

Metaanálisis de los efectos de la suplementación con urea de liberación controlada en el rendimiento del ganado vacuno de carne.

Saheed A. Salami ^{1,*}, Colm A. Moran ², Helen E. Warren ³ and Jules Taylor-Pickard ³

¹ Solutions Deployment Team, Alltech (UK) Ltd., Stamford PE9 1TZ, UK

² Regulatory Affairs Department, Alltech SARL, Rue Charles Amand, 14500 Vire, France; cmoran@alltech.com

³ Alltech Biotechnology Centre, Summerhill Road, A86 X006 Dunboyne, Ireland; hwarren@alltech.com (H.E.W.); jpickard@alltech.com (J.T.-P.)

* Correspondence: saheed.salami@alltech.com; Tel.: +44-7973-972-339

Recibido: 27 de febrero de 2020; Aceptado: 8 de abril de 2020; Publicado: 10 de abril de 2020.



Síntesis: Las materias primas vegetales como la harina de soja y la harina de colza son utilizadas para suministrar proteína degradable en el rumen (PDR) y proteína no degradable en el rumen (PNDR) en las dietas para animales rumiantes (p.ej., ganado vacuno, búfalos, ovejas y cabras). La PDR es utilizada por los microorganismos ruminales para la síntesis de proteína microbiana. La proteína microbiana puede aportar hasta el 80% de los requerimientos de proteína de los rumiantes. Sin embargo, el uso de fuentes de proteína vegetal en las dietas para rumiantes puede quedar restringido por su disponibilidad, costes e impactos sobre el medio ambiente. La urea de liberación controlada (ULC) es una fuente de nitrógeno no proteico (NNP) que permite una sustitución parcial de las fuentes vegetales de PDR en las dietas para rumiantes, proporcionando una disponibilidad sostenida de amoníaco para la síntesis de proteína microbiana ruminal. En los últimos treinta años, se han realizado extensas investigaciones sobre el uso de ULC en las dietas de ganado vacuno de carne. El actual estudio analizó un conjunto de datos combinados obtenidos de múltiples estudios de investigación para obtener evidencia cuantitativa, basada en la investigación, sobre el impacto de una urea de liberación controlada de uso comercial (Optigen[®]) sobre el rendimiento del ganado vacuno de carne. Los resultados revelaron que la suplementación de la dieta con ULC mejora el rendimiento, la rentabilidad y el impacto sobre el medio ambiente de la producción de ganado vacuno de carne. Por lo tanto, este estudio demuestra que la ULC es una solución efectiva de NNP en las dietas para ganado vacuno de carne.

Resumen: La urea de liberación controlada (ULC) es una fuente de nitrógeno no proteico (NNP) recubierto para la nutrición de los rumiantes. Este estudio aplicó una técnica meta analítica para cuantificar el efecto de una urea de liberación controlada comercial (Optigen[®], Alltech Inc., Nicholasville, KY, EE UU) sobre el rendimiento del ganado vacuno de carne. Los datos fueron extraídos de 17 experimentos y analizados usando el modelo de efectos aleatorios para estimar el impacto del efecto de la ULC sobre la ingesta de materia seca (IMS), la ingesta de proteína bruta (IPB), la ganancia de peso en vivo (GPV) y la eficiencia alimentaria (EA) sobre el crecimiento y acabado del ganado vacuno de carne. No hubo ningún efecto de la suplementación con una ULC, a nivel global, sobre la IMS y la IPB en el ganado vacuno de carne. La inclusión de la ULC en la dieta mejoró a nivel global la GPV (+92 g/d/cabeza) y la EA (+12 g GPV/kg de IMS/cabeza) del ganado vacuno de carne. En especial, la suplementación con ULC en la dieta del ganado en crecimiento demostró mejoras consistentes en la GPV y la EA del ganado vacuno de carne, en virtud de varios factores estudiados. El análisis de la simulación indicó que los efectos positivos de la ULC sobre la GPV y la EA mejoraron la rentabilidad a través de la reducción del coste de los piensos y redujo la intensidad de las emisiones de la producción de carne de vacuno. Estos resultados indican que la ULC es una solución sostenible de NNP en la producción del ganado vacuno de carne.

Palabras clave: ganado vacuno de carne; proteína degradable en el rumen; urea; rendimiento del crecimiento; eficiencia alimentaria

1. Introducción

La industria ganadera se enfrenta a los desafíos del uso de recursos limitados terrestres e hídricos para satisfacer la creciente demanda de proteína animal de una manera sostenible para el medio ambiente. Los rumiantes son componentes importantes de un sector ganadero sostenible debido a su capacidad para

digerir y convertir una biomasa no comestible para las personas en una proteína comestible de alta calidad (carne y leche), principalmente debido a la participación de un consorcio intrincado de microorganismos que residen en el rumen [1]. La proteína bruta (PB) en la nutrición de los rumiantes comprende las fracciones de proteína degradable en el rumen (PDR) y de proteína no degradable en el rumen (PNDR). La PDR de la dieta es degradada en el rumen para producir amoníaco, que se sincroniza con la obtención de energía fermentable del crecimiento microbiano ruminal y con la síntesis de proteína [2]. La proteína bruta microbiana (PBM) y la PNDR que llegan al intestino delgado constituyen la proteína metabolizable que se absorbe y que suministra a los rumiantes su requerimiento de proteína [3]. La proteína microbiana representa entre un 50% y un 80% del total de la proteína absorbible, resaltando su importancia como componente fundamental de la proteína metabolizable [2, 4].

La PDR de la dieta se deriva de compuestos nitrogenados, que comprenden tanto el nitrógeno no proteico (NNP) como la proteína verdadera soluble, proveniente de fuentes de proteína vegetal y animal. Las fuentes de NNP son normalmente menos caras que las fuentes de proteína verdadera y la urea para piensos es frecuentemente la fuente de NNP más accesible para ser incluida en dietas de rumiantes. Sin embargo, la utilización de la urea en la alimentación es limitada debido a su rápida hidrólisis en amoníaco, que excede la velocidad de fermentación de carbohidratos en el rumen [2]. La falta de sincronización entre la producción de amoníaco ruminal y la disponibilidad de energía fermentable afecta negativamente a la eficiencia del rendimiento de la proteína bruta microbiana (PBM). Por consiguiente, esta circunstancia reduce la producción de PBM, lo que puede disminuir la disponibilidad de la proteína metabolizable para los objetivos de producción en los rumiantes [5]. La rápida hidrólisis ruminal de las fuentes de NNP, incluyendo la urea, podría reducir la eficiente utilización del nitrógeno (N) y por lo tanto aumentar la excreción de N y la volatilización de amoníaco proveniente del estiércol resultando en impactos negativos para el medioambiente [5].

En las tres últimas décadas, la tecnología de recubrimiento ha sido utilizada en la fabricación de productos de urea de liberación controlada (ULC) que se degradan a menor velocidad en el rumen, como solución potencial para mejorar la sincronización del amoníaco ruminal con la digestión de la energía para la síntesis de proteína microbiana. Estos productos habitualmente se encuentran disponibles para suministrarlos a todas las especies de rumiantes (el ganado vacuno, los búfalos, las ovejas y las cabras). Cherdthong y Wanapat [2] proporcionaron una revisión narrativa de la literatura científica que resaltó la potencial eficacia de la ULC para optimizar la eficacia ruminal para captar nitrógeno (N), la síntesis de la proteína microbiana, la digestión de la fibra y la mejor producción de los rumiantes. Además, la ULC podría ser una alternativa respetuosa con el medio ambiente al reemplazar una porción de las fuentes de proteína vegetal, y la formación lenta de amoníaco en el rumen podría asegurar que no hubiese impactos negativos de la excreción de nitrógeno (N) [7,8]. Sin embargo, las revisiones narrativas carecen de un enfoque metodológico y están sometidas a la interpretación del autor del trabajo de investigación previo, lo que puede conducir a conclusiones sesgadas [9].

Con frecuencia es difícil extraer conclusiones cuantitativas comparando distintos resultados de investigaciones debido a la diversidad en el diseño de los estudios, el sesgo experimental, un pobre análisis estadístico y una falta de aplicación a un sistema específico de producción ganadera [9]. Se pueden superar estas barreras con el uso de un metaanálisis que consiste en un procedimiento estadístico riguroso para analizar un conjunto de datos combinado, obtenido a partir de múltiples estudios de investigación [9, 10]. En una multitud de estudios se ha utilizado el metaanálisis para proporcionar evidencia cuantitativa y basada en investigaciones, sobre la eficacia de productos o intervenciones nutricionales en la producción del ganado vacuno de carne [10-12]. Por lo que sabemos, no hay un metaanálisis publicado sobre el efecto de la suplementación con ULC en la producción del ganado vacuno de carne. Por tanto, el objetivo de este estudio fue aplicar una técnica meta analítica para cuantificar los efectos de la ULC en el rendimiento de ganado vacuno de carne en crecimiento y acabado. Además, los resultados del metaanálisis fueron usados para realizar un análisis de simulación para evaluar el efecto potencial de la ULC en el impacto económico y medioambiental de la producción de carne de vacuno.

2. Materiales y métodos

2.1 Búsqueda de trabajos publicados y selección de estudios.

Los informes de ensayos publicados y no publicados evaluando el efecto de una ULC de uso Optigen®, Alltech Inc., Nicholasville, KY, USA) en ganado vacuno de carne fueron recuperados de la base de datos de la bibliografía, de uso interno, de Alltech. El producto de ULC es un compuesto de urea con el

recubrimiento uniforme de una matriz lipídica semipermeable vegetal con 88% de urea (41% N, 256% PB) y 11-12% de grasa. El recubrimiento lipídico de la ULC ralentiza la disolución de la urea, con la consiguiente reducción de la tasa de conversión de urea en amoníaco en el rumen [13]. Los ensayos no publicados están vinculados al equipo de investigadores de la compañía, lo que permite recabar más información si fuera necesario. Una búsqueda adicional de trabajos publicados fue realizada en bases de datos académicas online y en motores de búsqueda (Google Scholar, Agricola y Pubmed) usando las palabras clave: “urea recubierta, Optigen®, carne de vacuno, novillo y rendimiento”. No se empleó ningún filtro por fecha de publicación en los motores de búsqueda para abarcar la entera duración de uso de Optigen® como suplemento de ULC en las investigaciones sobre ganado vacuno de carne. Se obtuvieron un total de 48 estudios a partir de la búsqueda inicial de trabajos publicados y fueron sometidos a un cribado de selección de acuerdo a los siguientes criterios de inclusión: (1) se comunicó el experimento en idioma inglés y se realizó en razas de ganado de vacuno de carne y de ganado vacuno lechero; (2) se proporcionó y se pudo discernir la información sobre la fase de producción del ganado vacuno de carne; (3) los estudios contienen al menos una dieta control sin suplemento de ULC y una dieta suplementada con Optigen® como ULC; (4) se proporcionaron detalles sobre la composición del pienso y las dosis de la ULC suplementada; (5) se informó sobre la duración de los experimentos; (6) se proporcionó información sobre la unidad experimental en el diseño del estudio (alimentación en corral o alimentación individual); (7) se informó sobre uno o más parámetros de rendimiento – ingesta de materia seca (IMS), ganancia de peso en vivo (GPV) y la eficiencia alimentaria (EA). El proceso de cribado tuvo como resultado la selección de 17 estudios experimentales. Los estudios seleccionados son siete publicaciones que incluyen la revisión por pares y 11 estudios no publicados presentados en una defensa de un doctorado o en conferencias internacionales. La descripción de los estudios experimentales incluida en la base de datos del metaanálisis aparece en el Apéndice A (Tabla A1). La Tabla S1 presenta la lista de referencia de los ensayos en los que se suministró la ULC al ganado vacuno de carne, pero que fueron excluidos del metaanálisis debido a no cumplir con los criterios de inclusión.

2.2 Extracción de los datos

Se desarrolló una hoja de cálculo para la extracción de datos de los estudios. Los siguientes resultados de rendimiento fueron extraídos o calculados a partir de cada uno de los estudios para la estimación del tamaño del efecto: ingesta de materia seca (IMS), ingesta de la proteína de la dieta (IPD), la GPV y la EA. La ingesta de la proteína de la dieta fue calculada multiplicando la IMS y el nivel de proteína en la dieta de cada tratamiento. Se informó sobre la eficiencia alimentaria en forma de GPV/IMS en la mayoría de los experimentos mientras que pocos experimentos informaron sobre la EA en forma de IMS/GPV. Con respecto a estos pocos experimentos, la EA fue calculada dividiendo la GPV con la IMS para cada tratamiento. La desviación estándar (DE) fue notificada como la medida de varianza. Si no se proporcionaba la DE en los estudios, ésta se calculaba multiplicando el error estándar, reportado para las medias, por la raíz cuadrada del tamaño de la muestra. Muchos estudios informaron sobre un error estándar (EE) o una desviación estándar (DE) común y estas estimaciones fueron usadas tanto por el grupo control como por el grupo del tratamiento. Sin embargo, pocos informes de ensayos proporcionaron una estimación por separado de la DE o del EE para cada grupo y éstos fueron registrados así. En otros estudios la DE fue imputada a unos pocos desenlaces de rendimiento que no reportaron la medida de la varianza. Este método ha sido apoyado por la evidencia empírica indicando la validez de sustituir algunos datos de varianza ausentes por datos de varianza reportados, provenientes de otros metaanálisis o de otros estudios en el mismo metaanálisis para proporcionar resultados precisos del metaanálisis [14,15]. La información sobre los diversos factores bajo estudio que podrían influir en los desenlaces de rendimiento fueron incluidos en la base de datos. Estos incluyen la fase de producción (ganado en crecimiento o ganado en acabado), revisión por pares (revista científica con árbitro o no), lugar del estudio (Norteamérica u otro lugar), la raza (vacuno de carne o no), método de alimentación (alimentación individual o en corral), inclusión de ensilado de maíz como fuente de fibra (sí o no), período de alimentación (≤ 80 o > 80 días), dosis de ULC ($\leq 1.00\%$ o $> 1.00\%$ de materia seca (MS) en la dieta, sexo (novillos, novillas, toro).

2.3 Cálculos y análisis estadístico

Los análisis estadísticos fueron realizados usando el software Comprehensive Meta-analysis (versión 3, Biostat Inc, USA). Un modelo de efectos aleatorios fue adoptado para el meta-análisis, el cual tiene una suposición subyacente de que la distribución de efectos existe, con la consiguiente heterogeneidad entre los resultados del estudio [16]. El tamaño del efecto para los desenlaces analizados fue determinado como la diferencia media bruta (DMB) y la diferencia media estandarizada (DME) con un nivel de intervalo de confianza de 95%. La DMB fue estimada como la suma de las diferencias medias de tratamiento relativas

a control en los estudios individuales, ponderada por las varianzas individuales para cada estudio. La DMB estima el efecto real del tratamiento en medidas unitarias. Por otro lado, la DME es la diferencia media entre los grupos de tratamiento y los grupos control, que está estandarizada basándose en la DE de los grupos de tratamiento y de los grupos control, y el resultado es un valor numérico adimensional. La DME ofrece la ventaja de ser una estimación del tamaño del efecto más robusta cuando existe heterogeneidad en el conjunto de datos. [17]. Se consideró alcanzada la significación estadística de las estimaciones del tamaño del efecto (DMB Y DME) cuando $p \leq 0,05$. Los gráficos de Forest se usaron para presentar visualmente los desenlaces del tamaño del efecto (DMB con un intervalo de confianza de 95%) a partir de cada estudio y del desenlace global de todos los estudios.

Las variaciones en todos los estudios fueron evaluadas usando el test (Q) chi-cuadrado e I^2 [16]. Considerando que se presupone que el test Q tiene una potencia relativamente baja de detección de heterogeneidad en los estudios de un metaanálisis, la estadística I^2 se ha calculado para describir el porcentaje de variación total en todos los estudios, que es debido a la heterogeneidad más que a la suerte. La ecuación siguiente fue usada para calcular la estadística de heterogeneidad I^2 a partir de Q , donde k es el número de ensayos:

$$I^2 = \frac{Q - (k - 1)}{Q} \times 100 \quad (1)$$

Si I^2 excede el 50%, se presupone que el desenlace tiene una heterogeneidad significativa [17]. Para controlar la heterogeneidad, los estudios fueron estratificados en grupos/subgrupos basados en diferentes factores de estudio (p.ej., la fase de producción, la localización del estudio, la raza, el periodo de alimentación, etc.) que podrían influir en los desenlaces de rendimiento y se realizó el metaanálisis respectivo para determinar las estimaciones del tamaño del efecto. Nótese, los subgrupos con menos de 10 comparaciones, son excluidos del metaanálisis debido a la crítica general de que tales desenlaces del modelo pueden estar sesgados estadísticamente [16].

Aunque un metaanálisis producirá una síntesis matemáticamente exacta de los estudios incluidos en el análisis, si estos estudios son una muestra sesgada de todos los estudios relevantes, entonces el efecto promedio computado por el metaanálisis reflejará este sesgo. Esta cuestión se conoce generalmente como sesgo de publicación. En este estudio, el sesgo de publicación fue examinado tanto gráficamente, con gráficos de embudo, como estadísticamente, usando tanto el test de Begg [18] como el test de Egger [19]. Por ejemplo, si existe un sesgo debido a que estudios más pequeños sin efectos estadísticamente significativos siguen sin ser publicados, esto conducirá a una apariencia asimétrica del gráfico de embudo y un espacio será evidente en una esquina de la parte inferior del gráfico. En esta situación, el efecto calculado en un metaanálisis tenderá a sobreestimar el efecto de la intervención [10].

2.4 Análisis de la simulación

Se realizó un análisis de la simulación usando los resultados del metaanálisis para evaluar cómo los efectos de la ULC en el rendimiento del ganado vacuno de carne influirían en los impactos económicos y medioambientales de la producción del ganado vacuno de carne. Se basó la simulación en los impactos de la suplementación con ULC para criar 1000 cabezas de ganado vacuno de carne en fase de crecimiento-acabado para que ganaran unos 200 kg de peso en vivo (PV). Los datos introducidos en la simulación se presentan en el Apéndice A (Tabla A1). Las variables introducidas en la simulación incluyen el número de cabezas de ganado, la IMS, la GPV, la EA, el objetivo de ganancia de peso en vivo, el rendimiento en carne magra y la producción de proteína de carne de vacuno. Los días de alimentación hasta el sacrificio y el coste total del pienso (€/1000 cabezas) fueron calculados como indicadores de los impactos económicos de la suplementación con ULC en la producción de carne de vacuno. La intensidad de las emisiones atribuida al uso del pienso (IEAUP) y la intensidad total de las emisiones fueron calculadas como indicadores de la huella en el medio ambiente de la producción de carne de vacuno. Las siguientes ecuaciones fueron aplicadas a los datos de entrada en la simulación para calcular los datos de salida económicos y medioambientales para las dietas basales y las dietas con ULC:

$$\text{Ración requerida para ganar 200 kg PV} = \text{objetivo de ganancia de peso en vivo} / \text{eficiencia alimentaria} \quad (2)$$

$$\text{Días de alimentación hasta el sacrificio} = \text{objetivo de la ganancia de peso en vivo} / \text{ganancia de peso en vivo} \quad (3)$$

$$\text{Uso total de alimento} = \text{ración requerida para ganar 200 kg PV} \times (1 / \text{MS contenida en la dieta}) \quad (4)$$

$$\text{Coste de alimentación} = \text{uso total del alimento} \times \text{coste de la ración.} \quad (5)$$

$$\text{Coste total de alimentación (€/1000 cabezas)} = \text{coste de alimentación} \times 1000 \quad (6)$$

$$\text{IEAUP} = \text{producción de proteína de carne de vacuno} \times \text{IEMGAUP} \quad (7)$$

$$\text{Intensidad de emisiones} = \text{IEAUP} + (\text{IEMGNAUP} \times \text{producción proteína de carne de vacuno}) \quad (8)$$

$$\text{Intensidad de las emisiones totales} = \text{intensidad de las emisiones} \times 1000 \quad (9)$$

Donde IEAUP es la intensidad de emisiones atribuidas al uso de alimento, IEMGAUP es la intensidad de las emisiones medias globales atribuidas al uso de alimento y la IEMGNAUP es la intensidad de las emisiones medias globales no atribuidas al uso del alimento.

Los siguientes supuestos fueron aplicados a las ecuaciones arriba mencionadas:

1. El contenido de MS de la dieta = 70%.
2. El coste de la ración = 0,15 €/ kg as fed. Se asumió que el coste de la ración era similar para las dietas basales y para las dietas con ULC, considerando que las dietas pueden ser reformuladas con ULC sustituyendo una porción de las fuentes de proteína vegetal, como la harina de soja sin cambiar el coste del pienso, en virtud de varias circunstancias. Por lo tanto, no se atribuye un coste adicional a la dieta suplementada con ULC en este escenario.
3. La IEMGAUP = 108 kg CO₂-eq por kg de proteína. Este supuesto se basó en los datos comunicados, que indicaron que la intensidad de las emisiones medias globales de carne de vacuno es 300 kg CO₂-eq por kg of proteína y una media de 36% de emisiones del vacuno de carne fue atribuida al uso del alimento[20]. Los datos sobre la intensidad de las emisiones medias globales del vacuno de carne se usaron debido a la amplia diversidad de la huella de carbono medioambiental de los sistemas de producción de carne de vacuno en todo el mundo.
4. La IEMGNAUP = 192 kg CO₂-eq por kg de proteína. Basada en el Supuesto (3) anterior, el componente restante de las emisiones del vacuno de carne no se asignaron al uso del alimento.

3. Resultadost

3.1. Características de los estudios

Un resumen de los estudios usados en este metaanálisis aparece en la Tabla A1. Los estudios fueron realizados en nueve países (seis, de Estados Unidos; dos, de Uruguay, Brasil y México; uno, de Italia, de Egipto, de Irlanda, de Portugal y de Argentina) cubriendo un periodo de 17 años (2002-2018). Hubo 32 comparaciones con grupo control vs ULC suplementado para la IMS y la eficiencia alimentaria (EA), y 33 comparaciones entre dietas con respecto a la GPV. Una inmensa mayoría (67%) de las comparaciones de ensayos se realizó en Norteamérica (EE UU y México). La dosis media de ULC suplementada en todos los estudios fue calculada a partir de la base de datos del metaanálisis como 0,88% de MS en la dieta. Razas de ganado vacuno de carne y novillos europeos fueron usados en un 76% y en un 85% de todas las comparaciones de ensayos, respectivamente, y con una buena distribución en todas las localidades de los estudios. Además, había aproximadamente una proporción igual de estudios realizados en ganado en crecimiento (45%) y en ganado en acabado (55%). Por lo tanto, este conjunto de datos proporciona una buena representación para extraer conclusiones importantes a partir de este metaanálisis, reconociendo al mismo tiempo la amplia diversidad de los sistemas de producción del ganado vacuno de carne en todas las distintas regiones.

3.2 Efecto de la urea de liberación controlada en la ingesta de materia seca del ganado vacuno de carne.

No hubo ningún efecto de la suplementación con ULC en la IMS global del ganado vacuno de carne como indican ambas estimaciones del tamaño del efecto, de la DMB y la DME (Tabla 1 y Figura S1). Hubo una variación sustancial en todos los estudios como revelaron las estadísticas Q e I_2 en la Tabla 1. Sin embargo, ninguno de los factores empleados para estratificar los estudios demostró un efecto estadísticamente significativo de la ULC sobre la IMS del ganado vacuno de carne (Tabla 1). El gráfico de embudo, así como la ausencia de significación estadística de los tests de Begg y de Egger (Apéndice A, Figura A1), indicaron que no hubo sesgo de publicación, sugiriendo que se obtuvieron suficientes estudios para analizar el efecto de la ULC sobre la IMS del ganado vacuno de carne.

Tabla 1. Resumen de las estimaciones del tamaño del efecto para la ingesta de materia seca (kg/día/cabeza) del ganado vacuno de carne alimentado con dieta control y dieta ULC en un metaanálisis de efectos aleatorios.

Grupos/ Subgrupos 1	Número de comparaciones	Estimaciones del tamaño del efecto				Tests de heterogeneidad				
		DMB (95% IC)	EE	Valor P	DME (95% IC) ³	EE	Valor P	Q	Valor P	I ² (%)
Todos los ensayos	32	0.074 (−0.132, 0.281)	0.105	0.480	0.045 (−0.209, 0.299)	0.129	0.728	87.70	<0.001	64.65
					Fase de producción					
Crecimiento	15	0.238 (−0.043, 0.520)	0.144	0.097	0.269 (−0.171, 0.709)	0.225	0.231	43.82	<0.001	68.05
Acabado	17	−0.114 (−0.446, 0.217)	0.169	0.499	−0.111 (−0.432, 0.210)	0.164	0.498	43.49	<0.001	63.21
					Revisión por pares					
No	15	0.032 (−0.266, 0.330)	0.152	0.833	0.030 (−0.264, 0.324)	0.150	0.839	36.86	0.001	62.01
Si	17	0.111 (−0.186, 0.409)	0.152	0.464	0.076 (−0.399, 0.551)	0.242	0.753	50.66	<0.001	68.42
					Localidad del estudio					
América del Norte ²	22	0.119 (−0.136, 0.374)	0.130	0.362	0.135 (−0.178, 0.449)	0.160	0.398	41.68	0.005	49.62
					Raza					
Ganado vacuno europeo ³	25	0.134 (−0.126, 0.395)	0.133	0.312	0.169 (−0.127, 0.466)	0.151	0.264	71.80	<0.001	66.58
					Grupo por método de alimentación					
Individual	20	0.100 (−0.178, 0.379)	0.142	0.480	0.033 (−0.265, 0.332)	0.152	0.826	65.733	<0.001	71.10
Corral	12	0.041 (−0.261, 0.343)	0.154	0.791	0.077 (−0.441, 0.596)	0.264	0.770	21.938	0.025	49.86
					Ensilado de maíz en la dieta					
No	14	−0.157 (−0.427, 0.113)	0.138	0.255	−0.110 (−0.357, 0.137)	0.126	0.382	14.95	0.310	13.05
Si	18	0.217 (−0.058, 0.492)	0.140	0.123	0.233 (−0.168, 0.635)	0.205	0.255	68.74	<0.001	75.27
					Período de alimentación (días)					
≤80	21	0.120 (−0.122, 0.361)	0.123	0.331	0.116 (−0.145, 0.377)	0.133	0.384	42.22	0.003	74.90
>80	11	0.011 (−0.338, 0.360)	0.178	0.950	−0.070 (−0.658, 0.518)	0.300	0.816	39.84	<0.001	52.63

Table 1. Continuación.

Grupos/ Subgrupos 1	Número de comparaciones	Estimaciones del tamaño del efecto			Tests de heterogeneidad					
		DMB (95% IC)	EE	Valor P	DME (95% IC)	EE	Valor P	Q	Valor P	I ² (%)
Dosificación de la ULC (%MS en la dieta)										
≤1.00	22	−0.015 (−0.257, 0.228)	0.124	0.906	−0.074 (−0.400, 0.252)	0.166	0.656	68.84	<0.001	69.49
>1.00	10	0.298 (−0.034, 0.629)	0.169	0.079	0.260 (−0.149, 0.669)	0.209	0.213	18.59	0.029	51.58
Sexo										
Novillos	27	0.031 (−0.193, 0.255)	0.114	0.786	−0.008 (−0.307, 0.291)	0.152	0.958	73.41	<0.001	64.58

¹ - Los estudios fueron estratificados en grupos y subgrupos según los factores de estudio que podían influir en el desenlace del rendimiento. Los subgrupos con <10 comparaciones están excluidos del análisis; ² - Estudios realizados en EE UU y México; ³ - Estos incluyen: Charolais, Limousine, Hereford, Angus y cruce con Angus. ULC (SRU): urea de liberación controlada; DMB (RMD): diferencia de medias bruta y su intervalo de confianza de 95% asociado; DME (SMD): diferencia de medias estandarizada y su intervalo de confianza de 95% asociado; EE (SE): error estándar. Q: estadística chi-cuadrado y nivel asociado de significación (p-value); I²: porcentaje de variación.

3.3 Efecto de la urea de liberación controlada sobre la ingesta de proteína de la dieta (IPD) del ganado vacuno de carne.

Los impactos de la suplementación con ULC sobre la IPD del ganado vacuno de carne se presentan en la Tabla 2 y la Figura S2. No se encontró ningún efecto significativo de la ULC sobre la IPD global del ganado vacuno de carne. Sin embargo, hubo variaciones en los conjuntos de datos de la IPD en todos los estudios. La estratificación basada en diferentes factores de estudio indicó que la ULC aumentó significativamente la IPD en los estudios realizados en el ganado vacuno de carne en crecimiento (+80 g/día/cabeza), estudios presentados en revistas con revisión por pares (+82 g/día/cabeza) y estudios realizados en Norteamérica (+71 g/día/cabeza). No hubo ninguna indicación de sesgo de publicación en los estudios usados para analizar el efecto de la ULC en la IPD del ganado vacuno de carne (Apéndice A, Figura A1).

Tabla 2. Resumen de las estimaciones del tamaño del efecto, para la ingesta de proteína de la dieta (kg/día/cabeza) del ganado vacuno de carne, alimentado con dieta control y dieta ULC en una metaanálisis de efectos aleatorios.

Grupos/ Subgrupos 1	Número de comparaciones	Estimaciones del tamaño del efecto				Tests de heterogeneidad				
		DMB (95% IC)	EE	Valor P	DME (95% IC)	EE	Valor P	Q	Valor P	I ² (%)
Todos los ensayos	32	0.033 (−0.020, 0.085)	0.027	0.222	0.307 (−0.094, 0.708)	0.205	0.133	207.09	<0.001	85.03
					Fase de producción					
Crecimiento	15	0.080 (0.001, 0.159)	0.040	0.046	0.987 (0.201, 1.772)	0.401	0.014	113.31	<0.001	87.64
Acabado	17	−0.015 (−0.076, 0.046)	0.031	0.634	−0.110 (−0.544, 0.325)	0.222	0.621	80.39	<0.001	80.10
					Revisión por pares					
No	15	−0.022 (−0.084, 0.040)	0.032	0.494	−0.158 (−0.610, 0.294)	0.231	0.493	86.93	<0.001	83.90
Si	17	0.082 (0.005, 0.160)	0.040	0.038	0.978 (0.206, 1.750)	0.394	0.013	109.56	<0.001	85.40
					Localidad del estudio					
América del Norte ²	22	0.071 (0.013, 0.129)	0.030	0.016	0.778 (0.231, 1.325)	0.279	0.005	109.31	<0.001	80.79
					Raza					
Ganado vacuno europeo ³	25	0.051 (−0.010, 0.112)	0.031	0.101	0.590 (0.109, 1.071)	0.245	0.016	178.17	<0.001	86.53
					Grupo por método de alimentación					
Individual	20	0.013 (−0.054, 0.080)	0.034	0.697	0.099 (−0.346, 0.544)	0.227	0.663	140.00	<0.001	86.43
Corral	12	0.063 (−0.018, 0.144)	0.041	0.126	0.904 (−0.091, 1.900)	0.508	0.075	62.67	<0.001	82.45
					Ensilado de maíz en la dieta					
No	14	0.035 (−0.005, 0.075)	0.021	0.088	0.239 (−0.078, 0.556)	0.162	0.140	23.24	0.039	44.07
Si	18	0.035 (−0.041, 0.110)	0.039	0.368	0.448 (−0.240, 1.136)	0.351	0.202	177.14	<0.001	90.40
					Período de alimentación (días)					
≤80	21	0.049 (−0.008, 0.107)	0.030	0.094	0.396 (−0.018, 0.809)	0.211	0.061	100.63	<0.001	90.06
>80	11	0.004 (−0.098, 0.106)	0.052	0.938	0.087 (−0.927, 1.100)	0.517	0.867	102.20	<0.001	80.43

Table 1. Continuación.

Grupos/ Subgrupos 1	Número de comparaciones	Estimaciones del tamaño del efecto					Tests de heterogeneidad			
		DMB (95% IC)	EE	Valor P	DME (95% IC)	EE	Valor P	Q	Valor P	I ² (%)
Dosificación de la ULC (%MS en la dieta)										
≤1.00	22	0.014 (−0.038, 0.067)	0.027	0.597	0.138 (−0.332, 0.608)	0.240	0.564	139.59	<0.001	86.27
>1.00	10	0.071 (−0.035, 0.177)	0.054	0.187	0.826 (−0.029, 1.680)	0.436	0.058	65.57	<0.001	84.96
Sexo										
Novillos	27	0.030 (−0.030, 0.090)	0.031	0.325	0.335 (−0.166, 0.837)	0.256	0.190	189.85	<0.001	86.31

¹ - Los estudios fueron estratificados en grupos y subgrupos según los factores de estudio que podían influir en el desenlace del rendimiento. Los subgrupos con <10 comparaciones están excluidos del análisis; ² - Estudios realizados en EE UU y México; ³ - Incluyen: Charolais, Limousine, Hereford, Angus y cruce con Angus. ULC (SRU): urea de liberación controlada; DMB (RMD): diferencia de medias bruta y su intervalo de confianza de 95% asociado; DME (SMD): diferencia de medias estandarizada y su intervalo de confianza de 95% asociado; EE (SE): error estándar. Q: estadística chi-cuadrado y nivel asociado de significación (p-value); I²: porcentaje de variación.

3.4 Efecto de la urea de liberación controlada en la ganancia de peso vivo del ganado vacuno de carne.

La suplementación de la ULC aumentó significativamente la GPV del ganado vacuno de carne en +92 g/día/cabeza en todos los estudios (Tabla 3 y Figura S3). Las estadísticas Q e I^2 indicaron que existía variación en los conjuntos de datos en todos los estudios. El metaanálisis de los subgrupos estratificados demostró que las dietas para el ganado vacuno con ULC suplementada presentaron GPV mayor en los estudios realizados en ganado vacuno en crecimiento (+130 g/d/cabeza) y el ganado vacuno en acabado (+60 g/d/cabeza, en estudios sin revisión por pares (+73 g/d/cabeza) y con revisión por pares (+115 g/d/cabeza), en estudios realizados en Norteamérica (+100 g/d/cabeza), en estudios con razas europeas de ganado vacuno de carne (+119 g/d/cabeza) y de novillos (+91 g/día/cabeza), en estudios con alimentación animal individual (+100 g/d/cabeza), en estudios con ensilado de maíz suministrado (+142 g/d/cabeza), en estudios con un periodo de alimentación ≤ 80 días (+101 g/día/cabeza) y en estudios con suministro de ULC $\leq 1\%$ MS en la dieta (+81 g/día/cabeza). No hubo ningún sesgo de publicación en los estudios usados para analizar el efecto de la ULC en la GPV del ganado vacuno de carne (Apéndice A, Figura A1).

Tabla 3. Resumen de las estimaciones del tamaño del efecto, para la ganancia de peso en vivo (kg/día/cabeza) en ganado vacuno de carne, alimentado con dieta control y dieta con ULC en una metaanálisis de efectos aleatorios.

Grupos/ Subgrupos 1	Número de comparaciones	Estimaciones del tamaño del efecto				Tests de heterogeneidad				
		DMB (95% IC)	EE	Valor P	DME (95% IC)	EE	Valor P	Q	Valor P	I ² (%)
Todos los ensayos	33	0.092 (0.037, 0.147)	0.028	0.001	0.354 (0.126, 0.581)	0.116	0.002	72.51	<0.001	55.87
					Fase de producción					
Crecimiento	15	0.134 (0.036, 0.232)	0.050	0.007	0.653 (0.183, 1.123)	0.240	0.006	48.23	<0.001	70.97
Acabado	18	0.060 (−0.002, 0.121)	0.031	0.056	0.310 (0.088, 0.532)	0.113	0.006	23.49	0.134	27.64
					Revisión por pares					
No	16	0.073 (0.016, 0.129)	0.001	0.011	0.386 (0.193, 0.579)	0.098	<0.001	18.56	0.234	19.18
Si	17	0.115 (0.014, 0.217)	0.003	0.026	0.564 (0.076, 1.052)	0.249	0.024	52.30	<0.001	69.41
					Localidad del estudio					
América del Norte ²	22	0.100 (0.024, 0.177)	0.039	0.010	0.435 (0.087, 0.782)	0.177	0.014	49.56	<0.001	57.62
					Raza					
Ganado vacuno europeo ³	25	0.119 (0.057, 0.181)	0.032	<0.001	0.491 (0.226, 0.755)	0.135	<0.001	54.51	<0.001	55.97
					Grupo por método de alimentación					
Individual	20	0.100 (0.026, 0.174)	0.038	0.008	0.327 (0.074, 0.581)	0.129	0.011	46.76	<0.001	59.37
Corral	13	0.080 (−0.005, 0.166)	0.043	0.064	0.455 (−0.065, 0.976)	0.266	0.086	25.62	0.012	53.16

Table 3. Continuación.

Grupos/ Subgrupos 1	Número de comparaciones	Estimaciones del tamaño del efecto				Tests de heterogeneidad				
		DMB (95% IC)	EE	Valor P	DME (95% IC)	EE	Valor P	Q	Valor P	I ² (%)
Ensilado de maíz en la dieta										
No	15	0.024 (−0.023, 0.071)	0.024	0.311	0.141 (−0.080, 0.362)	0.113	0.211	10.04	0.759	0.00
Si	18	0.142 (0.061, 0.223)	0.041	0.001	0.607 (0.247, 0.967)	0.184	0.001	52.39	<0.001	67.55
Período de alimentación (días)										
≤80	22	0.101 (0.044, 0.159)	0.029	0.001	0.377 (0.125, 0.630)	0.129	0.003	41.71	0.005	49.65
>80	11	0.089 (−0.025, 0.203)	0.058	0.128	0.338 (−0.151, 0.827)	0.249	0.175	27.49	0.002	63.62
Dosificación de la ULC (%MS en la dieta)										
≤1.00	22	0.081 (0.026, 0.137)	0.028	0.004	0.399 (0.167, 0.631)	0.118	0.001	34.32	0.034	38.80
>1.00	11	0.109 (−0.038, 0.256)	0.075	0.145	0.403 (−0.107, 0.913)	0.260	0.122	32.20	<0.001	68.94
Sexo										
Novillos	28	0.091 (0.029, 0.153)	0.032	0.004	0.372 (0.098, 0.646)	0.140	0.008	64.172	<0.001	57.93

¹ - Los estudios fueron estratificados en grupos y subgrupos según los factores de estudio que podían influir en el desenlace del rendimiento. Los subgrupos con <10 comparaciones están excluidos del análisis; ² - Estudios realizados en EE UU y México; ³- Incluyen: Charolais, Limousine, Hereford, Angus y cruce con Angus. ULC (SRU): urea de liberación controlada; DMB (RMD): diferencia de medias bruta y su intervalo de confianza de 95% asociado; DME (SMD): diferencia de medias estandarizada y su intervalo de confianza de 95% asociado; EE (SE): error estándar. Q: estadística chi-cuadrado y nivel asociado de significación (p-value); I²: porcentaje de variación.

3.5 Efecto de la urea de liberación controlada en la eficiencia alimentaria del ganado vacuno de carne.

Suplementar con ULC reforzó significativamente la EA del ganado vacuno de carne en +12 g GPV/kg IMS/cabeza en todos los estudios (Tabla 4 y Figura S4). Hubo una variación en el conjunto de datos de EA en todos los estudios como demuestran las estadísticas Q e I_2 . El metaanálisis de los subgrupos indicaron que la inclusión de ULC en la dieta incrementó la EA en los estudios realizados en ganado vacuno en crecimiento (+18 g GPV/kg IMS/cabeza) y en ganado en acabado(+8 g GPV/kg IMS/cabeza), en estudios sin revisión por pares (+7 g GPV/kg IMS /cabeza) y con revisión por pares (+16 g GPV/kg IMS/cabeza), en estudios realizados en Norteamérica (+14 g GPV/kg IMS/ cabeza), en estudios realizados en razas europeas de ganado vacuno de carne (+15 g GPV/kg IMS/ cabeza) y de novillos (+13 g GPV/ kg IMS/ cabeza), en estudios con alimentación animal individual (+12 g GPV/kg IMS/cabeza) y alimentación en corral (+12 g GPV/ kg IMS/cabeza), estudios con suministro de ensilado de maíz (+17 g GPV/kg IMS/ cabeza), estudios con un periodo de alimentación de ≤ 80 días (+11 g GPV/kg IMS/cabeza), o un periodo de alimentación de > 80 días (+14 g GPV/kg IMS/cabeza) y estudios con suplementación de ULC $\leq 1\%$ MS en la dieta (+11 g GPV/kg IMS/cabeza). No hubo sesgo de publicación en los estudios usados para analizar el efecto de la ULC en la EA del ganado vacuno de carne (Apéndice A, Figura A1)

3.6 Los impactos medioambientales y económicos de suplementar con urea de liberación controlada en la producción de ganado vacuno de carne.

El análisis de la simulación indicó que la eficacia de la ULC en aumentar la GPV y la EA en el ganado vacuno de carne mejoró el impacto de la producción de carne de vacuno sobre el medio ambiente. Como se muestra en la Tabla 5, suplementar ULC a 1000 cabezas de ganado vacuno en crecimiento-acabado para ganar 200 kg de peso en vivo redujo el número de días en pienso hasta el matadero en 9 días y dio como resultado una ganancia económica significativa de 16.500 € atribuidos a una reducción del coste de alimentación. Asimismo, la suplementación con ULC redujo las emisiones inherentes a la alimentación en 111,5 toneladas de CO₂ eq, aportando aproximadamente una reducción de 2,2% de la huella de carbono de la producción de carne de vacuno.

Tabla 4. Resumen de las estimaciones del tamaño del efecto, para la ganancia de peso en vivo (kg/día/cabeza) en ganado vacuno de carne, alimentado con dieta control y dieta con ULC en una metaanálisis de efectos aleatorios.

Grupos/ Subgrupos 1	Número de comparaciones	Estimaciones del tamaño del efecto					Tests de heterogeneidad			
		DMB (95% IC)	EE	Valor P	DME (95% IC)	EE	Valor P	Q	Valor P	I ² (%)
Todos los ensayos	32	0.012 (0.005, 0.019)	0.003	<0.001	0.908 (0.417, 1.400)	0.251	<0.001	289.85	<0.001	89.31
					Fase de producción					
Crecimiento	15	0.018 (0.001, 0.035)	0.009	0.036	1.303 (0.366, 2.240)	0.478	0.006	150.81	<0.001	90.72
Acabado	17	0.008 (0.002, 0.014)	0.003	0.012	0.775 (0.279, 1.271)	0.253	0.002	98.08	<0.001	83.69
					Revisión por pares					
No	15	0.007 (0.000, 0.014)	0.004	0.037	0.586 (−0.037, 1.208)	0.318	0.065	152.76	<0.001	90.84
Si	17	0.016 (0.004, 0.029)	0.006	0.008	1.372 (0.559, 2.185)	0.415	0.001	116.76	<0.001	86.30
					Localidad del estudio					
América del Norte ²	22	0.014 (0.002, 0.026)	0.006	0.025	0.978 (0.398, 1.557)	0.296	0.001	118.72	<0.001	82.31
					Raza					
Ganado vacuno europeo ³	25	0.015 (0.006, 0.023)	0.004	0.001	1.146 (0.598, 1.695)	0.280	<0.001	207.53	<0.001	88.44
					Grupo por método de alimentación					
Individual	20	0.012 (0.003, 0.021)	0.004	0.007	0.900 (0.258, 1.542)	0.327	0.006	255.00	<0.001	92.55
Corral	12	0.012 (0.004, 0.021)	0.004	0.005	0.909 (0.238, 1.581)	0.342	0.008	32.43	0.001	66.09

Table 4. Continuación.

Grupos/ Subgrupos 1	Número de comparaciones	Estimaciones del tamaño del efecto					Tests de heterogeneidad			
		DMB (95% IC)	EE	Valor P	DME (95% IC)	EE	Valor P	Q	Valor P	I ² (%)
Ensilado de maíz en la dieta										
No	14	0.006 (−0.000, 0.012)	0.003	0.054	0.469 (−0.147, 1.086)	0.315	0.136	80.17	<0.001	83.79
Si	18	0.017 (0.006, 0.027)	0.005	0.002	1.330 (0.614, 2.045)	0.365	<0.001	180.63	<0.001	90.59
Período de alimentación (días)										
≤80	21	0.011 (0.005, 0.017)	0.003	<0.001	0.838 (0.298, 1.378)	0.276	0.002	169.44	<0.001	88.20
>80	11	0.014 (−0.003, 0.031)	0.009	0.114	1.269 (0.150, 2.387)	0.571	0.026	108.74	<0.001	90.803
Dosificación de la ULC (%MS en la dieta)										
≤1.00	22	0.011	0.003	<0.001	1.032 (0.531, 1.533)	0.255	<0.001	141.91	<0.001	85.21
>1.00	10	0.014 (−0.006, 0.034)	0.010	0.164	0.615 (−0.352, 1.582)	0.493	0.212	82.89	<0.001	89.14
Sexo										
Novillos	27	0.013 (0.005, 0.021)	0.004	0.002	0.968 (0.397, 1.540)	0.292	0.001	233.31	<0.001	88.85

¹ - Los estudios fueron estratificados en grupos y subgrupos según los factores de estudio que podían influir en el desenlace del rendimiento. Los subgrupos con <10 comparaciones están excluidos del análisis; ² - Estudios realizados en EE UU y México; ³- Incluyen: Charolais, Limousine, Hereford, Angus y cruce con Angus. ULC (SRU): urea de liberación controlada; DMB (RMD): diferencia de medias bruta y su intervalo de confianza de 95% asociado; DME (SMD): diferencia de medias estandarizada y su intervalo de confianza de 95% asociado; EE (SE): error estándar. Q: estadística chi-cuadrado y nivel asociado de significación (p-value); I²: porcentaje de variación.

Tabla 5. Impactos económicos y medioambientales de la suplementación con urea de liberación controlada (ULC) en la producción de ganado vacuno de carne en crecimiento-acabado.

Elemento analizado	Valor basal	ULC	Diferencia	%Cambio
Análisis del impacto económico ¹				
Ración requerida para ganar 200 kg PV (kg MS/cabeza)	1282.05	1204.82	-77.23	6.0
Días en pienso hasta el sacrificio (días)	143	134	-9	6.3
Uso total de alimento (kg/cabeza)	1831.50	1721.17	-110.33	6.0
Coste de alimentación (€/cabeza)	274.73	258.18	-16.55	6.0
Coste total de alimentación (€/1000 cabezas)	274,730	258,180	-16,550	6.0
Análisis del impacto medioambiental				
Intensidad de las emisiones atribuidas al alimento (kg CO ₂ eq por producción de proteína de carne de vacuno/cabeza) ²	1857.6	1746.1	111.5	6.0
Intensidad de las emisiones (kg CO ₂ eq por producción de proteína de carne de vacuno/cabeza)	5.16	5.0485	0.1115	2.2
Total de la intensidad de emisiones (toneladas CO ₂ eq por producción de proteína de carne de vacuno/1000 cabezas)	5160	5048.5	111.5	2.2

¹-Este análisis sólo considera el beneficio económico, derivado de una reducción del coste de la ración, debido al efecto positivo de la ULC sobre el rendimiento del ganado vacuno de carne. ²- La intensidad de las emisiones está calculada en relación con la producción de proteína de carne de vacuno. Los datos sobre la intensidad media global de las emisiones fueron 300 kg CO₂ eq por kg de proteína y, como promedio, un 36% de las emisiones del vacuno de carne, atribuidas al alimento, fue de 108 kg CO₂ eq por producción de proteína. Por lo tanto la intensidad de las emisiones atribuida al uso de alimento = producción de proteína de carne de vacuno x 108. Para la dieta con ULC, la intensidad de las emisiones atribuidas al alimento fue corregida a la baja en torno a un -6% en uso de pienso simulado.

4. DISCUSIÓN

Existe una necesidad crucial de estudios de investigación bien diseñados, con resultados eficaces que podrían apoyar a nutricionistas animales y a productores para tomar las decisiones más rentables sobre la elección de tecnologías alimentarias de aplicación en sus operaciones ganaderas. Según nuestros conocimientos, el presente estudio es el primero en aplicar una técnica meta analítica para proporcionar una revisión objetiva retrospectiva del efecto de una suplementación con ULC sobre el rendimiento del ganado vacuno de carne. La ULC evaluada en este estudio tiene un contenido de nitrógeno del 41%, que puede suministrar un equivalente de PB de 256% a partir de una fuente de NNP. Esto permite la reformulación de dietas con ULC de tal manera que se pueda proporcionar un menor nivel de inclusión de fuentes de proteína vegetal, como la harina de soja (PB, 40 – 48%). Por lo tanto, la ULC concentra la fracción de nitrógeno de la dieta y suministra nitrógeno de degradación lenta al rumen. Esto proporciona disponibilidad sostenida de amoníaco en el ambiente ruminal para sincronizar la obtención de energía fermentable con una síntesis óptima de proteína microbiana [21]. Una mejora de la PBM ruminal se espera que aumente el suministro de proteína metabolizable y, por consiguiente, potencie el rendimiento productivo de los rumiantes [22]. Galyean [23] observó que la proteína suplementaria proveniente de fuentes de PDR, comparada con las fuentes de PNDR, producía resultados más consistentes para mejorar la respuesta del rendimiento del ganado vacuno de carne en acabado. Además, los autores subrayaron la importancia crucial de tener en cuenta las necesidades de nitrógeno de los microorganismos ruminales, cuando sean calculados los requerimientos de proteína del ganado vacuno de carne con un sistema de proteína metabolizable. Por lo tanto, la aplicación de ULC como fuente de NNP ha atraído creciente interés por la nutrición en los rumiantes para satisfacer las necesidades de nitrógeno de los microorganismos ruminales.

Los resultados de este metaanálisis demostraron que la suplementación con ULC no afectó globalmente ni al IMS ni a la IPD del ganado vacuno de carne en ninguno de los ensayos. Varios estudios sobre la sustitución de las fuentes de proteína vegetal por ULC han demostrado que la suplementación con ULC no influyó en la IMS del ganado vacuno de carne [24-27]. Sin embargo, los estudios que compararon la urea no recubierta con la ULC en dietas basadas en forrajes y en RTM han demostrado que las dietas con ULC aumentaron la IMS del ganado ovino y del vacuno debido al aumento de la digestión de fibra y la digestibilidad de los nutrientes [28-30]. La digestibilidad del alimento es considerada como uno de los motores fisiológicos de la IMS como consecuencia del efecto de la digestibilidad del alimento en aumentar la velocidad de tránsito ruminal de lo digerido [31]. La ausencia de efecto de la ULC sobre la digestibilidad del pienso podría en parte explicar el efecto no significativo sobre la IMS cuando las fuentes de proteína vegetal son parcialmente sustituidas por ULC [25,26]. El nivel de IPD está determinado por la IMS y el contenido de proteína en la dieta. Por eso, la ausencia de efecto de la ULC sobre la IPD a nivel global es en parte una consecuencia del efecto no significativo sobre la IMS. Sin embargo, una IPD más elevada fue observada en ganado vacuno en fase de crecimiento con dietas suplementadas con ULC, que podría

atribuirse a un aumento del nivel de proteína en las dietas con ULC (+0,9% MS; no se muestran los datos).

La ULC suplementaria aumentó la GPV y la EA del ganado vacuno de carne. Sin embargo, la GPV y la EA, contempladas en todos los estudios, fueron heterogéneas entre sí, sugiriendo que otros factores de manejo animal y alimentario podrían influir en el efecto observado de la ULC sobre la GPV y la EA del ganado vacuno de carne. No obstante, se observó una mejora consistente de la GPV y de la EA en virtud de varios factores de estudio, como los presentados junto con los resultados de los análisis de los grupos y subgrupos estratificados. El efecto positivo de la ULC sobre la GPV y la EA es posiblemente una respuesta a la sincronización mejorada del amoníaco y la energía fermentable, que incrementó la síntesis de proteína microbiana y el suministro de proteína metabolizable para el rendimiento del crecimiento. Cabe señalar que la suplementación con ULC tuvo un mayor efecto sobre la GPV y la EA cuando se suministró a vacuno de carne en crecimiento, comparado con el vacuno de carne en acabado. Esto, en parte, podría ser atribuido a la IPD más elevada en el ganado en crecimiento, considerando que la proteína es un nutriente crucial para el crecimiento. Además, esto podría ser debido a posibles diferencias en las especificaciones para las raciones administradas entre las dos fases de producción. Las dietas densas en energía normalmente se suministran en la fase de acabado para acelerar la ganancia de peso máximo y de rendimiento en carne, mientras que el ganado vacuno de carne en crecimiento recibe dietas menos densas en energía (generalmente basadas en forrajes frescos o conservados) para asegurar un crecimiento estable continuo del animal. De este modo, el impacto de las dietas de acabado al maximizar la tasa de crecimiento del vacuno de carne, podría haber ejercido un sutil efecto de enmascaramiento de la eficacia de la suplementación con ULC en el ganado en acabado. Además, las dietas para el ganado en crecimiento basadas en forrajes frescos o conservados son proclives a fluctuaciones en la calidad de la proteína [32], y se ha demostrado que la eficacia del N degradable suplementario es más pronunciada en dietas con una deficiente ingesta de proteína degradable y cuando la proteína metabolizable es un factor limitante [2,33]. Cabe añadir también que el ganado alimentado con dietas de crecimiento consume fuentes de proteína vegetal y de fibra, incluyendo la fuente principal de energía (ensilado de maíz), que tiene una tasa de fermentación ruminal más lenta que los piensos concentrados usados en la fase de acabado. Por lo tanto, es posible que la sincronización del proceso de fermentación de carbohidratos y la disponibilidad de PDR de la ULC haya sido favorecida en las dietas de vacuno en crecimiento frente a las de acabado. Por otra parte, los estudios en los que se incluyó el ensilado de maíz como fuente de forraje en la dieta, mostraron una mejora de la GPV y de la EA frente a otras fuentes de forrajes. Esto sugiere que proporcionar ensilado de maíz como fuente de fibra es una estrategia alimentaria útil, para optimizar el efecto de la ULC en el rendimiento del ganado vacuno de carne. De hecho, el ensilado de maíz ha sido ampliamente usado como fuente de forraje para rumiantes debido a su energía digestible y su valor de digestibilidad elevados [34]. Por eso, el ensilado de maíz podría haber proporcionado carbohidratos fermentables, con una mejor sincronización con el amoníaco para optimizar la síntesis de proteína microbiana al suplementar ULC. En cambio, las fuentes de forraje con un bajo contenido de energía digestible o una baja tasa de fermentación pueden disminuir la utilización de amoníaco en la síntesis de proteína microbiana. De una amplia revisión de estudios *in vivo*, Givens y Rulquin [35] resumieron que las fuentes de forraje podrían influir en la utilización de nitrógeno en la síntesis de proteína microbiana ruminal. Los autores observaron que las dietas basadas en ensilado de maíz reforzaron la síntesis de proteína microbiana frente a dietas basadas en ensilados de hierba y de leguminosas.

Varios estudios han evaluado distintos rangos de suplementación con ULC, con resultados inconsistentes en el rendimiento del ganado vacuno de carne [26,27,36]. La variación en la utilización de niveles de urea puede deberse a varios factores, como la disponibilidad continua de carbohidratos fermentables, el nivel de PDR y los compuestos nitrogenados en la dieta basal, la pauta de alimentación – *ad libitum* o alimentación restringida – y adaptación a la urea suplementada [37]. En el presente estudio, estratificamos las investigaciones en dos grupos ($\leq 1,00\%$ y $>1\%$ MS en la dieta) basados en el nivel de ULC suministrada en la dieta. Es interesante anotar que los estudios suplementados con ULC $\leq 1,00\%$ MS en la dieta, demostraron con solvencia un aumento significativo de la GPV y de la EA, mientras que no se observó ninguna mejora significativa en el ganado vacuno de carne suplementado con ULC $>1\%$ MS en la dieta. La dosis promedio de ULC en todos los estudios evaluados en este metaanálisis fue de 0,88% MS en la dieta. De acuerdo con nuestra observación, Shain et al. [38] demostraron que la urea suplementada superior a 0,88% MS (comparada con 1,34% o 1,96% MS en las dietas) en dietas de acabado con maíz seco laminado no tuvieron ningún efecto beneficioso sobre el rendimiento de novillos. En el caso de la ULC de uso comercial evaluada en este estudio, la dosis recomendada para suministrar NNP en las dietas para vacuno de carne es 10g/kg IMS/día/cabeza. En ganado vacuno de carne en fase de acabado, que esté consumiendo 9,5 kg MS, la dosis de ULC recomendada puede llevarse a un nivel de inclusión de $<1,00\%$ MS en la dieta. Esto sugiere

que sería posible reformular dietas dentro del rango de dosis de la ULC ($\leq 1,00\%$) que optimiza el rendimiento del ganado vacuno, inclusive en el ganado vacuno de carne en acabado.

La producción de carne de vacuno causa la mayor huella de carbono medioambiental, comparada con otras producciones ganaderas, aportando aproximadamente un 41% de las emisiones de gases de efecto invernadero en el sector ganadero global [20]. Existe una amplia diversidad en la eficiencia de los sistemas de producción de carne de vacuno, que crea oportunidades para reducir los impactos medioambientales globales de la producción cárnica [39]. Cada vez más se reconoce la eficiencia alimentaria como una herramienta inestimable para reducir la huella de carbono medioambiental de la producción de carne de vacuno, debido a su efecto beneficioso al mejorar la eficiencia en el uso de recursos por unidad producida y en la reducción de las emisiones de metano entérico [40,41]. Cabe señalar que existe una relación positiva entre la EA y la huella medioambiental y la sostenibilidad económica, lo que sugiere que las estrategias que mejoran la EA del ganado vacuno de carne pueden desembocar en una mejora simultánea de los impactos medioambientales y en la rentabilidad de la producción de carne de vacuno [41]. Las estrategias dietéticas y las tecnologías nutricionales han demostrado ser herramientas potenciales para mejorar la EA y reducir los impactos sobre el medio ambiente de la producción de carne de vacuno [42,44]. De acuerdo con estas afirmaciones, el análisis de la simulación empleado en este estudio demostró que los efectos positivos de la ULC sobre la GPV y la EA disminuyeron los días de engorde hasta el sacrificio y mejoraron la rentabilidad de la producción de carne de vacuno mediante una reducción de un 6% de los costes de alimentación. De manera similar, el impacto de la ULC sobre la GPV y la EA redujeron la huella medioambiental de la producción de carne de vacuno en un 2,2% (-111,5 toneladas de CO₂ eq) debido a una reducción de las emisiones asociadas al uso del alimento. En perspectiva, este ahorro de emisiones de carbono es equivalente a la huella de carbono de una persona que viaja en 134 vuelos transatlánticos entre Londres y Nueva York o a una media anual de 73 coches nuevos menos en circulación en el Reino Unido. Merece la pena destacar que ulteriores mejoras en la rentabilidad y en los impactos medioambientales, pueden ser alcanzadas partir de la reducción de los días de engorde hasta el sacrificio. Esto se debe a que el descenso del número de días de engorde hasta el sacrificio podría tener como resultado la reducción de otros costes económicos y ecológicos, como los de la mano de obra, los insumos de combustible y energía asociados rutinariamente a la producción de carne de vacuno. Sin embargo, los beneficios adicionales de un menor número de días de engorde hasta el sacrificio no fueron evaluados en la simulación actual. Por lo tanto, más estudios basados en la modelización completa de la explotación serían necesarios para investigar el efecto holístico de suplementar con ULC en la producción de carne de vacuno a escala de la explotación.

5. Conclusiones

Estos resultados del metaanálisis demostraron que la suplementación con ULC puso de manifiesto una mejora consistente de la GPV y de la EA del ganado vacuno de carne, en virtud de varios factores de estudio. La inclusión de ensilado de maíz como fuente de fibra en las dietas del ganado vacuno potenció los efectos positivos de la ULC sobre la GPV y la EA. Los efectos positivos de la ULC sobre el rendimiento del ganado vacuno de carne podría mejorar la sostenibilidad económica y medioambiental de la producción de carne de vacuno.

Materiales complementarios: Los siguientes están disponibles online en <http://www.mdpi.com/2076-2615/10/4/657/s1>. **Tabla S1.** Lista de referencia de estudios excluidos del metaanálisis. **Figura S1:** Gráfica de Forest de los efectos de la ULC suplementada sobre la ingesta de materia seca (IMS, kg/d) del ganado vacuno de carne en crecimiento-acabado. **Figura S2:** Gráfica de Forest del efecto de la suplementación con urea de liberación controlada sobre la ingesta de proteína en la dieta (IPD, kg/d) del ganado vacuno de carne en crecimiento-acabado. **Figura S3:** Gráfica de Forest del efecto de la suplementación con urea de liberación controlada sobre la ganancia de peso en vivo (GPV, kg/d) del ganado vacuno de carne en crecimiento-acabado. **Figura S4:** Gráfica de Forest del efecto de la suplementación con urea de liberación controlada sobre la eficiencia alimentaria (EA, kg GPV/kg IMS) del ganado vacuno de carne en crecimiento-acabado.

Contribuciones de los autores: Conceptualización, S.A.A, H.W. y J.T.-P; metodología y custodia de datos, S.A.S.; investigación y análisis formal, S.A.S.; escritura – preparación del borrador original, S.A.S., escritura- revisión y edición, S.A.S., C.A.M., H.E.W. y J.T.-P; supervisión y administración del proyecto, C.A.M., H.E.W. y J.T.-P. Todos los autores han leído y están de acuerdo con la versión publicada del manuscrito.

Financiación: Esta investigación no ha recibido ninguna financiación externa.

Agradecimientos: Los autores quieren agradecer a Nancy D. Nguyen, ex profesora de la Facultad de Matemáticas y Estadística, University College Dublin, Irlanda, por haber revisado el modelo de metaanálisis y los resultados.

Conflictos de interés: Los autores son empleados de Alltech, que produce y comercializa Optigen®, la urea de liberación controlada de uso comercial evaluada en este estudio.

Apéndice A

Tabla A1. Descripción de estudios usados en el metaanálisis, que examina el efecto de las dietas control (CON) y las suplementadas con urea de liberación controlada (ULC), sobre el desenlace de rendimiento del ganado vacuno de carne.

Referencia	Lugar	Fuente	Raza	Sexo	Pauta de alimentación	Fase de producción	Método de agrupación	Dosificación de la ULC (%MS en la dieta)	Periodo de alimentación
Agovino et al. [45]	Irlanda	Póster de conferencia	Desconocida	Novillas	Dieta basada en ensilado de maíz	Acabado	Animal	0.73	80
Cabrita [46]	Portugal	Póster de conferencia	Charolais × Limousine	Novillas	Dieta basada en maíz	Acabado	Animal	0.45	60
Corte et al. [24]	Brasil	Revista científica	Nellore	Novillos	Dieta basada en ensilado de caña de azúcar y bagazo/maíz	Acabado	Animal	1.80	75
Eweedah et al. [25]	Egipto	Revista científica	Holstein	Novillos	Dieta basada en ensilado de maíz	Crecimiento	Animal	0.61, 0.84	105
Ferres et al. [47]	Uruguay	Póster de conferencia	Hereford	Novillos	Dieta basada en ensilado de maíz	Acabado	Animal	0.52	65
Kononoff et al. [48]	EE UU	Revista científica	Holstein	Novillas	Dieta basada en ensilado de maíz/ heno de Timothy	Crecimiento	Animal	1.28, 1.78	140
Muro et al. [49]	Argentina	Póster de conferencia	Holstein	Novillas	Dieta basada en maíz/ heno de hierba	Crecimiento	Animal	1.23	60
Pinos-Rodríguez et al. [50]	México	Revista científica	Brown Swiss × Brahman	Novillos	Dieta basada en sorgo	Acabado	Animal	1.10	48
Sgoifo Rossi et al. [51]	Italia	Póster de conferencia	Charolais	Novillos	Dieta basada en ensilado de maíz	Acabado	Animal	0.42	100
Simeone et al. [52]	Uruguay	Póster de conferencia	Hereford	Novillos	Dieta basada en sorgo/ heno de raigrás	Crecimiento y acabado	Animal	1.0, 1.5	50
Tedeschi et al. [27]	EE UU	Revista científica	Cruce con Angus	Novillos	Dieta basada en ensilado de maíz	Crecimiento y acabado	Animal	0.4, 1.2, 0.3, 0.8	84
Wahrmund and Hersom [53]	EE UU	Informe	Angus	Novillos	Heno Bahía	Crecimiento	Animal	0.27, 0.25	42
Holder [54]	EE UU	Tesis de doctorado	Cruce con Angus	Novillos	Dieta basada en ensilado de maíz	Acabado	Corral	0.45, 0.9, 1.35	42
Holland and Jennings [55]	EE UU	Póster de conferencia	British crossbred	Novillos	Dieta basada en maíz	Acabado	Corral	0.43, 0.83	117
López-soto et al. [36]	México	Revista científica	Zebu, Angus, Hereford, Charolais	Novillos	Dieta basada en sorgo/ heno Sudangrás/granos de destilería	Acabado	Corral	0.80	70
Taylor-Edwards et al. [26]	EE UU	Revista científica	Cruce con Angus	Novillos	Dieta basada en ensilado de maíz	Crecimiento	Corral	0.4, 0.8, 1.2, 1.6	56
Manella et al. [56]	Brasil	Póster de conferencia	Nellore	Novillos	Dieta basada en ensilado de caña de azúcar	Acabado	Corral	1.80	80

Tabla A1. Datos de entrada usados en la simulación de los impactos económicos y medioambientales, de la suplementación con urea de liberación controlada (ULC) en la producción de ganado vacuno de carne en crecimiento-acabado.

Elemento analizado	Valor basal	ULC	Diferencia	%Cambio
Número de cabezas	1000	1000		
Ingesta de materia seca (kg MS/día/cabeza)	9	9		
Ganancia de peso vivo (GPV,kg/día/cabeza) ¹	1.400	1.492	+0.092	6.6
Eficiencia alimentaria (kg GPV/kg IMS/cabeza)	0.156	0.166	+0.010	6.4
Objetivo de ganancia de peso vivo (kg/cabeza) ²	200	200		
Rendimiento de carne magra (Kg/cabeza)	82	82		
Producción de proteína de carne de vacuno (kg/cabeza) ³	17.2	17.2		

¹La ganancia de peso vivo en el ganado vacuno de carne alimentado con dietas suplementadas con ULC, fue corregida basándose en los presentes resultados del metaanálisis, que mostraron un incremento promedio de +92 g/día/cabeza en la ganancia de peso vivo en el ganado vacuno de carne alimentado con una dieta suplementada con ULC. ² El rendimiento de carne fue calculado como una proporción del objetivo de ganancia de peso vivo (200 kg). Se asumió el rendimiento promedio de carne magra del ganado vacuno de carne, como el 41% del peso vivo de acuerdo con Holland et al. [57]. ³ La producción de proteína de carne de vacuno fue calculada como una proporción del rendimiento de carne magra. La carne de vacuno contenía un promedio de 21% de proteína. [58, 59]

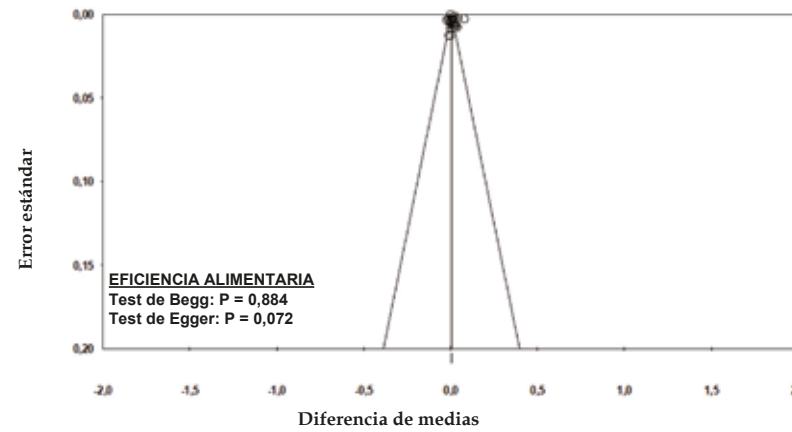
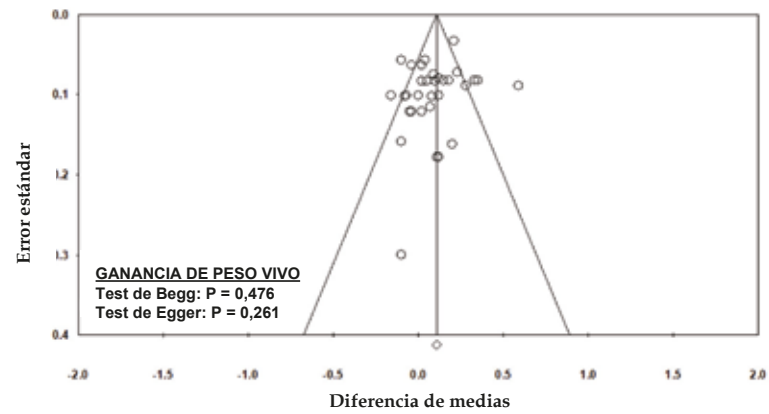
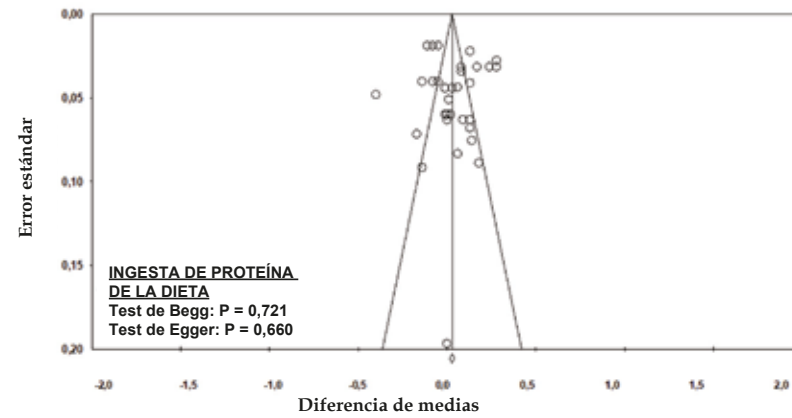
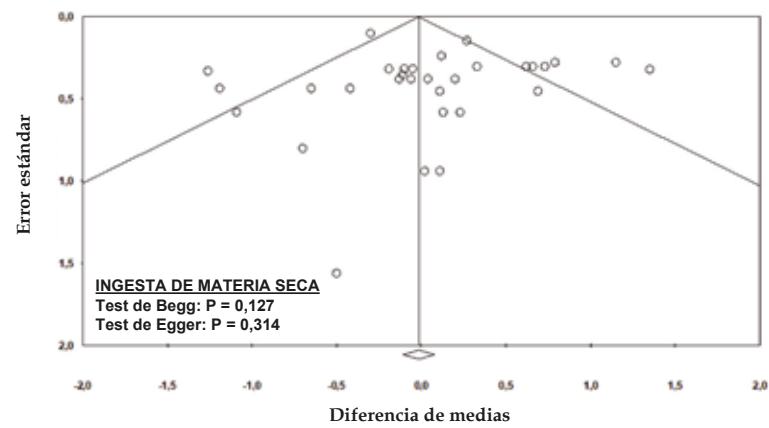


Figura A1. Las gráficas de embudo de la diferencia media bruta (diferencia en las medias) frente a sus errores estándar inversos y la significación estadística asociada (p -value) para comprobar, si hay sesgo de publicación de los estudios incluidos en el metaanálisis. Los círculos abiertos representan comparaciones de estudios individuales incluidos en el metaanálisis.

References

1. Loor, J.J.; Elolimy, A.A.; McCann, J.C. Dietary impacts on rumen microbiota in beef and dairy production. *Anim. Front.* **2016**, *6*, 22–29. [[CrossRef](#)]
2. Cherdthong, A.; Wanapat, M. Development of urea products as rumen slow-release feed for ruminant production: A review. *Aust. J. Basic Appl. Sci.* **2010**, *4*, 2232–2241.
3. Cutrignelli, M.I.; Infascelli, F.; Tudisco, R.; Calabrò, S.; Piccolo, V. *Protein Sources in Ruminant Nutrition*; INTECH Open Access Publisher: London, UK, 2011.
4. Lu, Z.; Tian, Y.; Shen, H. Dietary energy level promotes rumen microbial protein synthesis by improving the energy productivity of the ruminal microbiome. *Front. Microbiol.* **2019**, *10*, 847. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
5. Calsamiglia, S.; Ferret, A.; Reynolds, C.; Kristensen, N.B.; Van Vuuren, A. Strategies for optimizing nitrogen use by ruminants. *Animal* **2010**, *4*, 1184–1196. [[CrossRef](#)]
6. Cope, R.B. Nonprotein nitrogen (urea) and hyperammonemia. In *Veterinary Toxicology*; Elsevier: Cambridge, MA, USA, 2018; pp. 1093–1097.
7. Sinclair, L.; Blake, C.; Griffin, P.; Jones, G. The partial replacement of soybean meal and rapeseed meal with feed grade urea or a slow-release urea and its effect on the performance, metabolism and digestibility in dairy cows. *Animal* **2012**, *6*, 920–927. [[CrossRef](#)]
8. Reddy, P.R.K.; Kumar, D.S.; Rao, E.R.; Seshiah, C.V.; Sateesh, K.; Reddy, Y.P.K.; Hyder, I. Assessment of eco-sustainability vis-à-vis zoo-technical attributes of soybean meal (SBM) replacement with varying levels of coated urea in Nellore sheep (*Ovis aries*). *PLoS ONE* **2019**, *14*, 1–20.
9. Sauvant, D.; Schmidely, P.; Daudin, J.-J.; St-Pierre, N.R. Meta-analyses of experimental data in animal nutrition. *Animal* **2008**, *2*, 1203–1214. [[CrossRef](#)]
10. Lean, I.J.; Thompson, J.M.; Dunshea, F.R. A meta-analysis of zilpaterol and ractopamine effects on feedlot performance, carcass traits and shear strength of meat in cattle. *PLoS ONE* **2014**, *9*, 1–28. [[CrossRef](#)]
11. Wagner, J.; Engle, T.; Belknap, C.; Dorton, K. Meta-analysis examining the effects of *Saccharomyces cerevisiae* fermentation products on feedlot performance and carcass traits. *PAS* **2016**, *32*, 172–182.
12. Duffield, T.; Merrill, J.; Bagg, R. Meta-analysis of the effects of monensin in beef cattle on feed efficiency, body weight gain, and dry matter intake. *J. Anim. Sci.* **2012**, *90*, 4583–4592. [[CrossRef](#)]
13. Garcia-Gonzalez, R.; Tricarico, J.; Harrison, G.; Meyer, M.; McLeod, K.; Harmon, D.; Dawson, K. Optigen[®] is a sustained release source of non-protein nitrogen in the rumen. *J. Anim. Sci.* **2007**, *85*, 98.
14. Furukawa, T.A.; Barbui, C.; Cipriani, A.; Brambilla, P.; Watanabe, N. Imputing missing standard deviations in meta-analyses can provide accurate results. *J. Clin. Epidemiol.* **2006**, *59*, 7–10. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
15. Philbrook, H.T.; Barrowman, N.; Garg, A. Imputing variance estimates do not alter the conclusions of a meta-analysis with continuous outcomes: A case study of changes in renal function after living kidney donation. *J. Clin. Epidemiol.* **2007**, *60*, 228–240. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
16. Borenstein, M.; Hedges, L.; Higgins, J.; Rothstein, H. Meta-analysis Methods Based on Direction and p-Values. In *Introduction to Meta-Analysis*; John Wiley & Sons: Chichester, UK, 2009; pp. 325–330.
17. Lean, I.; Rabiee, A.; Duffield, T.; Dohoo, I. Invited review: Use of meta-analysis in animal health and reproduction: Methods and applications. *J. Dairy Sci.* **2009**, *92*, 3545–3565. [[CrossRef](#)]
18. Begg, C.B.; Mazumdar, M. Operating characteristics of a rank correlation test for publication bias. *Biometrics* **1994**, 1088–1101. [[CrossRef](#)]
19. Egger, M.; Smith, G.D.; Schneider, M.; Minder, C. Bias in meta-analysis detected by a simple, graphical test. *Bmj* **1997**, *315*, 629–634. [[CrossRef](#)]
20. Gerber, P.J.; Steinfeld, H.; Henderson, B.; Mottet, A.; Opio, C.; Dijkman, J.; Faluccci, A.; Tempio, G. *Tackling climate change through livestock: A global assessment of emissions and mitigation opportunities*; Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO): Rome, Italy, 2013.
21. Akay, V.; Tikofsky, J.; Holtz, C.; Dawson, K.A. Optigen[®] 1200: Controlled release of non-protein nitrogen in the rumen. In *Proceedings of the 20th Alltech Symposium; Lexington, USA, 23–24 May*; Alltech Inc.: Nicholasville, KY, USA; pp. 179–185.
22. Owens, F.; Qi, S.; Sapienza, D. Invited Review: Applied protein nutrition of ruminants—Current status and future directions. *PAS* **2014**, *30*, 150–179. [[CrossRef](#)]
23. Galyean, M. Protein levels in beef cattle finishing diets: Industry application, university research, and systems results. *J. Anim. Sci.* **1996**, *74*, 2860–2870. [[CrossRef](#)]

24. Corte, R.; Brito, F.; Leme, P.R.; Pereira, A.S.C.; Freitas, J.; Rennó, F.P.; Silva, S.d.L.; Tedeschi, L.O.; Nogueira Filho, J.C.M. The effects of partial substitution of soybean with urea or slow-release urea on finishing performance, meat quality, and digestion parameters of Nellore steers. *Anim. Prod. Sci.* **2018**, *58*, 2242–2248. [[CrossRef](#)]
25. Eweedah, N.; Bassuony, M.; EL-Razik, A.; El-Baky, M. Effect of supplementing different levels of Optigen as a replacer to soybean on the steers' performance. *J. Agric. Res.* **2016**, *42*, 129–143.
26. Taylor-Edwards, C.; Hibbard, G.; Kitts, S.; McLeod, K.; Axe, D.; Vanzant, E.; Kristensen, N.; Harmon, D. Effects of slow-release urea on ruminal digesta characteristics and growth performance in beef steers. *J. Anim. Sci.* **2009**, *87*, 200–208. [[CrossRef](#)]
27. Tedeschi, L.; Baker, M.; Ketchen, D.; Fox, D. Performance of growing and finishing cattle supplemented with a slow-release urea product and urea. *Can. J. Anim. Sci.* **2002**, *82*, 567–573. [[CrossRef](#)]
28. Galina, M.; Perez-Gil, F.; Ortiz, R.; Hummel, J.; Ørskov, R. Effect of slow release urea supplementation on fattening of steers fed sugar cane tops (*Saccharum officinarum*) and maize (*Zea mays*): Ruminal fermentation, feed intake and digestibility. *Livest. Prod. Sci.* **2003**, *83*, 1–11. [[CrossRef](#)]
29. Puga, D.; Galina, H.; Pérez-Gil, R.; Sanginés, G.; Aguilera, B.; Haenlein, G. Effect of a controlled-release urea supplement on rumen fermentation in sheep fed a diet of sugar cane tops (*Saccharum officinarum*), corn stubble (*Zea mays*) and King grass (*Pennisetum purpureum*). *Small Rumin. Res.* **2001**, *39*, 269–276. [[CrossRef](#)]
30. Xin, H.; Schaefer, D.; Liu, Q.; Axe, D.; Meng, Q. Effects of polyurethane coated urea supplement on in vitro ruminal fermentation, ammonia release dynamics and lactating performance of Holstein dairy cows fed a steam-flaked corn-based diet. *Asian-Australas. J. Anim. Sci.* **2010**, *23*, 491–500. [[CrossRef](#)]
31. Ketelaars, J.; Tolkamp, B. Toward a new theory of feed intake regulation in ruminants 1. Causes of differences in voluntary feed intake: Critique of current views. *Livest. Prod. Sci.* **1992**, *30*, 269–296. [[CrossRef](#)]
32. Longland, A. Nutritional assessment of forage quality. In *Forages and Grazing in Horse Nutrition*; Springer: New York, NY, USA, 2012; pp. 65–82.
33. Sindt, M.; Stock, R.; Klopfenstein, T.; Shain, D. Effect of protein source and grain type on finishing calf performance and ruminal metabolism. *J. Anim. Sci.* **1993**, *71*, 1047–1056. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
34. De Boever, J.; Cottyn, B.; De Brabander, D.; Vanacker, J.; Boucque, C.V. Prediction of the feeding value of maize silages by chemical parameters, in vitro digestibility and NIRS. *Anim. Feed Sci. Technol.* **1997**, *66*, 211–222. [[CrossRef](#)]
35. Givens, D.; Rulquin, H. Utilisation by ruminants of nitrogen compounds in silage-based diets. *Anim. Feed Sci. Technol.* **2004**, *114*, 1–18. [[CrossRef](#)]
36. López-Soto, M.; Aguilar-Hernández, J.; Dávila-Ramos, H.; Estrada-Angulo, A.; Ríos, F.; Uriás-Estrada, J.; Barreras, A.; Calderón, J.; Plascencia, A. Effects of a combining feed grade urea and a slow-release product on performance, dietary energetics and carcass characteristics of steers fed finishing diets. *J. Appl. Anim. Res.* **2015**, *43*, 303–308. [[CrossRef](#)]
37. Council, N.R. *Urea and other nonprotein nitrogen compounds in animal nutrition*; National Academies: Washington, WA, USA, 1976.
38. Shain, D.; Stock, R.; Klopfenstein, T.J.; Herold, D. Effect of degradable intake protein level on finishing cattle performance and ruminal metabolism. *J. Anim. Sci.* **1998**, *76*, 242–248. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
39. Gerber, P.J.; Mottet, A.; Opio, C.I.; Falcucci, A.; Teillard, F. Environmental impacts of beef production: Review of challenges and perspectives for durability. *Meat Sci.* **2015**, *109*, 2–12. [[CrossRef](#)]
40. Waghorn, G.; Hegarty, R. Lowering ruminant methane emissions through improved feed conversion efficiency. *Anim. Feed Sci. Technol.* **2011**, *166*, 291–301. [[CrossRef](#)]
41. Kenny, D.; Fitzsimons, C.; Waters, S.; McGee, M. Invited review: Improving feed efficiency of beef cattle—the current state of the art and future challenges. *Animal* **2018**, *12*, 1815–1826. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
42. Kebreab, E.; Liedke, A.; Caro, D.; Deimling, S.; Binder, M.; Finkbeiner, M. Environmental impact of using specialty feed ingredients in swine and poultry production: A life cycle assessment. *J. Anim. Sci.* **2016**, *94*, 2664–2681. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
43. Capper, J.L.; Hayes, D.J. The environmental and economic impact of removing growth-enhancing technologies from US beef production. *J. Anim. Sci.* **2012**, *90*, 3527–3537. [[CrossRef](#)]
44. Salami, S.; Luciano, G.; O'Grady, M.; Biondi, L.; Newbold, C.; Kerry, J.; Priolo, A. Sustainability of feeding plant by-products: A review of the implications for ruminant meat production. *Anim. Feed Sci. Technol.* **2019**, *251*, 37–55. [[CrossRef](#)]

45. Agovino, M.; Warren, H.; Giggins, G. Effect of Optigen® on finishing heifers. In *Scientific poster presented at the 29th Alltech Symposium, Lexington, KY, USA, 19–22 May*; Alltech Inc.: Nicholasville, KY, USA, 2013.
46. Cabrita, R. Optigen® improves performance and profitability in intensive beef cattle production. In *Scientific poster presented at the 27th Alltech Symposium, Lexington, KY, USA, 12–25 May*; Alltech Inc.: Nicholasville, KY, USA, 2011.
47. Ferres, A.; Sabbia, J.; Manella, M. Replacement of vegetable protein with Optigen® at a commercial feedlot in Uruguay. In *Scientific poster presented at the 26th Alltech Symposium, Lexington, KY, USA, 16–19 May*; Alltech Inc.: Nicholasville, KY, USA, 2010.
48. Kononoff, P.; Heinrichs, A.J.; Gabler, M. The effects of nitrogen and forage source on feed efficiency and structural growth of prepubertal holstein heifers. *PAS* **2006**, *22*, 84–88. [[CrossRef](#)]
49. Muro, E.; Delia, C.; Manella, M. Field evaluation of concentrate diets formulated with Optigen® and urea as the main source of crude protein, compared with sunflower mea. In *Scientific Poster Presented at the 27th Alltech Symposium, Lexington, KY, USA, 12–25 May*; Alltech Inc.: Nicholasville, KY, USA, 2011.
50. Pinos-Rodríguez, J.M.; Peña, L.Y.; González-Muñoz, S.S.; Bárcena, R.; Salem, A. Effects of a slow-release coated urea product on growth performance and ruminal fermentation in beef steers. *Ital. J. Anim. Sci.* **2010**, *9*, e4. [[CrossRef](#)]
51. Sgoifo Rossi, C.; Compiani, R.; Baldi, G.; Vandoni, S.; Agovino, M. Effects of slow-release nitrogen (Optigen®) in beef cattle. In *Scientific poster presented at the 29th Alltech Symposium, Lexington, KY, USA, 19–22 May*; Alltech Inc.: Nicholasville, KY, USA, 2013.
52. Simeone, A.; Beretta, V.; Elizade, J.; Sabbia, J. Replacing sunflower meal with Optigen® in high grain feedlot diets: Response of calves and steers. In *Scientific poster presented at the 25th Alltech Symposium, Lexington, KY, USA, 19–22 May*; Alltech Inc.: Nicholasville, KY, USA, 2009.
53. Wahrmond, J.; Hersom, M. *Co-product and Rumen Degradable Protein Supplementation of Beef Steers Fed Bahiagrass Forage*; 2009 Florida Beef Report; University of Florida: Gainesville, FL, USA, 2009.
54. Holder, V. The effects of slow release urea on nitrogen metabolism in cattle. PhD Thesis, University of Kentucky, Lexington, KY, USA, October 2012. Available online: https://uknowledge.uky.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1004&context=animalsci_etds (accessed on 15 August 2019).
55. Holland, B.; Jennings, J. Using Optigen® to replace soybean meal nitrogen in dry-rolled corn-based finishing diets for beef steers. In *Scientific poster presented at the 27th Alltech Symposium, Lexington, KY, USA, 12–25 May*; Alltech Inc.: Nicholasville, KY, USA, 2011.
56. Manella, M.; Matsuda, E.; Carvalho, F. Replacing vegetable protein in supplements with Optigen® II in beef steers fed sugar cane silage as the sole forage. In *Scientific poster presented at the 23rd Alltech Symposium, Lexington, KY, USA, 20–23 May*; Alltech Inc.: Nicholasville, KY, USA, 2007.
57. Holland, R.; Loveday, D.; Ferguson, K. *How Much Meat to Expect from a Beef Carcass*; University of Tennessee Institute of Agriculture: Tennessee, TN, USA, 2014.
58. Pereira, P.M.d.C.C.; Vicente, A.F.d.R.B. Meat nutritional composition and nutritive role in the human diet. *Meat Sci.* **2013**, *93*, 586–592. [[CrossRef](#)]
59. Williams, P. Nutritional composition of red meat. *Nutr. Diet.* **2007**, *64*, S113–S119. [[CrossRef](#)]

