con gramíneas (Nowak *et al.*, 2004).

En promedio, el efecto estimulante de duplicar el CO₂ ambiental en pastos conlleva un aumento sobre la biomasa aérea de entre un 15-20 %. Este aumento es aproximadamente la mitad de lo que se podría esperar al considerar la respuesta fotosintética al CO₂ (Nowak *et al.*, 2004). Además, el efecto puede variar ampliamente (0-30 %) dependiendo de la especie, el sistema y las condiciones estacionales. En general, además, parece tener respuestas más altas en pastos durante las estaciones más secas y cálidas (Soussana y Lüscher, 2007).

Comparando entre tipos de plantas, las plantas C3 tienen una mayor respuesta que las plantas C4 a aumentos en la concentración de CO₂ atmosférico (Ainsworth y Long, 2005). Esto se debe a que las plantas C3 tiene un punto de compensación de CO₂ mayor que las C4 y así, las plantas C3 no están saturadas bajo los niveles actuales de CO₂ atmosférico y así, la fotosíntesis se estimula cuando aumenta el CO₂.

A pesar del punto de compensación de CO₂ bajo para las plantas C4, existen varias especies de C4 que muestran respuestas positivas de crecimiento al aumento de CO₂ ambiental utilizando estrategias de mejora en el uso de recursos, por ejemplo, cerrando parcialmente sus estomas y reduciendo la transpiración de la planta. En regiones húmedas esta estrategia puede ser problemática ya que esa reducción en la transpiración de la planta se tra-

duce en un mayor riesgo a sufrir fenómenos de escorrentías (Betts et al., 2007).

El alcance del efecto de la fertilización con CO₂ en el crecimiento de las plantas y el aumento de la producción de biomasa aún no está claro (p. ej. Tubiello et al., 2007). Esta incertidumbre proviene de los muchos y complejos procesos que interactúan en el sistema suelo-agua-planta y que pueden influir en la respuesta a largo plazo de los pastos a un aumento gradual de CO₂ en la atmósfera. Por ejemplo, la temperatura. En pastos dominados por raigrás, Casella et al. (1996) mostraron que altos niveles de CO₂ atmosférico pueden mejorar los rendimientos en ambientes entre 14,5 °C y 18,5 °C, pero tener efectos negativos por encima de 18,5 °C.

Respecto al efecto de la concentración de CO₂ atmosférica elevada sobre la calidad del pasto, existen diferentes meta-análisis (p. ej. Dumont et al., 2015; Dellar et al., 2018) que han concluido que una elevada concentración de CO₂ en la atmósfera tiende a disminuir el contenido proteico en hoja y aumentar el total de carbohidratos no estructurales (carbohidratos solubles) y el contenido de almidón, y sin efecto significativo sobre la digestibilidad.

Para los pastos dominados por especies C3, un CO₂ mayor en la atmósfera parece hacer disminuir la concentración de proteína en las plantas no leguminosas (p. ej. Myers et al., 2014). No obstante, teniendo en cuenta que bajo estas condiciones de CO₂ ambiental también se favorece el crecimiento en leguminosas, esta posible bajada en contenido en proteína en las plantas C3 se vería compensada en las praderas mixtas con leguminosas (Thornton et al., 2009).

Temperatura

El rango de temperaturas óptimas para el crecimiento de los pastos depende del tipo de especies de plantas. Para las especies C3, el cre-

cimiento mínimo ocurre por debajo de 6 °C, con un rango de temperatura óptimo para el crecimiento entre 20-25 °C para especies templadas frías (por ejemplo, raigrás perenne) y ligeramente más alto (20-28 °C) para especies templadas cálidas. Mientras que la mayoría de las especies pascícolas no pueden vivir a temperaturas muy altas, se han descrito algunas leguminosas que pueden sobrevivir a temperaturas muy altas (>250 °C), (Ward, 1995).

En comparación, las especies C4 (por ejemplo, maíz o *paspalum*) son más adecuadas para temperaturas más altas, con rangos óptimos entre 29 °C y 35 °C.

El efecto general de las altas temperaturas, sin embargo, depende de las interacciones con otros factores, especialmente la disponibilidad de agua. Por ejemplo, en latitudes medias a altas de Europa y en regiones montañosas, se espera que el aumento de las temperaturas tenga un efecto positivo en la producción de plantas (p. ej. Dumont et al., 2015). Por el contrario, el sur de Europa experimentará una reducción en rendimientos de forraje de hasta un 30 % en algunas áreas. Esta reducción se debe a una combinación de temperaturas muy altas y reducciones en la precipitación general, especialmente durante los meses más cálidos, y una mayor variabilidad interanual (Dumont et al., 2015).

El aumento de las temperaturas tiende a reducir la disponibilidad de nutrientes en las plantas, particularmente el contenido de N (p. ej. Dumont et al., 2015). Respecto otros parámetros de calidad nutricional en plantas C3, por ejemplo, tanto la digestibilidad como el contenido en carbohidratos solubles en agua parecen reducirse con temperaturas más altas (Thornton et al., 2009). Este efecto no se ha registrado en especies C4 (Dumont et al., 2015).

Disponibilidad hídrica

Una menor disponibilidad de agua se prevé disminuirá la respiración de la planta, su ac-

tividad metabólica y promoverá una disminución en su productividad. Por ejemplo, en la zona Mediterránea, la menor lluvia y más altas temperaturas afectará negativamente en la productividad de sus sistemas ganaderos ligados a pastos en extensivo (p. ej. en dehesas: Iglesias et al., 2016). En las próximas décadas, estas condiciones serán más frecuentes en Europa, ya que se espera que aumente la duración de los períodos secos, especialmente en la región sur (Hopkins y Del Prado, 2007).

Un suelo anegado después de eventos extremos de precipitación disminuye la fotosíntesis neta y el crecimiento. Como también se prevé que las lluvias sean más intensas, el riesgo de inundaciones en ciertas áreas aumentará afectando a los rendimientos en praderas muy especialmente en inundaciones producidas en invierno (p. ej. Morris et al., 2010).

De cualquier forma, la respuesta final en los pastos dependerá fundamentalmente de las interacciones y los efectos combinados y simultáneos de todas las variables climáticas. Por ejemplo, aunque se prevé que la precipitación media anual aumente en muchas regiones de Europa, las temperaturas más cálidas y períodos secos más largos podrían contribuir a reducir la humedad del suelo debido al aumento de la evapotranspiración y así, contrarrestar en cierta medida el efecto positivo de una mayor pluviosidad sobre la productividad en las plantas (Picon-Cochard et al., 2014). La disponibilidad de agua también puede limitar la potencial mejora de productividad con el aumento de la concentración atmosférica de CO₂ (Picon-Cochard et al., 2014).

Disponibilidad de nutrientes

Cualquier escenario favorable para una mayor productividad en las plantas requiere de nutrientes suficientes. Así, los pastos fertilizados con N tienen una mayor productividad cuando aumenta el CO₂ atmosférico, pero

tienen una respuesta escasa o insignificante cuando el N es limitante en el suelo (Nowak et al., 2004).

Ha habido diferentes experimentos que han demostrado que los niveles elevados de CO₂ atmosférico generalmente conducen a un contenido reducido de N en las especies forrajeras (Dumont et al., 2015) y favorecen a las especies que fijan N₂ (es decir, a las leguminosas) sobre las especies no fijadoras (Grünzweig y Dumbur, 2012), pero también puede aumentar la capacidad de absorción de nutrientes al mejorar el crecimiento de las raíces de las plantas C3 y las asociaciones con micorrizas (p. ej. Sardans y Peñuelas, 2013).

El calentamiento global, con su pérdida en humedad del suelo, se espera limitará la actividad microbiana, y así las tasas de mineralización de la materia orgánica y su consiguiente efecto positivo en el crecimiento de las plantas (Luo et al., 2004).

Se espera que las lluvias torrenciales se vuelvan más intensas y se vean interrumpidas por períodos secos más largos, lo que aumentaría el riesgo de erosión del suelo y podría conducir a una mayor lixiviación de nutrientes (Kipling et al., 2016).

El clima más cálido y seco previsto en el área mediterránea afectará el ciclo de nutrientes del suelo y otros servicios de los ecosistemas. Las plantas en ambientes mediterráneos ya tienen de por sí un contenido de nutrientes bajo (Sardans y Peñuelas, 2013) y el fósforo es a menudo un factor limitante, particularmente para las leguminosas (Soussana et al., 2010).

Diversidad en la composición botánica

Los pastos, a menudo, se caracterizan por ser botánicamente diversos (p. ej. pastos herbáceos seminaturales). Se prevé que los cambios en las variables climáticas afectarán la dinámica y la composición de las especies de plantas, con consecuencias para los patrones es-

tacionales de crecimiento de pasturas y valor nutritivo. Los resultados de los experimentos de manipulación de la lluvia en sistemas de praderas en clima templado, con diversidad de especies más reducida que en pastos naturales o seminaturales, mostraron que, en condiciones de sequía moderada, las praderas que contenían mezclas de diferentes especies tuvieron mayores rendimientos que los que usaban sólo una especie. Este efecto se atribuyó a las interacciones positivas entre especies leguminosas y no leguminosas que conducen a un mejor acceso al agua desde niveles más profundos y a una menor vulnerabilidad a las limitaciones de N del suelo (p. ej. Picon-Cochard et al., 2014).

También se espera que la proporción de dicotiledóneas aumente, particularmente después de sequías severas (Dumont et al., 2015). Si bien algunos estudios han encontrado que estos cambios en la composición de las especies después de una sequía pueden ser reversibles y durar solo unos años antes de volver a su estado original (Trnka et al., 2011), en general, sí se ha visto que el cambio climático puede producir cambios importantes en la composición botánica de las praderas (Dumont et al., 2015).

La predicción es que, aunque la concentración elevada de CO₂ en la atmósfera mejorará los rendimientos potenciales en especies C3 sobre las especies C4, se espera que las especies C4 prosperen en comparación con las especies C3 en condiciones más cálidas.

En las áreas mediterráneas, la composición de las comunidades vegetales en pastos se espera pueda sufrir cambios importantes y de manera puntual, extinciones locales. El estudio de Rubio y Roig (2017), por ejemplo, hace una revisión de las principales áreas más sensibles a estos cambios en relación con la ganadería extensiva en España.

En la zona Mediterránea las especies de pasto y forraje sobreviven generalmente al verano

seco como semillas latentes (Ooi et al., 2012). Ooi et al. (2012) encontraron que mientras que el aumento de la temperatura media no tuvo efecto sobre la latencia de las semillas, las condiciones futuras con un mayor incremento de olas de calor podrían aumentar significativamente la pérdida de latencia, especialmente en las semillas de poblaciones más frías y en zonas más elevadas.

Los eventos extremos también pueden desempeñar un papel crucial en la composición de la comunidad vegetal de algunos hábitats particulares. Mientras que en climas fríos (p. ej., boreales, alpinos) las temperaturas muy bajas ayudan a las especies resistentes a las heladas a evitar la invasión del hábitat de plantas competidoras (Körner et al., 2003); en áreas cálidas y húmedas, el aumento en la frecuencia de los períodos secos puede mejorar el desarrollo de pastos C4 tolerantes al calor y la sequía. También se prevé que aumente el riesgo de incendios forestales, como ya hemos comentado antes, particularmente en el sur de Europa, cuando las olas de calor se combinan con las condiciones de sequía. La tierra quemada es más vulnerable a la erosión, lo que conduce a una mayor pérdida de suelo. En tales condiciones, la supervivencia de las plantas en las praderas dependerá de las especies de plantas.

En las áreas mediterráneas, las especies forrajeras perennes tolerantes a la sequía podrían ser muy útiles en sistemas donde las especies anuales alcanzan la senescencia a finales de la primavera. Sin embargo, muy pocas especies perennes pueden superar el clima mediterráneo de verano. Las características deseadas de estas especies (p. ej. *Festuca arundinacea*) deben incluir la latencia o bajo crecimiento durante el verano y la alta eficiencia del uso del agua durante la temporada de crecimiento. Hay leguminosas anuales y perennes que se adaptan mejor a las condiciones mediterráneas. Las más prometedoras han sido las especies de tréboles y mielgas

anuales de zonas mediterráneas (Porqueddu et al., 2016). Entre las leguminosas perennes, la alfalfa es muy conocida por su tolerancia a la sequía y es valorada en muchos sistemas agrícolas por su capacidad de producir forraje durante los meses más cálidos (Porqueddu et al., 2016). Todavía, de cualquier manera, se necesitaría cultivar variedades más productivas para poder tener sistemas enteramente basados en la alfalfa de secano (Ovalle et al., 2015). Otras leguminosas perennes interesantes, que pueden escapar de la sequía del verano a través de la latencia y luego volver a crecer en otoño, son la *Sulla* sp. y *Onobrychis viciifolia* (p. ej. Re et al., 2014).

Ozono

Aunque las emisiones de precursores de ozono (O₃) están disminuyendo en Europa (Tubiello et al., 2007), se prevé que las concentraciones europeas de O₃ aumenten en el futuro debido a las emisiones en otras partes del mundo y que los daños económicos anuales mundiales por esta problemática crezcan considerablemente (Sampedro et al., 2020). El efecto del O₃ en los pastos herbáceos es muy difícil de estimar, ya que depende de las especies de plantas, el nivel de diversidad, las prácticas de manejo, las condiciones del lugar, etc. (Hopkins y Del Prado, 2007). Varios experimentos han encontrado que los tréboles tienden a sufrir particularmente más que las gramíneas, lo que llevaría a producir cambios en la composición del pasto en condiciones con más ozono en la atmósfera (ICP Vegetation, 2011). La exposición al ozono puede causar daños visibles a las especies forrajeras, así como aumentar su sensibilidad a las plagas y patógenos, provocando una reducción en la calidad y cantidad del forraje producido (ICP Vegetation, 2011). Aunque el O₃ puede reducir el efecto positivo del CO₂ elevado en el rendimiento de la planta, el aumento del CO₂ parece evitar parte del im-

pacto perjudicial del O₃ en la vida vegetal, sobre todo a temperaturas medias o bajas (ICP Vegetation, 2011).

El sur de Europa tiende a tener mayores concentraciones de O₃ que el norte y, en consecuencia, se espera que su vida vegetal sufra más daños (ICP Vegetation, 2011). Ya, las concentraciones de O₃ en primavera y verano a menudo superan los umbrales de fitotoxicidad de la vegetación y se han observado daños considerables (ICP Vegetation, 2011). La sequía tiende a reducir los impactos negativos del O₃ en la vida vegetal, por lo que puede ser que el daño por O₃ en el sur de Europa sea mayor en primavera que en verano, cuando las sequías son menos comunes (ICP Vegetation, 2011).

Adaptación

Dado que el cambio en las condiciones climáticas es ya inevitable, es imprescindible tomar medidas para adaptarse a las nuevas condiciones. Las estrategias de adaptación al cambio climático se pueden agrupar en aquellas relacionadas con (1) manejo general, (2) selección genética y adopción de razas resistentes al calor tanto en animales como variedades en plantas, (3) cambios nutricionales, (4) estrategias sobre producción de forrajes y utilización de nuevas fuentes de alimentación y (5) cambios estructurales.

Manejo general

La protección física con sombra artificial o natural es una de las medidas más rentables para hacer frente al efecto del estrés por calor en el bienestar animal. Se pueden construir cobertizos, asombrar edificios, colocar sombreros que facilitan la disipación de calor o favorecer el movimiento de ganado a otras fincas o pastos (i. e. trashumancia). La plan-

tación de árboles forrajeros en zonas de pastoreo (introducción del silvopastoralismo) puede proporcionar alimento además de refugio durante el verano (Mosquera-Losada et al., 2005). Se ha demostrado que mantener recintos al aire libre mantiene un rendimiento de leche más alto en comparación con la cría en interiores de ovejas lactantes (Casamassima et al., 2001).

El enfriamiento por evaporación y un régimen de ventilación adecuado también pueden ser efectivos para reducir las condiciones de estrés por calor. La orientación del edificio también es importante, de este a oeste es mejor que de norte a sur. Las dimensiones de establo, en particular el ancho, son críticas para el movimiento del aire, minimizando el gradiente de temperatura interior a exterior y maximizando la pérdida de calor debido a la convección.

Para los sistemas más intensivos, p. ej. vacuno de leche, estudios recientes han testado a diferentes niveles cómo los alojamientos también pueden adaptarse para favorecer la ventilación natural mediante aperturas para controlar las corrientes de aire. Para eso hay que tener en cuenta los vientos dominantes en verano u obstáculos del entorno que los bloqueen.

También se ha demostrado que la ventilación, p. ej. en ovejas, puede ayudar a una disminución de las bacterias psicotrópicas y coliformes totales y RCC o CCS en la leche en comparación con aquellos sistemas sin ventilación (Albenzio et al., 2005).

Selección genética y adopción de razas resistentes al calor

Las razas que se originan en áreas tropicales y áridas, se consideran los rumiantes más eficientes en condiciones de estrés por calor (más adaptativas) y más resistentes, en parte debido a su baja masa corporal y bajos re-

querimientos metabólicos, lo que les permite minimizar su ingesta de agua y requisitos de mantenimiento. Las razas de pequeños rumiantes mediterráneos, por ejemplo, son más tolerantes al estrés por calor que otras razas en Europa. Sin embargo, el efecto del estrés por calor en diferentes razas ha demostrado ser bastante variable y dependiente de muchas otras variables de manejo. En general, se ha demostrado que la selección artificial para aumentar la producción de leche reduce la tolerancia al calor en ovejas lecheras (Finocchiaro et al., 2005, Ramón et al., 2016) y en cabras lecheras (Menéndez-Buxadera et al., 2016), lo que respalda la idea de que la selección de animales de alto rendimiento que son menos sensibles al estrés térmico no parece fisiológicamente plausible. Este es el caso más evidente para vacas de leche, el número de razas de vacas lecheras utilizadas a nivel global se ha reducido drásticamente, tomando un gran protagonismo la raza 'Frisona' en todas sus variantes. Esta raza presenta una altísima ventaja competitiva en cuanto a producción de leche frente a otras razas más rústicas, pero, a su vez, esto se convierte en un inconveniente en cuanto a su capacidad de afrontar una situación de estrés térmico. Así, las razas más rústicas, o sus cruces con las razas hiper-productivas más extendidas puede ser un camino para mejorar la capacidad intrínseca de los animales para afrontar retos climáticos.

Se pueden desarrollar adaptaciones en forrajes y otro tipo de plantas a largo plazo a través de mejoramiento genético. El cambio climático y su afección hace que se requieran nuevos recursos forrajeros que se adapten a temperaturas más altas, sequía y aumento de CO₂ (Hopkins y del Prado, 2007). Esto podría lograrse mediante la explotación de rasgos para la tolerancia a la deshidratación y la latencia estival, ya sea en especies nuevas o para introducir rasgos en gramíneas y leguminosas ampliamente utilizados (Volaire et

al., 2009). Las estrategias de mejora genética en plantas en relación a la ganadería de rumiantes, como no puede ser de otro modo, dependen en gran medida de la zona agroclimática de estudio. Habrá zonas donde se requiera plantas adaptadas sólo a sequía muy prolongada (p. ej. el Mediterráneo) u otras zonas, p. ej. Atlántico, donde se necesitará variedades de forrajes que puedan tolerar la sequía y eventos extremos de lluvias que desencadenan inundación.

Manejo nutricional

Un animal con un mal estado nutricional será más susceptible al estrés ambiental de todo tipo. Esto es particularmente relevante para los sistemas basados en pastoreo, donde el pastoreo reducido de animales a temperaturas más altas puede requerir provisión de alimento suplementario. El manejo nutricional implica: tiempos e intervalos de alimentación alterados, el uso de dietas de alta densidad energética, dietas bajas en fibra, degradabilidad reducida del rumen, alimentación estratégica, el uso de suplementos e ingredientes de alimentación que ayudan a reducir consumo de agua (Al-Dawood, 2017). Para los sistemas de pequeños rumiantes que dependen en gran medida del pastoreo, el cambio climático en Europa requerirá que los ganaderos se enfrenten a una mayor variabilidad inter e intra-anual en la dinámica de la calidad y disponibilidad del forraje. En áreas lluviosas, la capacidad de manipular la cantidad y calidad del forraje mediante el manejo del pastoreo, su conservación, la fertilización y el uso de forrajes sembrados serán muy importantes. Para las zonas más secas del sur, será más apropiado ajustar la coincidencia entre la demanda y el suministro de nutrientes estacionales mediante la manipulación del estado fisiológico del animal o mediante diferentes patrones de movilidad (Grings et al., 2016).

Estrategias sobre producción de forrajes y utilización de nuevas fuentes de alimentación

Se estima que la pérdida de producción forrajera tendrá que ser compensada con una mayor compra de concentrados, el establecimiento del uso de rotaciones de cultivos anuales más apropiados a las nuevas condiciones climáticas, incluyendo rotaciones de cultivos con leguminosas (Hopkins y Del Prado, 2007), un mayor aprovechamiento de los subproductos de la agroindustria y residuos de cultivos o/y el uso de forrajes alternativos. Entre las estrategias generales que son aplicables a todas las regiones, aumentar las praderas mixtas de leguminosas y gramíneas es una buena medida para adaptarse a la posible escasez de fuentes de proteínas a nivel global en Europa, o para enfrentar la disminución esperada del contenido de proteínas y la digestibilidad de los pastos C3 en plantas leguminosas en condiciones de cambio climático (Hopkins y Del Prado, 2007). Esto también se aplicaría a un aumento de las leguminosas de grano para la suplementación de forrajes (Iannetta et al., 2016). La estrategia de utilizar subproductos de la industria alimentaria puede mejorar la eficiencia del uso de los recursos de estos sistemas. Se pueden utilizar diferentes subproductos de las actividades agrícolas, forestales, agroindustriales y de bioenergía para alimentar a los rumiantes como respuesta adaptativa a las limitaciones estacionales del suministro de forraje. Así, existen diferentes subproductos (por ejemplo, harina de camelina, subproductos de tomate) que actualmente están subutilizados pero que podrían utilizarse como alimento para sistemas de producción de productos lácteos orgánicos y de bajos insumos. Estos subproductos varían en su disponibilidad geográfica, valor nutricional, su efecto sobre el metano ruminal y la excreción de N y tienen desafíos relacionados con la logística (Del Prado et al., 2020).

Cambios estructurales

Existen numerosas evidencias que sugieren que los sistemas ganaderos de bajos inputs (p. ej. pastoreo de rumiantes en extensivo), a pesar de presentar una alta vulnerabilidad a nivel económica, tienen una alta capacidad adaptativa frente al cambio climático. Considerando las limitaciones que el Cambio Climático ejerce sobre la producción de alimentos, los sistemas extensivos utilizan recursos de tierras marginales menos productivas y, por lo general, recursos subutilizados (matorrales, tierras boscosas) y son sistemas más resilientes y adaptados a temperaturas altas, escasez de agua, menor calidad de la dieta y enfermedades (Bernués *et al.*, 2011). Generalmente, además, ayudan a reducir el riesgo de incendios y aumentan o ayudan a mantener niveles elevados de materia orgánica en el suelo, con el consiguiente efecto positivo sobre la retención de agua en el suelo y aumento de sumideros de carbono (Del Prado y Manzano, 2020).

Ejemplos de impactos y adaptación a nivel de granja usando modelos a escala de explotación

La utilización de modelos matemáticos a nivel de explotación nos puede ayudar a simular escenarios de cambio climático futuro y analizar el efecto que tendrán estas diferentes condiciones climáticas sobre las granjas de rumiantes. En esta línea, utilizando los modelos para vacuno de leche (SIMS_{DAIRY}; Del Prado *et al.*, 2011) y pequeños rumiantes (SIMS_{SR}; Del Prado *et al.*, 2019) (más detalle sobre los modelos en complemento 2) podemos estudiar e ilustrar ejemplos sobre el impacto sobre la viabilidad de la granja a través de cambios en la productividad en las plantas y animales. Así, vemos que explotaciones con diferentes ubicaciones y bajo diferentes

regímenes climáticos sufrirán cambios desiguales en la productividad de alimentos propios para el ganado y rendimientos en leche y carne dependiendo de las diferentes zonas de estudio y segmentos de tiempo.

Para el sur de Europa, los resultados modelados usando SIMS_{SR} muestran que para sistemas extensivos/semi-extensivos de ovino de carne podemos esperar reducciones en el forraje disponible y en la producción de cereales para grano y paja (especialmente en sistemas de secano), lo que los hará más dependientes de la alimentación externa (suponiendo que no haya disponibilidad de más tierras en la zona). Utilizando como ejemplo un sistema de cría de carne de ovino ubicado en Aragón (noreste de España) (raza Rasa Aragonesa), en la cuenca del río Ebro, y analizando diferentes escenarios (actual: 1991-2020, 2021-2050, 2051-2080, 2081-2100) encontramos que la reducción de los rendimientos en pastos y cereales combinada con el efecto del estrés por calor en los animales requeriría la compra de aproximadamente 50-60 % y 10-30 % más forrajes y concentrados que el uso actual, respectivamente (Figura 4).

Para los sistemas de producción más intensivos, ejemplo del vacuno de leche, los impactos directos por estrés por calor sobre la productividad de los animales se esperan sean bastante altos, reflejándose de forma importante en la viabilidad de la explotación. Comparando mediante el modelo SIMS_{DAIRY} los potenciales impactos del cambio climático en 2 granjas típicas en Europa, una en el Mediterráneo (Valencia) y otra en el Este de Alemania, y haciendo un análisis económico se observó en ambos casos pérdidas económicas importantes (Tabla 1), sobre todo en los escenarios de futuro de referencia IPCC más pesimistas (RCP 4,5 y 8,5; RCP de las siglas en inglés: *Representative Concentration Pathways*) y más avanzados en el tiempo (largo plazo: cercanos al año 2100). Sin embargo, las

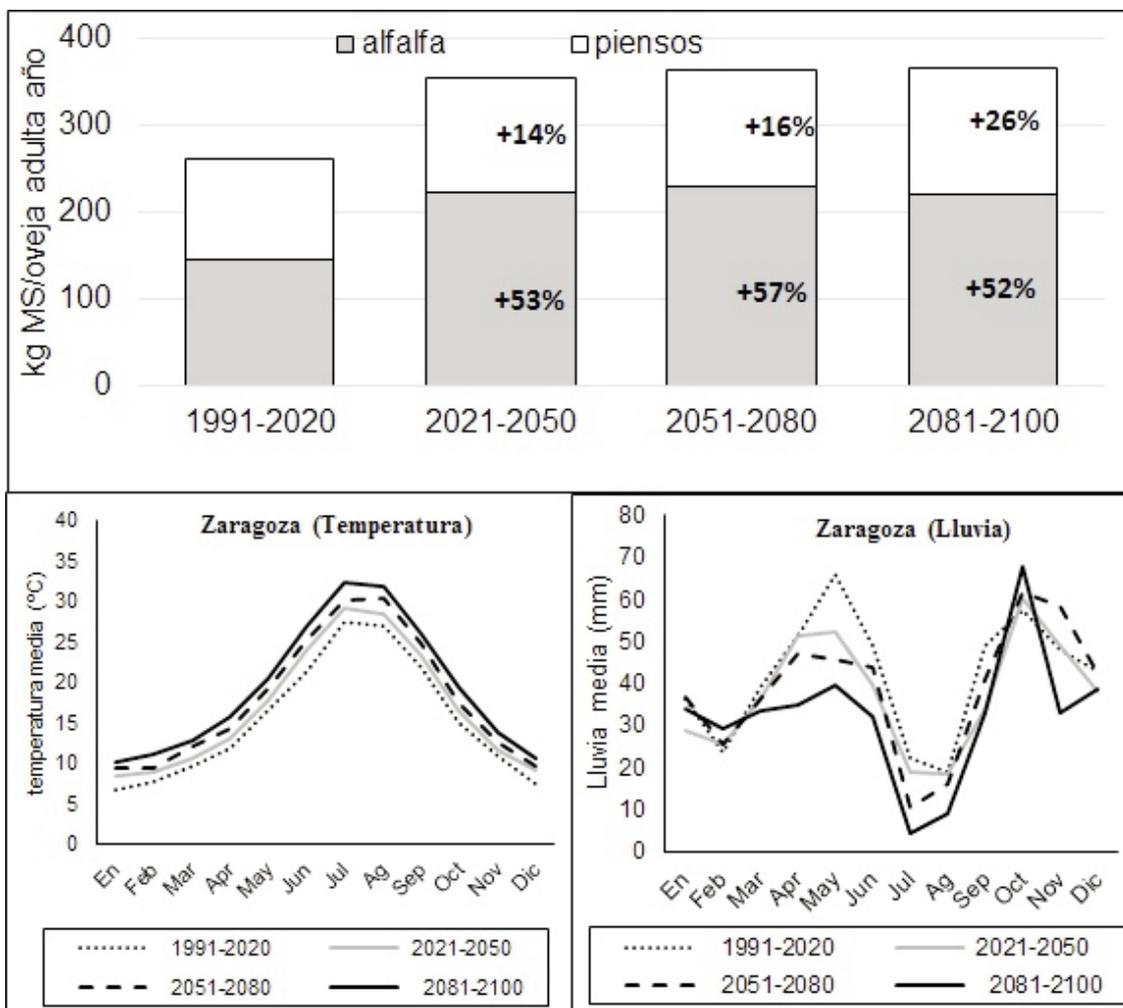


Figura 4. Efecto del cambio climático sobre la necesidad de compra de forrajes y piensos en una explotación típica de ovino de carne semi-extensivo en Aragón (España). Datos simulados usando el modelo de explotación SIMS_{SR} (Del Prado et al., 2019).

Figure 4. Climate change effect on the amount of purchased forage and concentrates needs for a typical semi-extensive sheep farm for meat in Aragon (Spain). Data obtained from simulations using the SIMS_{SR} whole-farm model (Del Prado et al., 2019).

pérdidas económicas simuladas fueron mucho más severas en la granja situada en el Mediterráneo, con un clima más cálido, así alcanzando reducciones en producción de leche de hasta un 50 % para los meses más cálidos a largo plazo de RCP 8,5.

Una de las estrategias más útiles en sistemas intensivos para reducir la incidencia del estrés por calor en los rumiantes es el ajuste de la densidad energética de la dieta en los períodos más cálidos/severos. Así, por ejemplo, para una explotación de ovino de raza man-

Tabla 1. Pérdida mensual de producción de leche simulada usando SIMS_{DAIRY} durante los meses de verano en granjas de Alemania del Este y Mediterráneo (Valencia) (\$/mes vaca, % respecto al óptimo sin cambio climático).

Table 1. Monthly milk loss during summer months as simulated by SIMS_{DAIRY} for East Germany and Mediterranean (Valencia) dairy farms (\$/month cattle, % in relation to an optimum scenario without climate change).

Localización	Mes	Corto plazo		Medio plazo		Largo plazo	
		\$/mes	%	\$/mes	%	\$/mes	%
Alemania del Este	Junio	2-12	1-3	1-5	0-1	0-106	0-6
	Julio	13-28	4-7	9-33	2-4	27-1335	4-8
	Agosto	9-18	3-5	20-24	3-4	17-51	2-7
Mediterráneo (Valencia)	Junio	5-8	2-2	9-49	2-7	11-389	1-27
	Julio	18-90	5-23	135-206	23-24	53-1150	6-52
	Agosto	31-100	8-25	100-332	16-38	156-993	18-45
	Septiembre	16-53	4-1	30-295	5-32	102-604	11-26
	Octubre	0-1	0-7	1-71	2-4	3-373	4-8

chega en España se vio que sin adaptación las pérdidas podían ser de más del 20 % en producción de leche en los días más calurosos (Pardo et al., 2019). Una alimentación con mayor densidad energética ayudó a mejorar parte del efecto del estrés por calor en la ingesta de MS y la productividad de la leche. Los resultados agregados en las semanas más calurosas indican que los animales bajo estrés por calor produjeron una reducción de aproximadamente el 11 % en el rendimiento de la leche y un consumo adicional de 0,12 kg de MS requerido por 1 L de leche producida. Para el escenario con una dieta de mayor densidad energética, la reducción en la producción de leche fue pequeña (alrededor del 2 %) en comparación con el escenario sin considerar el estrés por calor. No obstante, esta estrategia de adaptación (incremento en la ingesta de piensos y concentrados), puede tener efectos negativos en relación al impacto de la explotación sobre producción de gases de efecto invernadero (GEI). Si bien

el uso de piensos puede hacer reducir las emisiones de metano (CH₄) ruminal, a nivel de emisiones de GEI netas el efecto puede ser negativo. Si usamos soja, teniendo en cuenta todo el ciclo de producción de un producto animal, las emisiones se incrementan debido al mayor impacto en GEI en la producción y transporte de la soja en comparación con las emisiones de GEI generadas si el forraje hubiera sido producido dentro de la explotación (más detalles en complemento 3). La clave estará en el tipo de ingredientes de alta densidad energética utilizados. Una buena estrategia, como ya se ha mencionado antes, sería usar subproductos de la industria alimentaria. Dicha estrategia promovería una economía circular, mejoraría la eficiencia en el uso de los recursos de los sistemas involucrados y disminuiría la competencia por los recursos alimenticios comestibles para humanos. La inclusión de este tipo de alimento puede limitar la volatilidad del precio del alimento y garantizar un rendimiento justo

para los productores y un entorno propicio para la inversión. En Europa se estima que si todos los subproductos estuvieran disponibles para pequeños rumiantes, algunos países como España e Italia, podrían satisfacer buena parte de sus necesidades energéticas del ganado ovino y caprino con estos alimentos (Del Prado et al., 2019). Por ejemplo, los subproductos de tomate y aceituna están ampliamente disponibles en países mediterráneos como España. Para los sistemas de cabras lecheras en España, se ha encontrado que estos subproductos son una buena alternativa de forraje y su inclusión en la dieta de la cabra reduciría el requerimiento de compras de forraje y además conduciría a una menor huella de C (reducciones de aproximadamente 12-18 %) (Pardo et al., 2016).

La mejora genética para conseguir animales más resistentes al estrés térmico y productivos puede conducir a una reducción de los requerimientos de nutrientes necesarios para alcanzar el mismo nivel de producción. Como ejemplo de simulación teórica utilizando el modelo SIM_{SR} para sistemas intensivos de ovejas lecheras 'Chios' sujetos al cambio climático 2050 en Grecia, esquemas de mejoramiento teórico que podrían mejorar la tolerancia térmica en ± 10 % darían como resultado una caída en los requisitos de alimentación de aproximadamente 21 % para producir la misma leche. Esta mayor eficiencia también conduciría a una reducción de la huella de C (mitigación del cambio climático) y otras pérdidas de contaminantes ambientales (Del Prado et al., 2020) (más información en complemento 3).

Conclusiones

Los cambios venideros en las condiciones climáticas tienen efectos en la producción de rumiantes que han de tenerse en cuenta para buscar estrategias de adaptación viables y

contextualizadas a cada tipo de sistema de forma integrada. Existe numerosa experimentación que pone de manifiesto cambios a nivel de animal, en cuanto a su respuesta, pero también cambios en la producción de la alimentación del ganado. Con estos estudios y la ayuda de herramientas de simulación a diferentes niveles (p. ej. escala explotación como hemos mostrado en este estudio), se pueden trazar estrategias de adaptación ante este reto al que el sector se ve ya afectado en los últimos años. Para ello, es fundamental una planificación conjunta que englobe el manejo de la explotación en general, pero también, sobre todo en sistemas más intensivos, la búsqueda de genotipos más resistentes a los cambios que se predicen, así como su adaptación a cambios nutricionales. La planificación de una estrategia alimentaria en el caso de los rumiantes es clave, desde el punto de vista de disponibilidad de pasto, estrategias sobre la producción de forrajes, así como la apuesta por el uso de fuentes de alimentación como subproductos de la industria agroalimentaria que reduzcan los riesgos de cambios interanuales ambientales en la producción de forrajes, que repercutirán en riesgos interanuales en la viabilidad económica de las explotaciones con efectos en su sostenibilidad a largo plazo. Además, dentro de los diferentes sistemas de producción, la ganadería de rumiantes de bajos inputs (p. ej. ganadería extensiva ligada a pastos) debiera ser protegida dentro de las políticas climáticas y de desarrollo rural por su mayor capacidad de aportar co-beneficios climáticos adicionales en forma de servicios ecosistémicos.

Material complementario

El material complementario de este artículo se puede consultar en la URL: <https://doi.org/10.12706/itea.2020.038>

Agradecimientos

La investigación del BC3 cuenta con el apoyo del Gobierno español a través de la acreditación de excelencia María de Maeztu 2018-2022 (Ref. MDM-2017-0714) y del Gobierno Vasco a través del programa BERC 2018-2021. Este trabajo también fue apoyado por el proyecto Horizon2020 SFS-01c-2015 titulado "Innovación de producción sostenible de ovejas y cabras en Europa (iSAGE)" (número de subvención 679302) y OPTIBARN (618105 FACCE Era Net Plus – Food Security, Agriculture, Climate Change ERA-NET plus –JPI). Agustín del Prado está financiado por el programa Ramón y Cajal del Ministerio de Economía, Industria y Competitividad de España (RYC-2017-22143). Elena Galán está financiada por el programa Juan de la Cierva 2016 (FJCI-2016-30263) del Ministerio de Economía, Industria y Competitividad.

Referencias bibliográficas

- Abdel-Gawad AR, Hamzaoui S, Salama AAK, Caja G, Guamis B, Castillo M (2012). Light backscatter evaluation of milk coagulation properties in dairy goats supplemented with soybean oil under heat stress conditions. Book of Abstracts of the XI International Conference on Goats, 24-27 Septiembre, Gran Canarias, España, pp. 275.
- Ainsworth EA, Long SP (2005). What have we learned from 15 years of free-air CO₂ enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO₂. *New Phytologist* 165: 351-372. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2004.01224.x>
- Albenzio M, Santillo A, Caroprese M, Marino R, Centoducati P, Sevi A (2005). Effect of different ventilation regimens on ewes' milk and Canestrato Pugliese cheese quality in summer. *Journal of Dairy Research* 72(4): 447-455. <https://doi.org/10.1017/S0022029905001305>
- Al-Dawood A (2017). Towards heat stress management in small ruminants - a review. *Annals of Animal Science* 17: 59-88. <https://doi.org/10.1515/aoas-2016-0068>
- Atrian P, Shahryar HA (2012). Heat stress in dairy cows. A review. *Research in Zoology* 2: 31-37. <https://doi.org/10.5923/j.zoology.20120204.03>
- Barnes A, Beatty D, Taylor E, Stockman C, Maloney S, McCarthy M (2004). The efficacy of electrolyte replacement therapy. En: *Physiology of heat stress in cattle and sheep*, pp. 16-18. Meat and Livestock Australia. North Sydney, Australia.
- Baumgard LH, Rhoads RP (2013). Effects of heat stress on postabsorptive metabolism and energetics. *Annual Review of Animal Biosciences* 1: 311-337. <https://doi.org/10.1146/annurev-animal-031412-103644>
- Bernabucci U, Lacetera N, Baumgard LH, Rhoads RP, Ronchi B, Nardone A (2010). Metabolic and hormonal acclimation to heat stress in domesticated ruminants. *Animal* 4: 1167-1183. <https://doi.org/10.1017/S175173111000090X>
- Bernabucci U, Biffani S, Buggiotti L, Vitali A, Lacetera N, Nardone A (2014). The effects of heat stress in Italian Holstein dairy cattle. *Journal of Dairy Science* 97: 471-486. <https://doi.org/10.3168/jds.2013-6611>
- Bernués A, Ruiz R, Olaizola A, Villalba D, Casasús I (2011). Sustainability of pasture-based livestock farming systems in the European Mediterranean context: Synergies and trade-offs. *Livestock Science, Special Issue: Assessment for Sustainable Development of Animal Production Systems* 139: 44-57. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2011.03.018>
- Bertocchi L, Vitali A, Lacetera N, Nardone A, Varisco G, Bernabucci U (2014). Seasonal variations in the composition of Holstein cow's milk and temperature-humidity index relationship. *Animal* 8: 667-674. <https://doi.org/10.1017/S1751731114000032>
- Betts RA, Boucher O, Collins M, Cox PM, Falloon PD, Gedney N, Hemming DL, Huntingford C, Jones CD, Sexton DMH, Webb MJ (2007). Projected increase in continental runoff due to plant responses to increasing carbon dioxide. *Nature* 448: 1037-1041. <https://doi.org/10.1038/nature06045>

- Brown DL, Morrison SR, Bradford GE (1988). Effects of ambient temperature on milk production of Nubian and Alpine goats. *Journal of Dairy Science* 71: 2486-2490. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(88\)79835-5](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(88)79835-5)
- Brügemann K, Gernand E, von Borstel UU, König S (2011). Genetic analyses of protein yield in dairy cows applying random regression models with time-dependent and temperature × humidity-dependent covariates. *Journal of Dairy Science* 94: 4129-4139. <https://doi.org/10.3168/jds.2010-4063>
- Casamassima D, Sevi A, Palazzo M, Ramacciato R, Colella GE, Bellitti A (2001). Effects of two different housing systems on behaviour, physiology and milk yield of Comisana ewes. *Small Ruminant Research* 41(2): 151-161. [https://doi.org/10.1016/S0921-4488\(01\)00201-2](https://doi.org/10.1016/S0921-4488(01)00201-2)
- Casella E, Soussana JF, Loiseau P (1996). Long-term effects of CO₂ enrichment and temperature increase on a temperate grass sward. *Plant and Soil* 182(1): 83-99. <https://doi.org/10.1007/BF00010998>
- Collier RJ, Hall LW, Rungruang S, Zimbleman RB (2012). Quantifying heat stress and its impact on metabolism and performance. *Proceedings 23rd Annual Ruminant Nutrition Symposium*, 31 enero y 1 de febrero, Gainesville, Florida. pp. 74.
- De La Fuente LF, Barbosa E, Carriedo JA, Gonzalo C, Arenas R, Fresno JM, San Primitivo F (2009) Factors influencing variation of fatty acid content in ovine milk. *Journal of Dairy Science* 92(8): 3791-3799. <https://doi.org/10.3168/jds.2009-2151>
- Del Prado A, Misselbrook T, Chadwick D, Hopkins A, Dewhurst RJ, Davison P, Butler A, Schröder J, Scholefield D (2011). SIMS_{DAIRY}: A modelling framework to identify sustainable dairy farms in the UK. Framework description and test for organic systems and N fertiliser optimisation. *Science of the Total Environment* 409: 3993-4009. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.05.050>
- Del Prado A, Crosson P, Olesen JE, Rotz CA (2013). Whole-farm models to quantify greenhouse gas emissions and their potential use for linking climate change mitigation and adaptation in temperate grassland ruminant-based farming systems. *Animal* 7: 373-385. <https://doi.org/10.1017/S1751731113000748>
- Del Prado A, Batalla I, Pardo G, Jebari A, Ragkos A, Theodoridis A, Arsenos G (2019). Deliverable 4.3. Proyecto EU ISAGE. New holistic model that can be used to redesign terrestrial small ruminant's livestock systems. 142 pp.
- Del Prado A, Manzano P. (2020). La ganadería y su contribución al cambio climático. Muñoz, A. (ed). Amigos de la Tierra y BC3, Madrid y Leioa. 36 pp.
- Del Prado A, Batalla I, Pardo G, Galán E, Thomas C, Ragkos A, Theodoridis A, Arsenos G (2020). Deliverable 4.4 Proyecto EU ISAGE. New trajectories towards innovative sheep and goat production systems.
- Dellar M, Topp CFE, Banos G, Wall E (2018). A meta-analysis on the effects of climate change on the yield and quality of European pastures. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 265: 413-420. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.06.029>
- Dumont B, Andueza D, Niderkorn V, Lüscher A, Porqueddu C, Picon-Cochard C (2015). A meta-analysis of climate change effects on forage quality in grasslands: specificities of mountain and Mediterranean areas. *Grass and Forage Science* 70: 239-254. <https://doi.org/10.1111/gfs.12169>
- El-Tarabany MS, El-Tarabany AA, Roushdy EM (2016). Impact of lactation stage on milk composition and blood biochemical and hematological parameters of dairy Baladi goats. *Saudi Journal of Biological Sciences* 25(8): 1632-1638. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2016.08.003>
- Finocchiaro R, Van Kaam JBCHM, Portolano B, Misztal I (2005). Effect of heat stress on production of Mediterranean dairy sheep. *Journal of Dairy Science* 88(5): 1855-1864. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(05\)72860-5](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(05)72860-5)
- Grings EE, Zampaligre N, Ayantunde A (2016). Overcoming challenges to utilization of dormant forage in year-round grazing systems. *Journal of Animal Science* 94: 2-14. <https://doi.org/10.2527/jas.2016-0517>
- Grünzweig JM, Dumbur R (2012). Seed traits, seed-reserve utilization and offspring performance across pre-industrial to future CO₂ concentrations in a Mediterranean community. *Oikos* 121(4): 579-588. <https://doi.org/10.2307/41429327>

- Hamzaoui S, Salama AAK, Albanell E, Such X, Caja G (2013). Physiological responses and lactational performances of late-lactation dairy goats under heat stress conditions. *Journal of Dairy Science* 96: 6355-6365. <https://doi.org/10.3168/jds.2013-6665>
- Hopkins A, Del Prado A (2007). Implications of climate change for grassland: impacts, adaptations and mitigation options: a review. *Grass and Forage Science* 62: 118-126. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.2007.00575.x>
- Iannetta PPM, Young M, Bachinger J, Bergkvist G, Doltra J, Lopez-Bellido RJ, Monti M, Pappa VA, Reckling M, Topp CFE, Walker RL, Rees RM, Watson CA, James EK, Squire GR, Begg GS (2016). A comparative nitrogen balance and productivity analysis of legume and non-legume supported cropping systems: the potential role of biological nitrogen fixation. *Frontiers in Plant Science* 7: 1700. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01700>
- Iglesias E, Báez K, Díaz-Ambrona CH (2016). Assessing drought risk in Mediterranean Dehesa grazing lands. *Agricultural Systems* 149: 65-74. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.07.017>
- ICP Vegetation (2011). *Ozone Pollution: A hidden threat to food security*. Bangor, Wales. 116 pp.
- Kadzere CT, Murphy MR, Silanikove N, Maltz E (2002). Heat stress in lactating dairy cows: a review. *Livestock production science* 77: 59-91 [https://doi.org/10.1016/S0301-6226\(01\)00330-X](https://doi.org/10.1016/S0301-6226(01)00330-X)
- Kipling RP, Bannink A, Bellocchi G, Dalgaard T, Fox NJ, Hutchings NJ, Kjeldsen C, Lacetera N, Sinabell F, Topp CFE, van Oijen M, Virkajrvi P, Scollan ND (2016). Modelling European ruminant production systems: Facing the challenges of climate change. *Agricultural Systems* 147: 24-37. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.05.007>
- Körner C (2003). Limitation and stress – always or never? *Journal of Vegetation Science* 14: 141-143.
- Lambertz C, Sanker C, Gauly M (2014). Climatic effects on milk production traits and somatic cell score in lactating Holstein-Friesian cows in different housing systems. *Journal of Dairy Science* 97: 319-329. <https://doi.org/10.3168/jds.2013-7217>
- Lu CD (1989). Effects of heat stress on goat production. *Small Ruminant Research* 2(2): 151-162. [https://doi.org/10.1016/0921-4488\(89\)90040-0](https://doi.org/10.1016/0921-4488(89)90040-0)
- Luo Y, Su B, Currie WS, Dukes JS, Finzi A, Hartwig U, Hungate B, McMurtrie RE, Oren R, Parton WJ, Pataki DE, Shaw MR, Zak DR and Field CB (2004). Progressive N limitation of ecosystem responses to rising atmospheric carbon dioxide. *Bioscience* 54: 731-739. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2004\)054\[0731:PNLOER\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2004)054[0731:PNLOER]2.0.CO;2)
- Mahjoubi E, Amanlou H, Mirzaei-Alamouti HR, Aghaziarati N, Yazdi MH, Noori GR, Yuan K, Baumgard LH (2014). The effect of cyclical and mild heat stress on productivity and metabolism in Afshari lambs. *Journal of Animal Science* 92: 1007-1014. <https://doi.org/10.2527/jas.2013-7153>
- Menéndez-Buxadera A, Medina C, Gómez J, Barajas F, Molina A (2016). Parámetros genéticos de la prolificidad y la supervivencia hasta el sacrificio en corderos de raza Merina. *Archivos de Zootecnia* 65: 291-296. <https://doi.org/10.21071/az.v65i251.687>
- Morris J, Hess T, Posthumus H (2010). Agriculture's Role in Flood Adaptation and Mitigation. En: *Sustainable Management of Water Resources in Agriculture* (Ed. Organisation for Economic Cooperation and Development; OECD), pp. 1-35. OECD Publishing, Paris, Francia. <https://doi.org/10.1787/9789264083578-en>
- Mosquera-Losada MR, Rigueiro-Rodríguez A, McAdam J (2005). Silvopastoralism and sustainable land management. *Proceedings of a International Conference on Silvopastoralism and Sustainable Management held in Lugo, Spain, April 2004*.
- Mullender S, Zoralis K, Pardo G, Del Prado A, Dellar M, Yáñez-Ruiz D, Carabaño MJ (2017). Deliverable 3.1. Proyecto EU ISAGE. Report on review of information on FP7 projects and literature on climate change and small ruminants. 92 pp.
- Myers SS, Zanobetti A, Kloog I, Huybers P, Leakey ADB, Bloom AJ, Carlisle E, Dietterich LH, Fitzgerald G, Hasegawa T, Holbrook NM, Nelson RL, Ottman MJ, Raboy V, Sakai H, Sartor KA, Schwartz J, Seneweera S, Tausz M, Usui Y

- (2014). Increasing CO₂ threatens human nutrition. *Nature* 510: 139-142. <https://doi.org/10.1038/nature13179>
- Nienaber JA, Hahn GL (2007). Livestock production system management responses to thermal challenges. *International Journal of Biometeorology* 52: 149-157. <https://doi.org/10.1007/s00484-007-0103-x>
- Nowak RS, Ellsworth DS, Smith SD (2004). Functional responses of plants to elevated atmospheric CO₂ - Do photosynthetic and productivity data from FACE experiments support early predictions? *New Phytologist* 162: 253-280. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2004.01033.x>
- Ooi MKJ, Auld TD, Denham AJ (2012). Projected soil temperature increase and seed dormancy response along an altitudinal gradient: implications for seed bank persistence under climate change. *Plant Soil* 353: 289-303. <http://dx.doi.org/10.1007/s11104-011-1032-3>
- Ovalle C, Espinoza S, Barahona V, Gerding M, Humphries A, del Pozo A (2015). Lucerne and other perennial legumes provide new options for rain fed livestock production in the Mediterranean-climate region of Chile. *Ciencia e Investigación Agraria* 42(3): 453-460. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-16202015000300014>
- Pardo G, Martín-García I, Arco A, Yañez-Ruiz DR, Moral R, Del Prado A (2016). Greenhouse-gas mitigation potential of agro-industrial by-products in the diet of dairy goats in Spain: a life-cycle perspective. *Animal Production Science* 56(3): 646-654. <https://doi.org/10.1071/AN15620>
- Pardo G, Del Prado A, Batalla I, Carabaño MJ, Ramón M, Belanche A (2019). Deliverable 3.2. Proyecto EU ISAGE. Report on development of meta-models on the effect of climate parameters on animal productivity and welfare. 71 pp.
- Peana I, Fois G, Cannas A (2007). Effects of heat stress and diet on milk production and feed and energy intake of Sarda ewes. *Italian Journal of Animal Science* 6: 577-579. <https://doi.org/10.4081/ijas.2007.1s.577>
- Picon-Cochard C, Finn J, Sutter M, Nagy Z, Diop A, Fisher F, Talore D (2014). Report on grassland ecosystem manipulation experiments. *Animal Change*, Seventh Framework Programme, Theme 2: Food, Agriculture and Fisheries, and Biotechnologies, Grant Agreement Number: FP7-266018, Deliverable 4.1. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01611420/document>
- Porqueddu C, Ates S, Louhaichi M, Kyriazopoulos AP, Moreno G, del Pozo A, Ovalle C, Ewing MA, Nichols PGH (2016). Grasslands in "Old World" and "New World" Mediterranean-climate zones: Past trends, current status and future research priorities. *Grass and Forage Science* 71: 1-35. <https://doi.org/10.1111/gfs.12212>
- Ramón M, Díaz C, Pérez-Guzmán MD, Carabaño MJ (2016). Effect of exposure to adverse climatic conditions on production in Manchega dairy sheep. *Journal of Dairy Science*, 99(7): 5764-5779. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-10909>
- Re GA, Piluzza G, Sulas L, Franca A, Porqueddu C, Sanna F, Bullitta, S (2014). Condensed tannin accumulation and nitrogen fixation potential of *Onobrychis viciifolia* Scop. grown in a Mediterranean environment. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 94: 639-645. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6463>
- Rhoads ML, Rhoads RP, VanBaale MJ, Collier RJ, Sanders SR, Weber WJ, Crooker BA, Baumgard LH (2009). Effects of heat stress and plane of nutrition on lactating Holstein cows: I. Production, metabolism, and aspects of circulating somatotropin. *Journal of Dairy Science* 92: 1986-1997. <https://doi.org/10.3168/jds.2008-1641>
- Rubio A, Roig S (2017). Impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático en los sistemas extensivos de producción ganadera en España. Oficina Española de Cambio Climático. Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, Madrid. 178 pp.
- Salama AAK, Caja G, Hamzaoui S, Badaoui B, Castro-Costa A, Façanha DAE, Guilhermino MM, Bozzi R (2014). Different levels of response to heat stress in dairy goats. *Small Ruminant Research* 121: 73-79. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2013.11.021>
- Sampedro J, Waldhoff ST, Van de Ven DJ, Pardo G, Van Dingen R, Arto I, Del Prado A, Sanz MJ (2020). Future impacts of ozone driven damages on

- agricultural systems. *Atmospheric Environment* 231: 117538. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117538>
- Sardans J, Peñuelas J (2013). Plant-soil interactions in Mediterranean forest and shrublands: impacts of climatic change. *Plant Soil* 365: 1-33. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1591-6>
- Sevi A, Annicchiarico G, Albenzio M, Taibi L, Muscio A, Dell'Aquila S (2001). Effects of solar radiation and feeding time on behavior, immune response and production of lactating ewes under high ambient temperature. *Journal of Dairy Science* 84: 629-640. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(01\)74518-3](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(01)74518-3)
- Sevi A, Rotunno T, Di Caterina R, Muscio A (2002). Fatty acid composition of ewe milk as affected by solar radiation and high ambient temperature. *Journal of Dairy Research* 69: 181-194. <https://doi.org/10.1017/S0022029902005447>
- Sevi A, Caroprese M (2012). Impact of heat stress on milk production, immunity and udder health in sheep: A critical review. *Small Ruminant Research* 107: 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2012.07.012>
- Soussana JF, Lüscher A (2007). Temperate grasslands and global atmospheric change: A review. *Grass and Forage Science* 62: 127-134. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.2007.00577.x>
- Soussana JF, Graux AI, Tubiello FN (2010). Improving the use of modelling for projections of climate change impacts on crops and pastures. *Journal of Experimental Botany* 61: 2217-2228. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq100>
- Thornton PK, Van De Steeg J, Notenbaert A, Herrero M (2009). The impacts of climate change on livestock and livestock systems in developing countries: A review of what we know and what we need to know. *Agricultural Systems* 101: 113-127. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2009.05.002>
- Trnka M, Bartošová L, Schaumberger A, Ruget F, Eitzinger J, Formayer H, Seguin B, Olesen JE (2011). Climate change and impact on European grasslands. Proceedings of 16th Symposium of the European Grassland Federation and Agricultural Research and Education Centre (AREC), 28-31 de agosto, Raumberg-Gumpenstein, Austria, pp. 39-51.
- Tubiello FN, Soussana JF, Howden SM (2007). Crop and pasture response to climate change. Proceedings of the National Academy of Sciences 104: 19686-19690. <https://doi.org/10.1073/pnas.0701728104>
- Volaire F, Norton MR, Lelièvre F (2009). Summer drought survival strategies and sustainability of perennial temperate forage grasses in Mediterranean areas. *Crop Science* 49: 2386-2392. <https://doi.org/10.2135/cropsci2009.06.0317>
- Ward G (1995). Pasture recovery after fire. Victoria State Government. Economic Development, Jobs, Transport and Resources. <https://doi.org/10.4225/50/55EE4EFC4BE45>
- West JW (2003). Effects of heat-stress on production in dairy cattle. *Journal of Dairy Science* 86: 2131-2144. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(03\)73803-X](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)73803-X)
- (Aceptado para publicación el 29 de octubre de 2020)