



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CONKAL
CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA Y EVALUACIÓN
NUTRITIVA DEL SARGAZO EN PEQUEÑOS RUMIANTES

TESIS

Que presenta:

Luis Alberto Canul Ku

Como requisito parcial para obtener el grado de:

Doctor en Ciencias en Agricultura Tropical Sustentable

Director de tesis:

Dr. Ángel Trinidad Piñeiro Vázquez

Conkal, Yucatán, México

Agosto, 2024



TecNM

Conkal, Yucatán, México, a 30 de agosto de 2024

El comité de tesis del candidato a grado: Luis Alberto Canul Ku, constituido por los CC. Dr. Ángel Trinidad Piñeiro Vázquez, Dr. Einar Vargas Bello Pérez, Dra. Ingrid Abril Valdivieso Pérez, Dr. Fernando Casanova Lugo, Dr. Edgar Aguilar Urquizo y Dr. José Roberto Sanginés García, habiéndose reunido con el fin de evaluar el contenido teórico-metodológico y de verificar la estructura y formato de la tesis titulada: **Caracterización fisicoquímica y evaluación nutritiva del sorgo en pequeños rumiantes**, que presenta como requisito parcial para obtener el grado de Doctor en Ciencias en Agricultura Tropical Sustentable, según lo establece el Capítulo 2, inciso 2.13.3, de los Lineamientos para la Operación de los Estudios de Posgrado en el Sistema Nacional de Institutos Tecnológicos, dictaminaron su aprobación para que pueda ser presentada en el examen de grado correspondiente.

ATENTAMENTE

Dr. Ángel Trinidad Piñeiro Vázquez
Director de Tesis

Dr. Einar Vargas Bello Pérez
Co-director de Tesis

Dra. Ingrid Abril Valdivieso Pérez
Asesor de Tesis

Dr. Edgar Aguilar Urquizo
Asesor de Tesis

Dr. Fernando Casanova Lugo
Asesor de Tesis

Dr. José Roberto Sanginés García
Asesor de Tesis

Conkal, Yucatán, México a 30 de agosto de 2024.

DECLARATORIA DE PROPIEDAD

Declaro que la información contenida en las secciones de materiales y métodos, resultados y discusión de este documento, es producto del trabajo de investigación realizado durante mi estudio de posgrado y con base en los términos de la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial le pertenece patrimonialmente al Instituto Tecnológico de Conkal. En virtud de lo manifestado reconozco que los productos intelectuales o desarrollos tecnológicos que se deriven de lo correspondiente a dicha información son propiedad de la citada institución educativa.



Luis Alberto Canul Ku

AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primer lugar al Dr. Roberto Sanginés García por creer en mí y ser un pilar fundamental en mi formación doctoral. A mi estimado comité tutorial por su interés en el tema y apoyo, muchas gracias Dr. Ángel Trinidad Piñeiro Vázquez, Dr. Einar Vargas Bello Pérez, Dra. Ingrid Abril Valdivieso Pérez, Dr. Fernando Casanova Lugo y al Dr. Edgar Aguilar Urquizo. Al programa de Doctorado en Ciencias en Agricultura Tropical Sustentable de la División de Estudios de Postgrado e Investigación del Campus Conkal del Tecnológico Nacional de México. Al campus Zona Maya del Tecnológico Nacional de México, en especial al Dr. Fernando Casanova Lugo, por brindarme las facilidades en el Laboratorio de Estudios Avanzados en Agroecosistemas Tropicales y a los amigos que conocí y que me apoyaron durante mi estancia. Al campus Tizimín del Tecnológico Nacional de México, en especial al Dr. Jorge Rodolfo Canul Solís por las facilidades brindadas en el desarrollo del experimento *in situ*. A mis maestros por transmitirme sus conocimientos y experiencias. Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (Conahcyt) por la beca otorgada.

DEDICATORIA

Con todo mi cariño a mis padres por su amor y esfuerzo inquebrantable.

A mi esposa Yazmín por su tenacidad, paciencia y comprensión y ser mi equilibrio.

A mi hermana Vany por sus consejos y confiar en mi capacidad

En especial a mis adorados Yasser y Elías por estar siempre presentes durante esta travesía
y ser mi inspiración.

A los corderos y las vacas utilizados en el experimento.

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Página
I. CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1 Introducción	1
1.2 Revisión de literatura	2
1.2.1 Caracterización del sargazo	2
1.2.2 Composición química y mineral del sargazo y usos potenciales	3
1.2.3 Metabolitos secundarios y propiedades farmacológicas y nutraceúticas de las algas marinas	8
1.2.4 Uso potencial de algas en la alimentación de rumiantes	11
1.2.5 Efecto de las algas sobre la degradabilidad, cinética de producción de gas y CH ₄ <i>in vitro</i>	12
1.2.6 Efecto de la adición de algas marinas sobre la degradabilidad <i>in situ</i> de los nutrientes	15
1.2.7 Consumo y digestibilidad de las algas en rumiantes	16
1.2.8 Cambios en los patrones de fermentación en rumiantes suplementados con algas	17
1.2.9 Cambios en el microbioma ruminal por efecto de las algas marinas	19
1.2.10 Efecto de las algas marinas sobre el comportamiento productivo	22
1.2.11 Efecto del consumo de algas sobre la calidad de la carne y leche	23
1.2.12 Futuro del uso de algas marinas en la nutrición de rumiantes	25
1.3 Literatura citada	26
1.4 Hipótesis	45
1.5 Objetivos	46
1.5.1 Objetivo general	46
1.5.2 Objetivos específicos	46
II. CAPÍTULO 2. EFFECT OF PELAGIC SARGASSUM ON <i>IN VITRO</i> DRY MATTER AND ORGANIC MATTER DEGRADATION, GAS PRODUCTION, AND PROTOZOA POPULATION	47
2.1 Abstract	48
2.1 Introduction	48
2.2 Materials and methods	49

2.2.1 Location	49
2.2.2 Management of donor animals	49
2.2.3 Experimental design and treatments	49
2.2.4 Sample preparation	49
2.2.5 <i>In vitro</i> trial	50
2.2.6 <i>In vitro</i> gas production	50
2.2.7 Fermentation parameters	50
2.2.8 Degradability	51
2.2.9 Chemical analysis	51
2.2.10 Statistical analysis	51
2.3 Results	52
2.3.1 Chemical composition of sargassum and stargrass	52
2.3.2 Total gas production and characteristics of <i>in vitro</i> fermentation	53
2.3.3 Protozoa population	54
2.4 Discussion	54
2.4.1 Total gas production and <i>in vitro</i> fermentation kinetics	54
2.4.2 Population of protozoa	56
2.5 Conclusions	57
2.6 Referencias	58
III. CAPÍTULO 3.	EVALUATION OF DEGRADABILITY OF PELAGIC
	SARGASSUM UNDER <i>IN VITRO</i> AND <i>IN SITU</i>
	CONDITIONS FOR USE IN RUMINANT DIETS
3.1 Abstract	60
3.2 Introduction	62
3.2 Materials and methods	63
3.2.1 Ethical statement	63
3.2.2 Location	63
3.2.3 Animal management	63
3.2.4 Experimental design and treatments	64
3.2.5 <i>In vitro</i> gas production and protozoa count	65
3.2.6 Chemical analysis	66
3.2.7 Statistical analysis	66
3.3 Results	66

3.3.1 Chemical composition	66
3.3.2 <i>In situ</i> degradability of DM and OM	68
3.3.3 Total production of gas and characteristics of <i>in vitro</i> fermentation	69
3.3.4 Population of protozoa	72
3.4 Discusión	72
3.4.1 <i>In situ</i> degradability of DM and OM	72
3.4.2 Total production of gas and characteristics of <i>in vitro</i> fermentation	73
3.4.3 Population of protozoa	74
3.5 Conclusión	75
3.6 Referencias	76
IV.CAPÍTULO 4. IN VITRO FERMENTATION CHARACTERISTICS OF PELAGIC SARGASSUM FOR INCLUSION IN INTEGRAL DIETS FOR RUMINANTS	85
4.1 Abstract	86
4.2 Introduction	86
4.3 Materials and methods	87
4.3.1 Location	87
4.3.2 Animal management	87
4.3.2 Sample preparation	87
4.3.3 <i>In vitro</i> trial and experimental design	88
4.3.4 <i>In vitro</i> gas production	88
4.3.5 Fermentation parameters	89
4.3.6 Chemical analysis	89
4.3.7 Statistical analysis	90
4.4 Results	90
4.4.1 Chemical composition	90
4.4.2 Total gas production and characteristics of <i>in vitro</i> fermentation	91
4.4.3 Protozoan population	92
4.5 Discussion	93
4.5.1 Total gas production and characteristics of <i>in vitro</i> fermentation	93
4.5.2 Protozoa population	95
4.6 Conclusion	96
4.7 References	97

V. DISCUSIÓN GENERAL	106
VI. CONCLUSIONES GENERALES	110

ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

	Página
CAPÍTULO 1	
Tabla 1.1 Perfil de ácidos grasos de las especies que conforman el sargazo pelágico y de otras especies de algas marinas	5
Tabla 1.2 Composición mineral del sargazo pelágico y otras especies de macroalgas marinas	7
Tabla 1.3 Actividades biológicas de los compuestos bioactivos contenidos en las algas marinas	10
Tabla 1.4 Efecto de la especie y dosis de algas sobre los parámetros de fermentación <i>in vitro</i> con respecto al sustrato base	14
Tabla 1.5 Efecto de especie de alga y sustrato base sobre la degradabilidad <i>in situ</i>	15
Figura 1.1 Producción de CH ₄ entérico e hidrógeno (H ₂) en novillos alimentados con una dieta mixta alta en grano con inclusión creciente de <i>Asparagopsis taxiformis</i>	16
Tabla 1.6 Efecto de las algas sobre el consumo, digestibilidad y parámetros de fermentación en los rumiantes	18
Tabla 1.7 Efecto de las algas sobre el pH, NH ₃ y poblaciones microbianas en líquido ruminal	20
Tabla 1.8 Efecto de las algas sobre el pH, NH ₃ y poblaciones microbianas en el rumen	22
Tabla 1.9 Efectos de las algas sobre el rendimiento productivo y calidad de los productos en los rumiantes	24
CAPÍTULO 2	
Table 2.1 Chemical composition of <i>Sargassum</i> and Stargrass	51
Table 2.2 Ingredients and chemical composition of dietary treatments	51
Table 2.3 Macro and micro mineral contents of Stargrass and pelagic <i>Sargassum</i>	51
Table 2.4 Effect of <i>Sargassum</i> inclusion level on pH and total concentration of protozoa in ruminal fluid	52

Table 2.5	Effect of <i>Sargassum</i> inclusion level on <i>in vitro</i> total gas production, dry matter degradability, and organic matter degradability.	53
Figure 2.1	Effect of <i>Sargassum</i> inclusion level on <i>in vitro</i> total gas production (TGP) during 72 h of incubation.	53

CAPÍTULO 3

Table 3.1	Ingredients and chemical composition of dietary treatments used in <i>in situ</i> and <i>in vitro</i> experiments	67
Table 3.2	Effect of level of inclusion of sargassum on <i>in situ</i> ruminal degradability of dry matter	68
Table 3.3	Effect of level of inclusion of sargassum on <i>in situ</i> ruminal degradability of organic matter	69
Table 3.4	Effect of increasing levels of sargassum on characteristics of <i>in vitro</i> fermentation	70
Figure 3.1	Effect of dosage of sargassum on <i>in vitro</i> gas production over 72 hours of incubation	70
Figure 3.2	Effect of dosage of sargassum on <i>in vitro</i> gas production during each incubation period	71
Figure 3.3	Effect of dosage of sargassum on OM degradability	71
Table 3.5	Effect of level of inclusion of sargassum on total concentration of protozoa in ruminal fluid	72

CAPITULO 4

Tabla 4.1	Ingredients and chemical composition of the dietary treatments	90
Tabla 4.2	Effect of <i>Sargassum</i> inclusion level on <i>in vitro</i> total gas production, dry matter degradability, and organic matter degradability	91
Figura 4.1	Effect of dosage of <i>sargassum</i> on <i>in vitro</i> gas production (IVGP) during 72 h of incubation	92
Tabla 4.3	Effect of <i>sargassum</i> inclusion level on pH and total concentration of protozoa in rumen fluid	93

Resumen

El objetivo de la presente tesis doctoral fue evaluar el uso potencial del sargazo pelágico en la alimentación de rumiantes, con la finalidad de darle un aprovechamiento sustentable. El estudio constó de tres experimentos *in vitro* (experimentos 1, 3 y 4) y uno *in situ* (exp. 2). En cada ensayo se evaluaron cuatro niveles de inclusión (0, 10, 20 y 30%) del sargazo adicionados a diferentes sustratos basales e incubados durante 72 h. Los sustratos utilizados fueron: heno de pasto de *Cynodon nlemfuensis* (exp. 1), *Pennisetum purpureum* CV CT-115 (exp. 2 y 3), dieta integral basada en heno de CT-115, maíz, soya y melaza (exp. 4), respectivamente. El líquido ruminal se obtuvo de ovinos de pelo en pastoreo sin suplementación (exp. 1) y con suplementación (exp. 3 y 4). Para el ensayo *in situ* se utilizaron dos vacas canuladas en el rumen y alimentadas con una dieta alta en fibra. El análisis mineral demostró altas concentraciones de Cl, S, Ca, K, Zn y As. Los contenidos de FDN, FDA, PC y lignina del sargazo fueron influenciados por la época de colecta. En el exp. 1, la producción total de gas (PTG) disminuyó a las 48 h y la población de protozoarios a las 48 y 72 h fue menor, pero la degradabilidad de la MS (DMS) y MO (DMO) incrementó por efecto del sargazo. En el exp. 2, la DMS y DMO disminuyeron linealmente con el nivel de inclusión del sargazo. En el exp. 3, la PTG disminuyó a las 24, 48 y 72 h; sin embargo, la DMS, DMO y la población de protozoarios fueron similares. En el exp. 4, la PTG, DMS y DMO incrementaron linealmente con el nivel de sargazo, y la población de protozoarios únicamente disminuyó a las 24 h. Hubo un efecto diferencial en la PTG, DMS, DMO y en la población de protozoarios, que fue influenciado por el líquido ruminal. Se concluye que el sargazo pelágico puede incluirse en niveles del 20% al 30% bajo condiciones *in situ* e *in vitro*; no obstante, falta evaluar su uso en condiciones *in vivo*.

Palabras clave: sargazo pelágico, rumiantes, protozoarios, PTG, degradabilidad.

Abstract

The objective of this doctoral thesis was to evaluate the potential use of pelagic sargassum in ruminant feed, with the purpose of giving it a sustainable use. The study consisted of three *in vitro* experiments (experiments 1, 3 and 4) and one *in situ* experiment (exp. 2). In each experiment, four inclusion levels (0, 10, 20 and 30%) of sargassum added to different basal substrates and incubated for 72 h were evaluated. The substrates used were: *Cynodon nlemfuensis* grass hay (exp. 1), *Pennisetum purpureum* VC CT-115 (exp. 2 and 3), integral diet based on CT 115 hay, corn, soybean and molasses (exp. 4), respectively. Rumen fluid was obtained from grazing hair sheep without supplementation (exp. 1) and with supplementation (exp. 3 and 4). For the *in situ* trial, two cows cannulated in the rumen and fed with a high fiber diet were used. Mineral analysis showed high concentrations of Cl, S, Ca, K, Zn and As. NDF, FDA, CP and lignin contents of the sargassum were influenced by the time of collection. In exp. 1, total gas production (PTG) decreased at 48 h and the protozoan population at 48 and 72 h was lower, but DM (DMD) and OM (OMD) degradability increased due to the effect of sargassum. In exp. 2, DM and OMD decreased linearly with the level of sargassum inclusion. In exp. 3, the PTG decreased at 24, 48 and 72 h; however, the DMS, DMO and protozoan population were similar. In exp. 4, PTG, DMS and DMO increased linearly with the level of sargassum, and the protozoan population only decreased at 24 h. There was a differential effect on PTG, DMS, BMD and protozoan population, which was influenced by rumen fluid. It is concluded that pelagic sargassum can be included at levels of 20% to 30% under *in situ* and *in vitro* conditions; however, its use under *in vivo* conditions remains to be evaluated.

Key words: pelagic sargassum, ruminants, protozoa, PTG, degradability.

I. CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1 Introducción.

Dada la ubicación geográfica de la Península de Yucatán es un sitio en donde arriban grandes cantidades de sargazo (algas marinas) al Caribe Mexicano, procedentes del Atlántico Sur; por otra parte, en la costa norte de Yucatán el origen del sargazo es el mar de los sargazos en el Atlántico Norte. En consecuencia, las especies de algas son diferentes. El sargazo que arriba al Caribe consiste en una mezcla de diferentes especies de algas pardas del género *Sargassum*, donde las más abundantes son *S. natans* y *S. fluitans*; las arribazones ocurren durante la primavera y verano, época de mayor afluencia turística a la región, el cual aporta un nivel significativo de divisas al país, por lo que año con año se realizan diversas actividades para retirarlo de las zonas costeras. Sin embargo, únicamente se mueve tierra adentro, donde se pudre y desprende olores desagradables y compuestos potencialmente tóxicos, además presenta un hábitat para el desarrollo de fauna nociva.

Diversas instituciones académicas han planteado alternativas para el aprovechamiento del sargazo, ya sea en forma de composta, obtención de biogás, uso de sus componentes químicos en la industria farmacéutica, cosmética, textil y en la construcción, entre otros. Con respecto a su uso en la alimentación animal se ha explorado la inclusión de otras especies de algas en pequeñas cantidades en la dieta de rumiantes. Sin embargo, el uso de algas pardas ha sido poco estudiado. Estas algas contienen bromoformo y clorotaninos y, alginatos y polisacáridos azufrados, compuestos potencialmente útiles en la reducción de gases con efecto invernadero (GEI).

Por lo que el objetivo es determinar la composición fisicoquímica del sargazo, así como su degradabilidad *in vitro* e *in situ* en rumiantes, con la finalidad de evaluar su posible inclusión en la dieta.

1.2. Revisión de literatura.

1.2.1. Caracterización del sargazo

Las algas del género *Sargassum* constituyen aproximadamente 400 especies, las cuales están distribuidas en los mares tropicales y subtropicales del planeta (Johnson *et al.*, 2019). Dos de estas especies de algas pardas o pelágicas (*S. natans* y *S. fluitans*), se desarrollan en el mar de los sargazos y son las que predominan en las grandes arribazones que desde 2011 han impactado a las costas del Caribe Mexicano (García-Sánchez *et al.*, 2020), afectando la industria turística de la región, la cual recibe anualmente alrededor de 15 millones de turistas, que aportan más del 40 % del producto interno bruto (PIB) correspondiente a este sector (Espinosa y Li, 2020).

Las arribazones de sargazo se intensificaron entre el verano de 2014 y el invierno de 2015, alcanzando el pico más alto en septiembre de 2015 con 19,603 m³/km en Puerto Morelos y Cancún y posteriormente disminuyó a 681 m³/km en febrero de 2016 con un promedio de 2,360 m³/km retirados de las playas en cinco Municipios de Quintana Roo (Rodríguez-Martínez *et al.*, 2016). Posteriormente, en 2017 se volvió a incrementar alcanzando el pico máximo en mayo de 2018 con 8,793 m³/km en el mismo tramo de costa (Rodríguez-Martínez *et al.*, 2019). Para junio del mismo año se registraron más de 20 millones de t de sargazo en las costas del Mar Caribe y el Océano Atlántico Central cuando el gran cinturón Atlántico de sargazo se extendió 8,850 km (Wang *et al.*, 2019).

La afectación por la acumulación del sargazo en las playas tiene múltiples aristas, por una parte, modifica los ecosistemas costeros y, la percepción de los turistas, el empleo y la salud humana (Lapointe *et al.*, 2018). Su retiro de las playas tiene como objetivo mantener la afluencia turística a la región, pero su costo es elevado e impacta económicamente a la iniciativa privada y al Estado; se requiere el diseño de estrategias integrales y eficientes de gestión a mediano y largo plazo que coadyuven a la conservación ambiental y al aprovechamiento de este recurso para crear economías circulares (Chávez *et al.*, 2020; Liranzo-Gómez *et al.*, 2021).

La descomposición de la materia orgánica (MO) aumenta la demanda bioquímica de oxígeno, afectando negativamente la flora y fauna marina (Rodríguez-Martínez *et al.*, 2019; van Tussenbroek *et al.*, 2017), además, el efecto combinado de la hipoxia con las altas

concentraciones de amonio y sulfuro de hidrógeno, inducen la muerte de miles de peces, tortugas, delfines y dañan los manglares, alterando la dinámica trófica de diversas especies (Cabanillas-Teran *et al.*, 2019; van Tussenbroek *et al.*, 2017) y se incrementa la erosión de las playas. La importancia ecológica del sargazo, está asociada al hábitat para la reproducción de un gran número de especies de invertebrados y contribuye como fuente de carbono para el fondo marino (Liranzo-Gómez *et al.*, 2021).

1.2.2. Composición química y mineral del sargazo y usos potenciales

Los usos o aplicaciones que se le puede dar a las macroalgas marinas dependen de su composición química que al mismo tiempo está determinada por la especie y otros factores externos. La capacidad de absorción de metales pesados de las algas pelágicas es muy elevada debido a la presencia de alginatos y fucooidanos en las paredes celulares, estos metales tienen potencial contaminante para el agua de mar y subterránea cuando se liberan (Rodríguez-Martínez *et al.*, 2020). El alginato y otros compuestos fenólicos y los polisacáridos presentes en el sargazo tienen un uso potencial en diversas industrias entre las cuales se encuentran: la alimenticia, textil, cosmética, farmacéutica, construcción y papelera, entre otras (Chávez *et al.*, 2020). Además, puede ser utilizada en las actividades agrícolas (composta, fertilizante orgánico, alimentación animal), para la producción de biogás; y como adsorbente biológico para diferentes sustancias contaminantes (Thompson *et al.*, 2020; Thompson *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2018), que pueden reintegrarse a las cadenas de valor de los procesos industriales y la biomasa residual puede ser utilizada para la obtención de compuestos bioactivos (Saldarriaga-Hernández *et al.*, 2020). Además, estos metabolitos secundarios y polisacáridos tienen el potencial de formar parte de la alimentación animal (Michalak *et al.*, 2022).

Con respecto a los lípidos, su concentración varía entre 35 y 50 g kg⁻¹ MS. Destacan los ácidos grasos poliinsaturados entre 18 y 24 Carbonos, algunos de ellos tienen hasta 6 dobles enlaces (Cuadro 1.1). La concentración lipídica de las algas juega un importante rol en la industria alimenticia y en la producción animal; las macroalgas pardas y rojas contienen entre 1 y 5 % de lípidos, y son ricas en ácidos grasos poliinsaturados (AGPI) omega 3 y 6 como el eicosapentaenoico (EPA; C20:5) y araquidónico (AA; C20:4) (Hadrová *et al.*, 2021). Los ácidos grasos saturados representan entre el 30 y el 50% del total, mientras los poliinsaturados representan entre el 25 y el 35% del total (Antaya *et al.*, 2015; Biancarosa *et*

al., 2018; Liu *et al.*, 2020; Milledge *et al.*, 2020; Rocha *et al.*, 2021; Vázquez-Delfín *et al.*, 2021).

La concentración de nutrientes y metabolitos secundarios en las células de las algas marinas depende de la exposición a las olas, la intensidad de la luz, la temperatura, salinidad y pH del mar, así como el estado de oxidación de los minerales y la disponibilidad de nutrientes (Abbott *et al.*, 2020; Circuncisão *et al.*, 2018; Menaa *et al.*, 2020). Entre los metabolitos secundarios que se han detectado están: guanidoacetato, manitol y etilenglicol, además de vitaminas, ácidos carboxílicos y ácidos orgánicos (Choi *et al.*, 2019; Choi *et al.*, 2020a); el contenido de MS, cenizas, proteína, lípidos y carbohidratos es muy variable y depende de la especie (Bikker *et al.*, 2020) y la contaminación con arena; la concentración de proteína en las algas pardas es de baja a media y, su rango se encuentra entre 80 y 190 g de PC kg⁻¹ MS (Choi *et al.*, 2020a; Costa *et al.*, 2021; Makkar *et al.*, 2016; Gülzari *et al.*, 2019; Saldarriaga-Hernandez *et al.*, 2021), la concentración de paredes celulares varía de 58 a 417 g de FDN kg⁻¹ MS (Abbott *et al.*, 2020; Bikker *et al.*, 2020; Brooke *et al.*, 2020; Fan *et al.*, 2021; Lind *et al.*, 2020; Maia *et al.*, 2016; Makkar *et al.*, 2016). La variabilidad en la concentración de nutrientes depende de diversos factores, entre los cuales se encuentran: la especie, el sitio geográfico de su crecimiento, que a su vez está influenciado por la temperatura, salinidad y concentración de nutrimentos en el agua (Choi *et al.*, 2020b; Circuncisão *et al.*, 2018). También se modifican por el método de conservación, ya sea deshidratado o ensilado (Campbell *et al.*, 2020; Milledge y Harvey, 2016).

La concentración mineral también depende de la especie (Cuadro 1.2), tanto en macro y micro minerales como en metales pesados (Circuncisão *et al.*, 2018; Roque *et al.*, 2019a). La elevada concentración de metales pesados como el arsénico, el mercurio, el plomo, el cadmio y el aluminio, se basa en la heterogeneidad de las paredes celulares de las algas que da lugar a diferentes capacidades de adsorción y por ende a diferentes concentraciones según la especie (Costa *et al.*, 2021; Devault *et al.*, 2021). Con respecto al arsénico, es de vital importancia que se considere al momento de realizar estudios con animales, ya que puede ocasionar daños a la salud animal y contaminar los productos derivados.

Tabla 1.1. Perfil de ácidos grasos de las especies que conforman el sargazo pelágico y de otras especies de algas marinas.

Referencia	Milledge <i>et al.</i> , 2020				Rocha <i>et al.</i> , 2021		Antaya <i>et al.</i> , 2015	Biancarosa <i>et al.</i> , 2018	Liu <i>et al.</i> , 2020	Maia <i>et al.</i> , 2019	
Especie de alga	Sargazo pelágico*	S. <i>natans</i> VIII	S. <i>natans</i> I	S. <i>Fluitans</i>	S. <i>muticum</i>	<i>Undaria pinnatifida</i>	<i>Ascophyllum nodosum</i>	<i>Laminaria digitata</i>	Microalga <i>Schizochytrium spp.</i>	<i>Ulva rigida</i>	<i>Saccharina latissima</i>
Total de lípidos (g kg ⁻¹ MS)	38.8	35.8	45.1	45.6	75.56	67.86	23	6.07	333	2.63	6.43
Perfil de AG	(g kg ⁻¹ MS)										
14:0	0.78	0.72	0.70	0.97			2.18	0.29	1.3	0.03	0.52
16:0	10.35	14.57	10.65	11.00	20.89	11.51	2.73	1.09	41.5	0.97	1.00
17:0	0.45	0.05	0.40	0.35	0.29	0.0	-	-	0.3	-	-
18:0	1.84	0.30	1.89	1.97	0.43	0.64	0.11	0.05	2.1	0.02	0.05
20:0	0.18	0.14	0.25	0.28	-	-	0.01	-	0.3	0.007	0.04
22:0	0.24	0.46	0.37	0.34	-	-	0.31	-	0.3	0.06	0.003
24:0	0.16	-	-	-	0.45	0.0	0.95	-	0.2	-	-
15:1	0.15	-	-	-	3.15	2.44	-	-	-	-	-
16:1	1.56	2.96	1.60	1.88	7.43	1.66	0.27	-	0.9	-	-
16:1 n-7	-	-	-	-	-	-	-	0.13	-	-	-
16:1 cis-9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.07	0.18
16:3 n-3	-	-	-	-	-	-	-	<LD	-	-	-
17:1	<0.02	0.07	0.28	<0.02	-	-	-	-	-	-	-
18:1	4.93	3.83	6.00	6.94	7.84	6.21	-	-	-	-	-
18:1-cis 9	-	-	-	-	-	-	5.59	-	2.2	0.06	0.73
18:1 n-7 + n-9	-	-	-	-	-	-	-	1.24	-	-	-
18:1-cis-11	-	-	-	-	-	-	0.05	-	-	0.31	0.04
20:1 n-7n-9n-11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18:2	2.06	2.83	3.12	2.75	4.67	3.87	-	-	-	-	-
18:2 n-6 (AL)	-	-	-	-	-	-	1.48	0.56	1.0	0.10	0.29
18:3	1.71	1.26	2.66	1.59	-	-	-	-	-	-	-
18:3 n-3 (αALN)	-	-	-	-	6.23	7.51	0.74	0.42	0.9	0.23	0.38
18:3 n-6 (γALN)	-	-	-	-	3.01	12.33	0.05	-	-	-	-
18:4	0.03	0.25	0.60	0.40	-	-	-	-	-	-	-

18:4 n-3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.25	1.0
20:1	0.07	0.27	<0.02	<0.02	-	-	-	-	-	-	-
20:2 n-6	-	-	-	-	-	-	0.30	-	-	-	-
20:3 n-3	-	-	-	-	-	-	-	-	0.5	-	-
20:3 n-6	-	-	-	-	-	-	0.14	-	-	-	-
20:4 n-6 (ARA)	3.02	4.64	4.12	4.67	0.0	0.0	-	0.59	0.5	0.004	0.76
20:4 n-3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20:5 n-3 (EPA)	1.46	<0.02	1.25	0.68	13.83	13.15	-	0.82	-	0.02	0.69
22:1	0.62	<0.02	0.70	0.96	-	-	-	-	-	-	-
22:4 n-6 (DTA)	0.45	<0.02	0.35	0.36	-	-	-	-	-	-	-
22:5 n-3 (DPA)	0.14	<0.02	0.12	0.14	-	-	-	-	-	0.04	-
22:6 n-3 (DHA)	2.50	<0.02	2.55	2.69	7.33	8.55	-	-	176.4	-	0.01
Total de AGMI	7.50	7.14	8.65	9.96	18.42	10.31	-	1.41	3.1	0.68	1.23
Total de AGPI	11.37	8.97	14.78	13.27	35.09	45.41	-	3.10	214	0.67	3.38
Total de AGS	14.24	16.33	14.62	15.36	22.06	12.15	-	1.56	103.7	1.27	1.82
AG (NI)	5.69	3.36	7.05	7.01	-	-	-	-	-	-	-

*Mezcla de especies de *S. natans* y *S. fluitans*

AL: ácido linoleico; ALN: ácido linolénico; AGS: ácidos grasos saturados; AGMI: ácidos grasos monoinsaturados; AGPI: ácidos grasos poliinsaturados; ARA: ácido araquidónico; EPA: ácido eicosapentaenoico; DTA: ácido adrenico; DPA: ácido docosapentaenoico; DHA: ácido docosahexaenoico; NI: no identificados

Tabla 1.2. Composición mineral del sargazo pelágico y otras especies de macroalgas marinas.

Especie	Macro minerales (g/kg MS)					Micro minerales (mg/kg MS)								Metales pesados (mg/kg MS)				Referencia
	Ca	P	K	Na	Mg	Fe	Cu	Zn	Mn	Co	Al	Se	I	As	Cd	Pb	Hg	
<i>S. natans</i> VIII	26.0	0.14	7.4	-	15.1	81.6	1.2	26.5	<3	-	16.2	-	-	20.9	0.09	0.5	N/D	(1)
<i>S. natans</i> I	28.9	0.22	12.5	-	16.5	998.6	2.7	30.9	<3	-	21.5	-	-	29.8	0.12	0.3	0.01	(1)
<i>S. fluitans</i>	33.2	0.21	7.8	-	16.3	262.0	2.9	35.6	<3	-	28.1	-	-	26.2	0.12	0.4	0.01	(1)
Sargazo pelágico (Mezcla de especies)	70.3	0.50	69.4	-	12.0	3811.4	2.5	5.8	30.1	-	37.5	-	-	123.7	0.13	0.3	0.01	(1)
<i>U. pinnatifida</i>	8.6	2.9	-	76.0	10.6	121.1	1.8	70.7	7.9	0.2	-	0.2	-	38.2	-	0.3	N/D	(2)
<i>A. taxiformis</i>	20.1	1.1	-	34.9	4.2	6241	8.7	23.7	112.7	-	-	-	-	-	-	-	-	(3)
<i>Sargassum</i> <i>fusiforme</i>	8.9	1.6	-	34.4		91.4		24.5	10.7	-	-	-	-	94.2	-	-	-	(4)
<i>Sargassum</i> <i>fulvellum</i>	8.1	1.4	-	27.2	10.7	560.4	1.0	24.1	25.1	0.3	-	0.3	-	122	-	1.8	N/D	(5)
<i>Ascophyllum</i> <i>nodosum</i>	17	0.8	17	33	8.6	100	3.6	84	13	-	-	0.1	670	-	-	<0.3	<0.01	(6)
<i>Palmaria</i> <i>palmata</i>	2.5	2.1	28	3.2	1.2	73	4.1	42	4.1	-	-	0.1	220	<40	-	<0.3	<0.01	(6)
<i>Saccharina</i> <i>latissima</i>	17	2.5	100	24	7.7	160	1.2	25	5.7	-	-	0.1	4600	-	-	<0.3	<0.01	(6)
<i>Laminaria</i> <i>digitata</i>	15	1.6	31	27	6.3	150	1.3	81	3.1	-	-	0.1	1000 0	-	-	<0.3	<0.01	(6)

Milledge *et al.*, 2020 (1); Choi *et al.*, 2019 (2); Roque *et al.*, 2019a (3); Choi *et al.*, 2020a (4); Choi *et al.*, 2020b (5); Biancarosa *et al.*, 2018 (6).

La especie *S. fulvellum* tiene una concentración elevada de arsénico, la cual está dentro del límite aceptable para los rumiantes, y es poco probable que cause efectos negativos en la salud animal, especialmente porque también contiene muchos minerales benéficos (Choi *et al.*, 2020b). Las especies de algas pardas que conforman el sargazo pelágico, analizadas por separado contienen niveles bajos de arsénico (20-36 mg kg⁻¹ MS); sin embargo, cuando son analizados como una mezcla de especies tal como llegan a las costas, los niveles superan los 100 mg kg⁻¹ MS (Milledge *et al.*, 2020; Saldarriaga-Hernandez *et al.*, 2021; Vázquez-Delfín *et al.*, 2021). La toxicidad del arsénico depende de su forma química y la mayor parte de este elemento contenido en las algas es orgánica, por lo que es menos tóxica; y se debe a la fisiología de estos organismos que les permite convertir el arsénico inorgánico en orgánico (Cabrita *et al.*, 2016; Ghosh *et al.*, 2022); por lo tanto no es relevante la cantidad bruta contenida en las algas sino más bien la concentración clasificada por tipo de arsénico, lo cual abre la posibilidad de realizar estudios tanto *in vitro* como *in vivo* con diferentes concentraciones para determinar las dosis óptimas y descartar sus efectos nocivos.

1.2.3. Metabolitos secundarios y propiedades farmacológicas y nutraceuticas de las algas marinas

Los metabolitos secundarios de las algas, pueden tener propiedades farmacológicas (Cuadro 1.3) que coadyuven al tratamiento de algunos tipos de cáncer, diabetes, control de la obesidad y, efecto antioxidante y antimicrobiano, entre otros (Pérez-Larrán *et al.*, 2018; Rexliene, 2018; Sellimi *et al.*, 2017). Las algas pardas que conforman el sargazo pelágico contienen polisacáridos poco comunes en las plantas terrestres, como: el alginato, el fucoidán y el laminaran; los cuales tienen efecto como anticoagulantes, antivirales, antibacterianos, antioxidantes e inmuno reguladoras (Amador-Castro *et al.*, 2021; Choi *et al.*, 2020b; Frazzini *et al.*, 2022; Kang *et al.*, 2022). El fucoidán es un polisacárido sulfatado que se encuentra en las paredes celulares de las macroalgas marrones (Hárová *et al.*, 2021). Además contienen compuestos polifenólicos como los clorotaninos (Shrestha *et al.*, 2021) con actividad antioxidante (Sathya *et al.*, 2017), anticancerígena (Pérez-Larrán *et al.*, 2018), antiviral (Cho *et al.*, 2019), antimicrobiano (Ford *et al.*, 2020), anti inflamatoria (Barbosa *et al.*, 2019) y neuroprotectora (Lee *et al.*, 2019). Los clorotaninos están formados estructuralmente por cadenas poliméricas de residuos de cloroglucinol (1,3,5-trihidroxibenceno) conectados mediante enlaces C-C y/o C-O-C. La concentración de este

compuesto polifenólico depende de la especie; por lo tanto, puede haber efectos diferenciales cuando se estudian diferentes especies de algas pardas, de ahí la importancia de la cuantificación específica de cada compuesto bioactivo para determinar las dosis en los trabajos de investigación.

En el caso de las algas rojas, la especie *Asparagopsis taxiformis* es la que más se ha estudiado a nivel *in vitro* e *in vivo* debido a su contenido de bromoformo, que es un potente inhibidor de la metanogénesis en los rumiantes (Kinley *et al.*, 2020; Machado *et al.*, 2018; Roque *et al.*, 2021). La composición de bromoformo varía también dependiendo la especie de alga; por ejemplo, se ha visto que la concentración de bromoformo es mayor (2,305 vs 35 $\mu\text{g g}^{-1}$ MS) en *Asparagopsis taxiformis* comparada con *Zonaria farlowii* (Brooke *et al.*, 2020). Se ha observado que el consumo de algas en diversas especies animales contribuye al mantenimiento de la salud, mejoran la disponibilidad de los nutrientes y el estado oxidativo (Evans y Critchley, 2014; Tsiplakou *et al.*, 2018). Pruebas realizadas en rumiantes suplementados con *Sargassum spp.* indican mejoría en el estado antioxidante y en los parámetros inmunológicos (Angulo *et al.*, 2020); además de un incremento en la capacidad para modular los efectos perjudiciales del estrés calórico a través de la regulación de las respuestas termo-respiratorias e inflamatorias y en consecuencia se observa un mejor comportamiento productivo (de Lima *et al.*, 2019; Ellamie *et al.*, 2020; Lee *et al.*, 2020; Maheswari *et al.*, 2021). El sargazo pelágico podría tener este potencial termorregulador por su contenido de polisacáridos sulfatados y compuestos fenólicos; y esta propiedad contribuiría a mejorar el bienestar animal sobre todo en las regiones tropicales donde las temperaturas son extremas e impactan negativamente en la productividad animal.

Tabla 1.3. Actividades biológicas de los compuestos bioactivos contenidos en las algas marinas.

Especie de alga	Tipo de alga	Metabolitos secundarios	Actividades biológicas	Referencia
<i>Sargassum spp</i>	Alga parda	Polisacáridos sulfatados, carotenoides, clorotaninos, vitaminas y minerales	Antioxidante, Anticancerígeno, antidiabético, antimicrobiano, mejoradores de respuesta inmunitaria	(1, 2)
<i>A. nodosum</i>	Alga parda	Clorotaninos	Antioxidante, Antimicrobiano y antiprotozoal	(3, 4, 5, 6)
<i>L. digitata</i>	Alga parda	Clorotaninos	Antimicrobiano y antiprotozoal	(3, 4)
<i>U. pinnatifida</i>	Alga parda	Minerales, carbohidratos (manitol), aminoácidos (Alanina), compuestos fenólicos y flavonoides	Antioxidante, antimicrobiano y prebiótica	(7, 8, 9)
<i>S. fusiforme</i>	Alga parda	Minerales, manitol, ácidos carboxílicos (guanidoacetato), lípidos (etilenglicol), compuestos fenólicos y flavonoides	Prebiótica, antioxidante y antiprotozoal	(8, 9, 10)
<i>S. fulvellum</i>	Alga parda	Minerales, carbohidratos (manitol), ácidos carboxílicos (guanidoacetato), lípidos (etilenglicol), aminoácidos (Alanina), clorotaninos y flavonoides	Promotor de crecimiento, antioxidante, antimicrobiano y prebiótica	(8, 9, 11)
<i>Sargassum latifolium</i>	Alga parda	Polisacáridos sulfatados, carotenoides	Anticancerígena, antiapoptótica, antioxidante, antiinflamatoria y termorreguladora	(12)
<i>S. muticum</i>	Alga parda	Alginatos y clorotaninos	Antioxidante y antitumoral	(13)
<i>S. natans</i>	Alga parda	Alginatos, polisacáridos sulfatados, clorotaninos	Antimicrobiano, antidiabético, prebiótica,	(14)
<i>S. fluitans</i>	Alga parda	Alginatos, polisacáridos sulfatados, clorotaninos	Antimicrobiano, antidiabético, antioxidante, prebiótica.	(14)
<i>Sargazo pelágico</i> (mezcla de especies)	Alga parda	Alginatos, polisacáridos sulfatados, clorotaninos	antioxidante, anticoagulante, antitrombótico, inmunorregulador, antiviral y antiinflamatorio	(15)
<i>Ecklonia stolonifera</i>	Alga parda	Clorotaninos	Antimicrobiano	(8)
<i>Eisenia bicyclis</i>	Alga parda	Clorotaninos	Antimicrobiano	(8)
<i>Laminaria ochroleuca</i>	Alga parda	Clorotaninos	Antimicrobiano	(16)
<i>S. latissima</i>	Alga parda	Clorotaninos	Antimicrobiano	(16)
<i>Gracilaria</i>	Alga roja	Minerales, vitaminas y	Termorreguladora	(17)

<i>birdiae</i>		proteínas, ácidos grasos poliinsaturados y antioxidantes			
<i>Gigartina</i> sp.	Alga roja	Compuestos halogenados	Antimicrobiano		(16)
<i>Gracilaria vermiculophylla</i>	Alga roja	Compuestos halogenados	Antimicrobiano		(16)
<i>Chlorella vulgaris</i>	Microalga verde	Ácidos grasos poliinsaturados, fenoles, flavonoides, carotenoides	Antioxidante		(18)
<i>Ulva</i> sp.	Microalga verde	Minerales, aminoácidos, polisacáridos sulfatados, compuestos fenólicos y pigmentos.	Antimicrobiano, antiviral, antioxidante, inmunomodulador y anticancerígeno		(16)
<i>A. taxiformis</i>	Alga roja	Bromoformo (compuesto halogenado)	Antimicrobiano antimetanogénico	y	(19, 20)

Rexliene, 2018 (1); Angulo *et al.*, 2020 (2); Belanche *et al.*, 2016a (3); Belanche *et al.*, 2016b (4); Ford *et al.*, 2020 (5); Frazzini *et al.*, 2022 (6); Choi *et al.*, 2019 (7); Choi *et al.*, 2021a (8); Choi *et al.*, 2021b (9); Choi *et al.*, 2020a (10); Choi *et al.*, 2020b (11); Ellamie *et al.*, 2020 (12); Pérez-Larrán *et al.*, 2018 (13); Amador-Castro *et al.*, 2021 (14); Vázquez-Delfín *et al.*, 2021 (15); Maia *et al.*, 2016 (16); De Lima *et al.*, 2019 (17); Tsiplakou *et al.*, 2018 (18); Roque *et al.*, 2019b (19); Glasson *et al.*, 2022 (20).

1.2.4. Uso potencial de algas en la alimentación de rumiantes

Además del contenido de polisacáridos, polifenoles y lípidos, la concentración de macro y micro minerales y metales pesados (potencialmente tóxicos) de las algas, limitan su inclusión en la dieta de los rumiantes. Esta limitante se asocia principalmente con la posible acumulación de metales pesados en los tejidos animales (Costa *et al.*, 2021), por lo que se requieren de ensayos de alimentación a largo plazo para poder definir los niveles máximos de inclusión en la dieta y los efectos negativos sobre la fisiología y metabolismo de los rumiantes (Choi *et al.*, 2019; Campbell *et al.*, 2020). Estos ensayos requerirán pruebas con diversas especies de rumiantes en diferentes etapas fisiológicas y regímenes de alimentación (tipos de dieta).

Una evaluación previa para el uso potencial de las macroalgas en la alimentación de rumiantes, requiere además de la determinación fisicoquímica de sus componentes, el análisis proximal y el análisis de otro tipo de sustancias (metales pesados y su especiación) y metabolitos secundarios (polisacáridos complejos, bromoformo y clorotaninos, etc.) (Carrillo-Domínguez *et al.*, 2023). También se requieren de estudios *in vitro* para la evaluación de la MO potencialmente degradable de las algas y su efecto sobre la cinética de producción de gas, CH₄ y la población microbiana; y se requieren de estudios *in situ* para conocer el potencial de degradabilidad de los nutrientes y minerales. Evidentemente, la degradabilidad de la MO está sujeta al crecimiento microbiano y a la disponibilidad de los

nutrientes por parte de los microorganismos ruminales y, la inclusión de harina de algas marinas en el sustrato podrían favorecer cambios en las rutas metabólicas con un incremento en la actividad fibrolítica (Choi *et al.*, 2021).

1.2.5. Efecto de las algas sobre la degradabilidad, cinética de producción de gas y CH₄ *in vitro*

La producción total de gas (PTG) se relaciona con la degradabilidad de la MO (DMO) de los sustratos, la producción de ácidos grasos volátiles (AGV) y el crecimiento microbiano en el rumen (Molina-Alcaide *et al.*, 2017; de la Moneda *et al.*, 2019; Munde *et al.*, 2021); estos parámetros incluido el CH₄ pueden ser modificados por las algas y, el efecto dependerá de la especie y el nivel de inclusión; así mismo, existe un efecto de la temporada de cosecha (de la Moneda *et al.*, 2019). Además puede haber un efecto dosis dependiente y de interacción entre el sustrato base y la especie de alga (Choi *et al.*, 2019; Choi *et al.*, 2020b; Choi *et al.*, 2020a; Widiawati y Hikmawan, 2021). La degradabilidad de la MS (DMS) de las algas rojas es mayor, con respecto a las especies de algas pardas y verdes (Molina-Alcaide *et al.*, 2017). Esto está relacionado con la alta concentración de PC (hasta el 34%) y bajo contenido de ceniza (hasta el 20%) de las algas rojas comparadas con las algas pardas y verdes. Al respecto, se ha observado una disminución lineal en la DMS con el incremento del nivel (de 10 a 40 %) de algas verdes a un sustrato base de buena calidad (Rjiba-Ktita *et al.*, 2017).

La suplementación con algas incrementa las poblaciones de bacterias fibrolíticas (Tabla 4) en el rumen (Choi *et al.*, 2021a; Choi *et al.*, 2021b). De acuerdo a Huang *et al.* (2023), los clorotaninos favorecen el crecimiento de los géneros *Ruminococcus*, *Lachnospiraceae* y *Fibrobacter* y, está correlacionada con una mayor DMS. En concordancia, la adición de algas pardas a raciones concentradas, incrementan la DMS y DMO; sin embargo, la degradabilidad del N puede disminuir (Maia *et al.*, 2019). Belanche *et al.* (2016a), indican que los clorotaninos afectan de manera diferencial el metabolismo del N según la especie de alga (Tabla 1).

La producción de CH₄ en el rumen puede ser mitigado con la inclusión de algas marinas con potencial antimetanogénico (Roque *et al.*, 2019a; Abbott *et al.*, 2020; Brooke *et al.*, 2020; Hadrová *et al.*, 2021). Al respecto, la adición de diferentes especies de algas a un heno reduce el CH₄ entre 25 y 38% (Maia *et al.*, 2016). Sin embargo, cuando el sustrato base es de mejor

calidad, no se observan efectos sobre la producción de CH₄ (Maia *et al.*, 2019). En los estudios con *A. taxiformis*, la reducción de CH₄ puede estar acompañada de una disminución en el volumen de gas cuando la dosis es alta (Roque *et al.*, 2019a; Brooke *et al.*, 2020); así mismo, en concentraciones menores (1%), se disminuye los efectos negativos (Kinley *et al.*, 2016). Las algas pardas adicionados al 5 % a sustratos fibrosos, reducen la generación de CH₄ hasta un 27 % (Bikker *et al.*, 2020; Choi *et al.*, 2019; Choi *et al.*, 2021a; Choi *et al.*, 2021b). Es posible que los clorotaninos del sargazo pelágico posean este potencial antimetanogénico, por lo que, se requiere determinar las dosis mínimas efectivas en rumiantes.

La adición de algas provoca cambios en la producción total de AGV (PTAGV) y en el perfil de AGV en líquido ruminal (Choi *et al.*, 2021). Maia *et al.* (2016) al evaluar diversas especies de algas encontraron un efecto de sustrato base (silo de maíz y heno de pasto) y de interacción del sustrato base con la especie de alga sobre la PTAGV y la producción individual de AGV (PIAGV) en líquido ruminal (Tabla 1.4). Cuando el sustrato base es una ración total mixta (RTM), la PTAGV no se ve afectada por las algas, pero sí el perfil (Maia *et al.*, 2019). Por otro lado, la adición de un 5% de *A. taxiformis* en dietas concentradas no afecta la PTAGV, pero mejoran la relación propionato: acetato e incrementan el propiónico y butírico, los cuales están relacionados con la reducción de CH₄ (Roque *et al.*, 2019; Kinley *et al.*, 2021). Las dietas concentradas mitigan en parte los efectos negativos de las dosis altas de algas sobre la fermentación ruminal (Rjiba-Ktita *et al.*, 2017). Por otro lado, las algas pardas: *U. pinnatifida*, *S. fusiforme* y *S. fulvellum*, han demostrado resultados positivos sobre PTAGV y PIAGV (Choi *et al.*, 2019; Choi *et al.*, 2020a; Choi *et al.*, 2020b; Choi *et al.*, 2021a; Choi *et al.*, 2021b). Probablemente, estos resultados positivos con las algas pardas podrían estar relacionados con su contenido de polisacáridos (Choi *et al.*, 2020b; Demarco *et al.*, 2022; Michalak *et al.*, 2022).

Tabla 1.4. Efecto de la especie y dosis de algas sobre los parámetros de fermentación *in vitro* con respecto al sustrato base.

Especie	Dosis g/kg MS	Sustrato base	PTG, PTAGV y degradabilidad	CH ₄ (ml/g MS)	Referencia
<i>A. taxiformis</i>	50	RSP	PTG ↓ 51 %; AGV: ↑ C2:C3	↓ 95%	(1)
<i>A. nodosum</i>	50	50F:50C	s.e. PTG; s.e. AGV; ↓ DN	s.e.	(2)
<i>L. digitata</i>	50	50F:50C	s.e. PTG; s.e. AGV; s.e. DN	s.e.	(2)
<i>G. vermiculophylla</i>	250	Heno	PTG ↓ 18%; s.e. PTAGV, ↑ C2, ↓ C4, ↑ C2:C3	↓ 59%	(3)
<i>S. latissima</i>	250	Heno	PTG ↓ 11%; s.e. PTAGV, ↑ C2, ↓ C4; ↑ C2:C3	s.e.	(3)
<i>G. vermiculophylla</i>	250	Ensilado	PTG ↑; ↓ PTAGV	↓ 63%	(3)
<i>S. latissima</i>	250	Ensilado	PTG ↑; s.e. AGV	s.e.	(3)
<i>Chaetomorpha linum</i>	100 - 400	Con	↓ PTG con ↑ dosis; ↓ DMS con ↑ dosis	-	(4)
<i>Ulva lactuca</i>	100 - 400	Con	↓ PTG con ↑ dosis; ↓ DMS con ↑ dosis	-	(4)
<i>Ulva rigida</i>	250	RTM	s.e. PTG; AGV: ↓ C3, ↓ isoaléxico; ↑ DMS, ↑ DMO, ↓ DPC	s.e.	(5)
<i>G. vermiculophylla</i>	250	RTM	s.e. PTG; AGV: ↑ C2, ↓ C3, ↓ C4, ↑ C2:C3; ↑ DMS, ↑ DMO, ↓ DPC	s.e.	(5)
<i>S. latissima</i>	250	RTM	s.e. PTG; AGV: ↑ C2, ↓ C4; ↑ DMS, ↑ DMO	s.e.	(5)
<i>A. taxiformis</i>	5 - 100	Heno	PTG ↓ 30%; ↓ PTAGV con dosis >50, ↑ C2, ↑ C3; ↓ DMO	↓ 85%	(6)
<i>U. pinnatifida</i>	10 - 100	Heno	s.e. PTG; ↑ PTAGV con ↑ dosis, ↑ C2, C3 y C4 con ↑ dosis; ↑ DMS con ↑ dosis (3 y 12 h)	s.e.	(7)
<i>S. fusiforme</i>	10 - 100	Heno	PTG ↓ a las 24h; ↑ PTAGV con ↑ dosis, ↑ C2, C3 y C4 con ↑ dosis; ↑ DMS (3h) y ↓ (24h) con ↑ dosis	↓ 7.5-43%	(8)
<i>S. fulvellum</i>	10 - 100	Heno	PTG ↑ a las 3, 6 y 9h; ↑ PTAGV con ↑ dosis; PIAGV: ↑ C2, C3 y C4 con ↑ dosis; ↑ DMS (3, 6 y 9 h) con ↑ dosis	s.e.	(9)
<i>S. fulvellum</i>	50	Heno	PTG ↑; AGV: ↑ C2; ↑ DMS (12, 24 y 48h)	↓ 10.4%	(10)
<i>U. pinnatifida</i>	50	Heno	PTG ↑; AGV: ↑ C2, ↑ C2:C3; ↓ DMS (12) y ↑ (24 y 48h)	↓ 26.7%	(10)
<i>S. fusiforme</i>	50	Heno	PTG ↑; ↑ PTAGV, ↑ C2; ↑ DMS (12, 24 y 48h)	↓ 13.9%	(10)
<i>Eucheuma cottonii</i>	40 - 120	Heno	PTG ↑; ↑ DMS e ↑ DMO con ↑ dosis	↓ 6-16%	(11)
<i>A. taxiformis</i>	20	Heno	PTG ↓ 29-34%	↓ 99%	(12)

N/D: no determinado; RSP: ración super básica; 50F:50C: 50 % forraje y 50 % concentrado; Con: alimento concentrado; RTM: ración total mixta; C2: acético; C3: propiónico; C4: butírico; DN: degradabilidad del N; DPC: degradabilidad de la PC.

Roque et al., 2019a (1); Belanche et al., 2016a (2); Maia et al., 2016 (3); Rjiba-Ktita et al., 2017 (4); Maia et al., 2019 (5); Kinley et al., 2016a (6); Choi et al., 2019 (7); Choi et al., 2020a (8); Choi et al., 2020b (9); Choi et al., 2021a (10); Widiawati y Hikmawan, 2021 (11); Machado et al., 2018 (12)

1.2.6. Efecto de la adición de algas marinas sobre la degradabilidad *in situ* de los nutrientes

El efecto de las algas sobre la degradabilidad *in situ* de los nutrientes está influenciada por la especie (Choi *et al.*, 2019; Choi *et al.*, 2020a; Choi, *et al.*, 2020b) y el sustrato base (Tabla 1.5). En las algas verdes, la DMO de *U. lactuca* es mayor que el de *C. linum*; sin embargo, cuando estas dos especies son incluidas en un concentrado, no muestran diferencias (Rjiba-Ktita *et al.*, 2017). Con respecto a la degradabilidad de la proteína cruda (DPC) en las algas pardas y rojas, *L. digitata* y *Palmaria palmata* tienen la mayor degradabilidad comparados con *Pelvetia canaliculata* y *Mastocarpus stellatus* (Tayyab *et al.*, 2016). La degradabilidad *in situ* de los aminoácidos de las algas rojas es mayor comparada con las algas pardas; esto está relacionado con la concentración de aminoácidos de cada especie (Gaillard *et al.*, 2018). La baja degradabilidad de los aminoácidos en las algas pardas tiene que ver con su contenido de clorotaninos y la estructura química de sus paredes celulares; sin embargo, también influyen las propiedades físicas (anatomía y morfología) y su composición de aminoácidos. De acuerdo a Rjiba-Ktita *et al.* (2017) y Park *et al.* (2022), los altos niveles de ceniza y de proteína insoluble en detergente neutro (PIDN) de las algas, reducen la DMO y DPC. Como consecuencia de este último, se incrementa el suministro de aminoácidos en el intestino delgado de los rumiantes, por lo que las algas podrían ser una fuente de proteína de sobrepaso (Gaillard *et al.*, 2018).

Tabla 1.5. Efecto de especie de alga y sustrato base sobre la degradabilidad *in situ*.

Especie	Dosis g/kg MS	Sustrato base	Degradabilidad	Referencia
<i>U. pinnatifida</i>	1000	Heno	↑ DMS a las 24, 48 y 72 h	(1)
<i>S. fusiforme</i>	1000	Heno	↑ DMS a las 24 h	(2)
<i>S. fulvellum</i>	1000	Heno	↑ DMS a las 24 h	(3)
<i>C. linum</i>	1000	Forraje de Cebada	DMO: 55.8 %	(4)
<i>U. lactuca</i>	1000	Forraje de Cebada	DMO: 89.7 %	(4)
<i>C. linum</i>	100 - 400	Concentrado	s.e. DMS	(4)
<i>U. lactuca</i>	100 - 400	Concentrado	s.e. DMS	(4)
<i>Alaria esculenta</i>	1000	Sin control	DMS: 77.4%, DPC: 71.7%	(5)
<i>L. digitata</i>	1000	Sin control	DMS: 92.4%, DPC: 81.9%	(5)
<i>P. canaliculata</i>	1000	Sin control	DMS: 28.9%, DPC: 32.2%	(5)
<i>M. stellatus</i>	1000	Sin control	DMS: 38.8%, DPC: 41.7%	(5)
<i>P. palmata</i>	1000	Sin control	DMS: 91.3%, DPC: 80.4%	(5)
<i>Porphyra sp.</i>	1000	Sin control	DMS: 70.7%, DPC: 69.8	(5)
<i>Acrosiphonia sp.</i>	1000	Sin control	DMS: 64.8%, DPC: 66.1%	(5)
<i>Ulva sp.</i>	1000	Sin control	DMS: 43.2%, DPC: 44.8%	(5)
<i>L. digitata</i>	1000	Sin control	DTAA: 20.6%	(6)

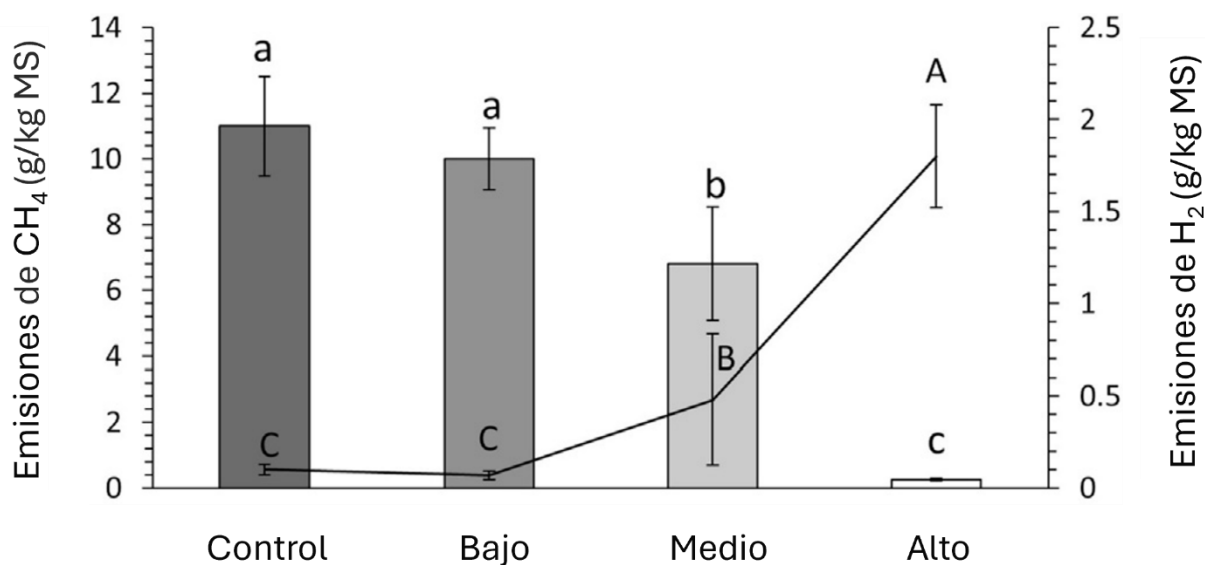
<i>M. stellatus</i>	1000	Sin control	DTAA: 9.5%	(6)
<i>P. palmata</i>	1000	Sin control	DTAA: 51.8%	(6)
<i>Porphyra sp.</i>	1000	Sin control	DTAA: 35.1%	(6)
<i>Cladophora rupestris</i>	1000	Sin control	DTAA: 34.2%	(6)
<i>Ulva sp.</i>	1000	Sin control	DTAA: 27.4%	(6)
<i>Ulva sp.</i>	1000	Heno de Alfalfa	s.e. DMS, ↓ DMO, ↓ DPC	(7)
<i>Sargassum horneri</i>	1000	Heno de Alfalfa	↓ DMS, ↓ DMO, ↓ DPC	(7)

DPC: degradabilidad de la PC; DTAA: degradabilidad total de los aminoácidos.

Choi et al., 2019 (1); Choi et al., 2020a (2); Choi et al., 2020b (3); Rjiba-Ktita et al., 2017 (4); Tayyab et al., 2016 (5); Gaillard et al., 2018 (6); Park et al., 2022 (7).

1.2.7. Consumo y digestibilidad de las algas en rumiantes

La alta concentración de algas en las dietas para rumiantes, reducen el consumo de MS por los cambios negativos en la gustosidad ocasionada por el alto contenido de minerales (Altomonte *et al.*, 2018) y, por el incremento de hidrógeno metabólico en el rumen (Fig. 1), que resulta de la inhibición de la metanogénesis (Roque *et al.*, 2019b). Sin embargo, este efecto depende de la especie de alga (Tabla 1.6) y la dosis; estudios con ovinos, cabras y vacas que recibieron algas en la dieta, reportan que el consumo y digestibilidad de los nutrientes no se vieron afectados (Singh *et al.*, 2015; de Lima *et al.*, 2019; Liu *et al.*, 2020; El-Kassim *et al.*, 2021; Newton *et al.*, 2021).



Fuente: Kinley *et al.*, 2020

Figura 1.1 Producción de CH₄ entérico e hidrógeno (H₂) en novillos alimentados con una dieta mixta alta en grano con inclusión creciente de *Asparagopsis taxiformis*: 0.00 (Control), 0.05 (Bajo), 0.10 (Medio) y 0.20% (Alto).

Por otro lado, los clorotaninos modifican el consumo y el metabolismo del N en los rumiantes de manera diferencial. En ovinos, *S. latissima* no afecta el consumo de MS, pero incrementa la digestibilidad del N (Gülzari *et al.*, 2019). Mientras que en bovinos, *Undaria pinnatifida* redujo el consumo sin afectar la productividad animal (Hwang *et al.*, 2014). En vacas lactantes, *A. nodosum* incrementa el consumo de nutrientes y la digestibilidad de la PC, lo cual se refleja en el N urinario y fecal (Antaya *et al.*, 2019). Probablemente, el efecto diferencial de los clorotaninos en los estudios se deba a las diferencias en las concentraciones y a la estructura química de estos compuestos fenólicos; como sucede con las plantas terrestres taniníferas, pero este efecto no es claro.

Con las algas rojas del género *Asparagopsis*, también se observa un efecto diferencial. La inclusión de hasta un 3% de *A. taxiformis* en la dieta fibrosa de corderos no afecta el consumo y, las emisiones de CH₄ se redujeron linealmente (Li *et al.*, 2018). Estos valores concuerdan con Kinley *et al.* (2020) en novillos que recibieron niveles bajos de *A. taxiformis* (0.05, 0.10 y 0.20%) en una dieta alta en granos, donde el consumo de MS no se vio afectado y el CH₄ disminuyó en 9, 38 y 98%, respectivamente (Fig. 1). Por el contrario, en vacas lecheras la inclusión de 0.5 y 1% de *A. armata* en la dieta, redujo el CH₄ y el consumo de MS en 26.4 y 67.2 % y, 10 y 38 %, respectivamente (Roque *et al.*, 2019b). La respuesta de las algas sobre las emisiones de CH₄ depende de la especie de alga y la calidad de la dieta (Antaya *et al.*, 2019; de la Moneda *et al.*, 2019; Lind *et al.*, 2020; Molina-Alcaide *et al.*, 2017).

1.2.8. Cambios en los patrones de fermentación en rumiantes suplementados con algas

Las algas modifican el microbioma y en consecuencia la fermentación ruminal (Abbott *et al.*, 2020; Michalak *et al.*, 2021). Los escasos estudios *in vivo*, indican que la dieta basal juega un importante rol; Li *et al.* (2018) argumentan que la inclusión de *A. taxiformis* en ovinos, disminuye la PTAGV y el CH₄, pero incrementa la proporción de propiónico. Por el contrario, la inclusión de *A. taxiformis* en bovinos de carne, no solo no modifica la PTAGV, sino que tiende a disminuir el acetato y a incrementar el propionato como una consecuencia de la inhibición de la metanogénesis en el rumen (Kinley *et al.*, 2020). Estos cambios sobre las proporciones molares de los AGV han sido demostrados en estudios *in vitro* con algas ricas en bromoformo (Kinley *et al.*, 2016; Machado *et al.*, 2016a; Machado *et al.*, 2016b).

Tabla 1.6. Efecto de las algas sobre el consumo, digestibilidad y parámetros de fermentación en los rumiantes.

Especie	Especie de rumiante	Dosis g/kg MS	Dieta base	Consumo	Digestibilidad	CH ₄ y AGV	Referencia
<i>A. nodosum</i>	Vacas	6.40	F+RTM	↑ MS, ↑MO, ↑FDN, ↑FDA y ↑PC	↓PC, ↓FDA, ↓NU/C y ↑NF/C	s.e. CH ₄	(1)
<i>Halimeda opuntia</i>	Corderos	10	RTM	s.e.	↑MS, ↑MO, ↑PC, ↑FC y ↑ELN	s.e. AGV	(2)
<i>Gracilaria birdiae</i>	Cabras	40 - 120	F60:40C	s.e.	-	-	(3)
<i>S. latissima</i>	Ovinos	162	Heno	s.e.	s.e.	↓ PTAGV	(4)
<i>Porphyra spp.</i>	Ovinos	108	Heno	s.e.	↑N, ↑NU/C y ↓NF/C	s.e. AGV	(4)
<i>U. pinnatifida</i>	Novillos	20	DC	s.e.	-	-	(5)
<i>Sargassum wightii</i>	Vacas	200	RTM	s.e.	s.e.	-	(6)
<i>A. armata</i>	Vacas	5 y 10	RTM	↓ MS con ↑ dosis	-	↓ CH ₄ con ↑ dosis	(7)
<i>A. taxiformis</i>	Novillos	2.5 y 5	RTM	↓ MS con ↑ dosis	-	↓ CH ₄ con ↑ dosis	(8)
<i>A. taxiformis</i>	Novillos	5 - 20	RTM	s.e.	-	↓ CH ₄ con ↑ dosis; AGV: ↓ C2, ↑ C3, ↓ C2:C3 con ↑ dosis	(9)
<i>S. latifolium</i>	Corderos	20 y 40	Con+H	s.e.	-	-	(10)
<i>A. taxiformis</i>	Ovejas	5 - 30	Con+ lupino	s.e.	-	↓ CH ₄ con ↑ dosis; ↓ PTAGV con ↑ dosis, ↓ C2, ↑ C3, ↓ C2:C3	(11)
<i>Porphyra spp.</i>	Ovejas	97	FE+AV	MS, ↑MO, ↑FDN y ↑PC	-	s.e. CH ₄ ; s.e. AGV	(12)
<i>Sargassum johnstonii</i>	Vacas	80	RTM	↓ MS, ↓ PC	-	s.e. CH ₄ ;	(13)
<i>A. nodosum</i>	Ovinos	10 - 50	RTM	-	-	↑ C2 con ↑ dosis, ↓C3, C4, ↓ C2:C3 con ↑ dosis	(14)

RTM: ración total mixta; F+RTM: Forraje más ración total mixta; F60:40C: 60 % de forraje y 40 % de concentrado; DC: dieta con 8% de PC y 41% de FDN; Con: concentrado; Con+H: alimento concentrado más heno; FE+AV: forraje ensilado más avena; C2: acético; C3: propiónico; C4: butírico.

Antaya et al., 2019 (1); El-Kassim et al., 2021 (2); de Lima et al., 2019 (3); Gulzari et al., 2019 (4); Hwang et al., 2014 (5); Singh et al., 2015 (6); Roque et al., 2019b (7); Roque et al., 2021 (8); Kinley et al., 2020 (9); Ibrahim et al., 2020 (10); Li et al., 2018 (11); Lind et al., 2020 (12); Katwal et al., 2021 (13); Zhou et al., 2018 (14)

El mecanismo de acción de este compuesto halogenado es a través de su unión competitiva a la coenzima M metiltransferasa, inhibiendo la transferencia de metilo en la ruta metanogénica; además de bloquear la actividad de la metil coenzima M reductasa, que cataliza el último paso y limita la tasa de producción de CH₄ (Glasson *et al.*, 2022; Roque *et al.*, 2019b).

Algunas especies utilizadas como fuentes de proteína como *S. latissima* en dietas para ovinos, han mostrado efectos diferenciales donde *S. latissima* reduce la PTAGV y el NH₃ en el rumen (Tabla 1.6 y 1.7); mientras que *Porphyra sp.* no tiene respuesta (Gülzari *et al.*, 2019). Lind *et al.* (2020) al evaluar *Porphyra sp.* en corderos, la concentración de NH₃ y el acetato en el rumen incrementaron comparados con el control. Otro estudio con *A. nodosum* en ovinos, reporta que no hubo cambios en la PTAGV, pero la concentración de acetato aumentó y la de propionato y butirato disminuyeron con el nivel de inclusión (Zhou *et al.*, 2018). Otros factores que hay que considerar son: época de colecta y procesamiento postcolecta ya que influyen en la composición química de las algas.

1.2.9. Cambios en el microbioma ruminal por efecto de las algas marinas

La producción de CH₄ está relacionada con el tamaño de la población metanógena en el rumen, aunque podría ser la constitución más que el tamaño de la comunidad lo que más influye en la metanogénesis (Abbott *et al.*, 2020). El bromoformo provoca cambios en la estructura de las poblaciones de arqueas metanogénicas (Roque *et al.*, 2019a). Al respecto, *A. taxiformis* adicionada al 2% disminuye entre 72 y 75% la población de metanógenos (Tabla 1.7), correlacionándose con una reducción de 77 y 99% en la producción de CH₄ (Machado *et al.*, 2018).

Por otro lado, los clorotaninos afectan selectivamente la abundancia de las bacterias celulolíticas y reducen las arqueas metanogénicas sin comprometer la utilización de la fibra del alimento (Choi *et al.*, 2021a; Choi *et al.*, 2021b). Wang *et al.* (2009) reportan incrementos en las poblaciones bacterianas no celulolíticas, lo cual sugiere que el efecto de los clorotaninos sobre el microbioma ruminal depende del tipo de dieta. Por otro lado, se observan disminuciones en la población de protozoarios en líquido ruminal por la adición de algas rojas a un sustrato fibroso (Widiawati y Hikmawan, 2021).

Tabla 1.7. Efecto de las algas sobre el pH, NH₃ y poblaciones microbianas en líquido ruminal.

Especie	Dosis g/kg MS	Sustrato base	pH, NH ₃ y poblaciones microbianas	Referencia
<i>A. taxiformis</i>	50	RSP	↓ <i>Methanobrevibacter</i> , <i>Methanosphaera</i> , <i>vadin</i> CA11 de la familia <i>Methanomassiliicoccaceae</i> , <i>Methanoplanus</i> y <i>Methanimicrococcus</i> .	(1)
<i>A. taxiformis</i>	20	Heno	↓ <i>Methanobacteriales</i> , <i>Methanomassiliicoccales</i> y <i>Methanomicrobiales</i> .	(2)
<i>S. fulvellum</i>	10 - 100	Heno	↓ pH con ↑ dosis	(3)
<i>U. pinnatifida</i>	20 - 40	Con+H	↑ pH; ↓ NH ₃	(4)
<i>E. stolonifera</i>	50	Heno	↓ pH; ↑ NH ₃ ; ↓ <i>R. albus</i> y <i>R. flavefaciens</i> y ↑ <i>F. succinogenes</i> , ↓ arqueas M., ↑ CAM.	(5)
<i>E. bicyclis</i>	50	Heno	pH (↓ 24 y ↑ 48h); ↓ NH ₃ ; ↓ <i>R. albus</i> y <i>R. flavefaciens</i> , ↓ arqueas M y CAM.	(5)
<i>S. fulvellum</i>	50	Heno	pH (↓ 24 y ↑ 48h); ↓ NH ₃ (6 y 72h); ↓ <i>R. albus</i> y <i>R. flavefaciens</i> y ↑ <i>F. succinogenes</i>	(5)
<i>U. pinnatifida</i>	50	Heno	↑ pH; ↑ NH ₃	(5)
<i>S. fusiforme</i>	50	Heno	pH (↓ 24, ↑ 48 y 72h); ↑ NH ₃ (12 y 48h); ↓ <i>R. albus</i> y <i>R. flavefaciens</i> y ↑ <i>F. succinogenes</i> ; ↑ arqueas M; ↑ CAM	(5)
<i>A. nodosum</i>	0.5 - 2 g L ⁻¹	RTM	↓ actividad protozoaria con ↑ de la dosis	(6)
<i>L. digitata</i>	0.5 - 2 g L ⁻¹	RTM	s.e.	(6)
<i>A. nodosum</i>	50	50F:50C	↓ protozoarios	(7)
<i>L. digitata</i>	50	50F:50C	↓ protozoarios	(7)
<i>E. cottonii</i>	40 -120	Heno	↓ protozoos y ↑ bacterias totales con ↑ dosis	(8)
<i>A. nodosum</i>	50	Silo de cebada y heno	↓ <i>F. succinogenes</i> , ↓ <i>R. albus</i> y s.e. <i>R. flavefaciens</i> ; ↑ <i>S. ruminantium</i> , ↑ <i>R. amylophilus</i> y ↑ <i>P. bryantii</i>	(9)

RSP: ración super básica; Con+H: alimento concentrado más heno; 50F:50C: 50 % forraje y 50 % concentrado; RTM: ración total mixta; M: metanogénicas o metanógenos; CAM: ciliados asociados a metanógenos; s.e.: sin efecto.

Roque *et al.*, 2019a (1); Machado *et al.*, 2018 (2); Choi *et al.*, 2020b (3); Hong *et al.*, 2015 (4); Choi *et al.*, 2021a (5); Belanche *et al.*, 2016b (6); Belanche *et al.*, 2016a (7); Widiawati y Hikmawan, 2021 (8); Wan *et al.*, 2009 (9).

El contenido de clorotaninos y polisacáridos sulfatados de las algas pardas tienen propiedades antioxidantes, antimicrobianas y antiprotozoarias (Belanche *et al.*, 2016b; Choi *et al.*, 2021a; Choi *et al.*, 2020a; Makkar *et al.*, 2016; Pradhan *et al.*, 2022). Belanche *et al.* (2016b) y Canul-Ku *et al.* (2023) con *A. nodosum* y sargazo pelágico observaron una disminución sobre la actividad de los protozoarios y población de protozoarios, mientras que la producción de gas y CH₄ se redujeron. El mecanismo de acción antibacteriano de estos compuestos fenólicos se relaciona con su capacidad de afectar la permeabilidad de la pared celular, provocando lisis celular y por la supresión de la reproducción bacteriana (Pradhan *et al.*, 2022).

In vivo, los efectos de las algas sobre el ambiente ruminal dependen de: la especie de alga, nivel de inclusión, especie de rumiante y tipo de dieta basal (Tabla 1.8). Algunos estudios con algas pardas adicionados en niveles de 1 a 16% en la dieta de ovinos no afectan el pH y el N-NH₃ en el rumen (Gülzari *et al.*, 2019; El-Kassim *et al.*, 2021). Las algas rojas del género *Asparagopsis*, se han utilizado en dietas para bovinos en bajos niveles de inclusión que no rebasan el 1% con buenos resultados (Roque *et al.*, 2019b; Kinley *et al.*, 2020; Roque *et al.*, 2021; Bolkenov *et al.*, 2021). En ovinos se ha incluido en niveles un poco más altos (0.5, 1, 2 y 3%), donde el pH ruminal no se ha visto afectado mientras que el N-NH₃ ha tendido a disminuir con el incremento del nivel en la dieta (Li *et al.*, 2018). Con base a los pocos estudios *in vivo*, la adición de algas en dietas para rumiantes no provoca cambios sustanciales en el pH ruminal que pudieran afectar negativamente otros parámetros fermentativos y, comprometer la productividad animal.

Por otro lado, Zhou *et al.* (2018) demostró que la inclusión de *A. nodosum* en ovinos, redujo las poblaciones de arqueas totales e incrementó la población de protozoos. Esto podría deberse a que los cambios provocados por las algas sobre las comunidades microbianas son lentos y podrían no estar relacionados con la reducción en la producción de gas (Roque *et al.*, 2019a). Antaya *et al.* (2019), sugieren la existencia de un efecto temporal o una adaptación de la comunidad metanogénica a la dosis suministrada a lo largo del tiempo. En concordancia Min *et al.* (2021) afirman que la duración de los ensayos de alimentación animal podría explicar las discrepancias de los resultados, principalmente porque algunos trabajos con algas son muy cortos en duración y no consideran la diferencia en el tiempo de adaptación de los metanógenos con respecto a las bacterias a los cambios dietarios.

Tabla 1.8. Efecto de las algas sobre el pH, NH₃ y poblaciones microbianas en el rumen.

Especie de alga	Especie de rumiante	Dosis g/kg MS	Dieta basal	pH, NH ₃ y poblaciones microbianas	Referencia
<i>H. opuntia</i>	Ovinos	10	RTM	s.e.	(1)
<i>S. latissima</i>	Ovinos	162	Heno	s.e.	(2)
<i>Porphyra spp</i>	Ovinos	108	Heno	s.e.	(2)
<i>A. nodosum</i>	Ovinos	10 - 50	RTM	↑ NH ₃ ; ↓ bacterias y arqueas totales, ↑ protozoos con ↑ dosis; ↑ familias: <i>Veillonellaceae</i> , <i>Blautia producta</i> y <i>Entodinium</i> ; ↓ familias: <i>Coriobacteriaceae</i> , <i>Roseburia sp.</i> , <i>Coprococcus sp.</i> y <i>Prevotella copri</i>	(3)
<i>A. taxiformis</i>	Ovinos	5 - 30	Con + Lupino	s.e.	(4)

RTM: ración total mixta; s.e.: sin efecto

El-Kassim *et al.*, 2021 (1); Gulzari *et al.*, 2019 (2); Zhou *et al.*, 2018 (3); Li *et al.*, 2018 (4)

1.2.10. Efecto de las algas marinas sobre el comportamiento productivo

Las algas marinas mejoran el crecimiento y la calidad de la carne en rumiantes debido a su actividad prebiótica en el intestino y a su efecto positivo sobre el estado oxidativo de los animales (Costa *et al.*, 2021). Ellamie *et al.* (2020) e Ibrahim *et al.* (2020) observaron un incremento en la ganancia de peso (GP) en ovejas alimentadas con niveles de 2 y 4% de *S. latifolium*. Del mismo modo, la suplementación de bovinos con *U. pinnatifida*, mejora el estado inmunitario y la GP y la eficiencia alimenticia (Hwang *et al.*, 2014). Mientras que otros estudios en pequeños rumiantes, indican que la GP y el peso vivo final no son afectados por la adición de bajos a moderados niveles de algas (Rjiba-Ktita *et al.*, 2019; Lind *et al.*, 2020; Sharma y Datt, 2020; El-Kassim *et al.*, 2021). De acuerdo a Evans y Critchley (2014), niveles de hasta 2% de algas producen efectos benéficos en la fisiología digestiva de los rumiantes, mientras que niveles por encima de 10% de la MS de la dieta reducen el rendimiento animal.

Las especies de algas rojas del género *Asparagopsis*, son considerados potentes inhibidores de CH₄ en los rumiantes y se han evaluado sus efectos sobre el rendimiento animal (Tabla 1.9). Al respecto, cuando se incluyen niveles crecientes (0.05 a 3%) de *A. taxiformis* en dietas para ovinos y bovinos de carne no se observan diferencias sobre la GP, aunque la conversión alimenticia puede verse mejorada (Li *et al.*, 2018; Roque *et al.*, 2021).

Cuando esta misma especie de alga se evaluó en bovinos alimentados con una dieta alta en granos con niveles de inclusión de 0.05, 0.1 y 0.20%, la GDP incrementó por arriba de 20% (Kinley *et al.*, 2020). Es de vital importancia elegir cuidadosamente los niveles a utilizar en los estudios de alimentación animal; si bien se busca reducir las emisiones de CH₄, también es necesario buscar un punto de inflexión donde se obtenga una reducción considerable de este GEI sin comprometer los parámetros productivos.

1.2.11. Efecto del consumo de algas sobre la calidad de la carne y leche

Las algas marinas pueden ser ingredientes potenciales de dietas para rumiantes (Campbell *et al.*, 2020; Choi *et al.*, 2019). Algunas especies de algas, pueden modificar el contenido de ácidos grasos en el rumen y mejorar la calidad de los productos derivados (Maia *et al.*, 2019). Las algas pardas como *A. nodosum* y *U. pinnatifida* mejoran la puntuación de marmoleo, la terneza, la uniformidad del color y el enrojecimiento, además de mejorar el perfil de ácidos grasos de la carne (Costa *et al.*, 2021). Dichos efectos pueden estar relacionado con el alginato, fucosterol, fibra dietética y a los clorotaninos (Hwang *et al.*, 2014).

En los estudios realizados con *A. taxiformis* en bovinos en niveles de 0.05 a 0.50 %, la calidad, composición química de la canal y los atributos sensoriales de la carne no fueron afectados, y tampoco se detectaron residuos de bromoformo en carne, riñón y grasa a diferencia del yodo que incrementó (Kinley *et al.*, 2020; Roque *et al.*, 2021). Aunque, el bromoformo puede excretarse en orina y leche; el mecanismo exacto de excreción, la formación de metabolitos y su potencial toxicidad son desconocidos; por lo tanto, se requiere de estudios que evalúen el bienestar animal y el metabolismo del bromoformo en el corto y largo plazo, para dilucidar su tasa de transferencia en los productos derivados (Muizelaar *et al.*, 2021). Por otro lado Bolkenov *et al.*, (2021) al evaluar los mismo niveles de *A. taxiformis* en bovinos, observaron afectos negativos sobre las características microbianas y fisicoquímicas de la carne (Tabla 1.9). Esto puede ser debido a un efecto de época de colecta; por esta razón, es de suma importancia tomar en cuenta la época de colecta de las algas y la cuantificación específica del contenido de metabolitos secundarios (bromoformo, clorotaninos, etc.) (Roskam *et al.*, 2022).

Tabla 1.9. Efectos de las algas sobre el rendimiento productivo y calidad de los productos en los rumiantes.

Especie de alga	Especie de rumiante	Dosis g/kg MS	Dieta basal	Rendimiento productivo	Calidad de la carne y leche	Referencia
<i>S. latifolium</i>	Corderos	20 - 40	Con+H	↑GPC	-	(1)
<i>S. latifolium</i>	Corderos	20 - 40	Con+H	↑ GDP, ↑ CA	-	(2)
<i>H. opuntia</i>	Corderos	10	RTM	↑ CA	-	(3)
<i>U. pinnatifida</i>	Novillos	20	DC	↑ GDP, ↑ CA	En músculo longísimo ↓ C14:0 y C16:1 n-7; ↑ C18:0 y C18 n-3; ↓ AGPI/AGS y n-6/n-3; ↓ colesterol en carne	(4)
<i>Ulva sp.</i>	Corderos	200 - 400	Con	s.e.	-	(5)
<i>Chaetomorpha sp.</i>	Corderos	200 - 400	Con	s.e.	-	(5)
<i>Porphyra sp.</i>	Corderos	97	FE+AV	↑ GDP	-	(6)
<i>A. taxiformis</i>	Novillos	5 - 20	RTM	↑ GDP	s. e.	(7)
<i>A. taxiformis</i>	Novillos	2.5 - 5	RTM	↑ CA con ↑ dosis	↑ el I con ↑ dosis en canal	(8)
<i>A. taxiformis</i>	Ovejas	5 - 30	Con + Lupino	s.e.	-	(9)
<i>S. wightii</i>	Vacas	200	RTM	↑ PDL	-	(10)
<i>U. pinnatifida</i>	Vacas	20 - 40	Con+H	s.e.	s.e.	(11)
<i>A. nodosum</i> y <i>L. digitata</i>	Vacas 1	0.89 y 3.46	FE+Con	s.e.	↓ Se, ↑ I; ↓ Cu, ↑ As, ↓ proteína y ↓ caseína en leche	(12)
<i>A. nodosum</i>	Vacas	6.40	F+RTM	s.e.	↑ I en la leche	(13)
<i>G. birdiae</i>	Cabras	40 - 120	F60:40C	s.e.	s.e.	(14)
<i>A. armata</i>	Vacas	5 - 10	RTM	↓ PDL	↓ la proteína de la leche con ↑ dosis	(15)
<i>S. johnstonii</i>	Vacas	80	RTM	↓ PDL	s.e.	(16)
<i>A. taxiformis</i>	Novillos	2.5 - 5	RTM	-	↓ luminosidad del músculo, ↑ población microbiana en los filetes (oscurecimiento)	(17)
<i>A. nodosum</i>	Vacas	23	RTM	-	↑ I y ↓ AAL, ↑ <i>Lactococcus lactis</i> y ↓ <i>Pseudomonas</i> en leche.	(18)

Con+H: alimento concentrado más heno; RTM: ración total mixta; DC: dieta con 8% de PC y 41% de FDN; Con: concentrado; FE+AV: forraje ensilado más avena; FE+Con: forraje ensilado más concentrado; F+RTM: Forraje más ración total mixta; F60:40C: 60 % de forraje y 40 % de concentrado; C14:0: ácido mirístico; C16:1 n-7: ácido palmitoleico; C18:0: ácido esteárico; y C18 n-3: ácido linolénico; AGS: ácidos grasos saturados; AGPI: ácidos grasos polinsaturados; n-3: omega 3 n-6: omega 6; AAL: aminoácidos libres; GDC: ganancia de peso corporal; GDP: ganancia diaria de peso; CA: conversión alimenticia; PDL: producción de leche; Ellamie *et al.*, 2020 (1); Ibrahim *et al.*, 2020 (2); El-Kassim *et al.*, 2021 (3); Hwang *et al.*, 2014 (4); Rjiba-Ktita *et al.*, 2019 (5); Lind *et al.*, 2020 (6); Kinley *et al.*, 2020 (7); Roque *et al.*, 2021 (8); Li *et al.*, 2018 (9); Singh *et al.*, 2015 (10); Hong *et al.*, 2015 (11); Newton *et al.*, 2021 (12); Antaya *et al.*, 2019 (13); de Lima *et al.*, 2019 (14); Roque *et al.*, 2019b (15); Katwal *et al.*, 2021 (16); Bolkenov *et al.*, 2021 (17); Chaves Lopez *et al.*, 2016 (18).

Desde el punto de vista de la salud animal y del consumidor, es importante tener cuidado cuando se utilizan especies de algas ricas en I y As, para evitar un suministro excesivo en los animales y por ende en la leche (Newton *et al.*, 2021). La concentración máxima de yodo y arsénico tolerable por los rumiantes es de 50 mg/kg MS; por lo tanto, dietas por encima de este nivel, incrementan los niveles de I en la leche por encima del umbral de 500 µg/L recomendado para el consumo humano (Antaya *et al.*, 2019). Por otro lado, la inclusión de 2.3 % de *Ascophyllum nodosum* tomando como referencia los niveles recomendados de I, mejora el contenido de yodo de la leche y la calidad de la leche (Chaves Lopez *et al.*, 2016). Con respecto al bromoformo, se ha observado que los niveles en la leche están muy por debajo (0.15 µg/L) de los límites establecidos para el consumo humano (80 µg/L) cuando las vacas reciben de 0.5 a 1.0 % de *Asparagopsis armata* (Roque *et al.*, 2019b).

1.2.12. Futuro del uso de algas marinas en la nutrición de rumiantes

A nivel Latinoamérica, el estudio de Canul-Ku *et al.* (2023) sobre el uso del sargazo pelágico en la nutrición de rumiantes es pionera y, es un parteaguas para la promoción de este valioso recurso no convencional como un tópico de interés para la ciencia animal. En las zonas tropicales de México donde la ganadería genera más CH₄ entérico, el uso del sargazo como una estrategia alimenticia para la mitigación de CH₄ traería beneficios ambientales. Sin embargo, se requiere de estudios sobre la concentración y especiación de arsénico y otros compuestos potencialmente tóxicos del sargazo por época y su tasa de transferencia a los productos (Muizelaar *et al.*, 2021; Carrillo-Domínguez *et al.*, 2023); para esto es necesario realizar ensayos de alimentación en rumiantes con dosis crecientes de inclusión bajo diferentes regímenes de alimentación, que evalúen el microbioma ruminal asociado con la eficiencia alimenticia y los parámetros inmunológicos asociados con el bienestar animal (Min *et al.*, 2021), con la finalidad de descartar efectos nocivos en la salud animal y en los productos derivados. Además del contenido de arsénico, otra de las limitantes en su uso a gran escala en la alimentación animal sería los costos que conlleva el método de colección, secado y molienda para convertirlo en harina, preservando la calidad de los compuestos bioactivos. No obstante, este costo es justificable si se toma en cuenta que un 1.0 km de playa/año tiene un costo de limpieza de sargazo de entre 300,000.00-1,000,000.00 de dólares (Rodríguez-Martínez *et al.*, 2023). Finalmente, el área de oportunidad entorno al aprovechamiento del sargazo permitiría el surgimiento de economías circulares

especializadas en la colecta, conservación y valorización (Chávez *et al.*, 2020). Al respecto, la creación de alimentos funcionales a base de algas pardas para la nutrición animal y humana; contribuiría a múltiples objetivos de desarrollo sustentable de la agenda 2030: acción por el clima, salud y bienestar, hambre cero, trabajo decente y crecimiento económico (Dijkstra *et al.*, 2021).

Como conclusión de la revisión de literatura y con base en los niveles máximos de inclusión de las diferentes especies de algas en la dieta de diferentes especies de rumiantes, el uso de las algas más que un suplemento o complemento, se debe considerar como un aditivo con propiedades antimetanogénicas, prebióticas, inmuno-moduladoras y mejoradoras de la calidad de la carne y leche.

1.3. Literatura Citada

- Abbott, D. W., Aasen, I. M., Beauchemin, K. A., Grondahl, F., Gruninger, R., Hayes, M., Huws, S., Kenny, D. A., Krizsan, S. J., Kirwan, S. F., Lind, V., Meyer, U., Ramin, M., Theodoridou, K., Soosten, D. von, Walsh, P. J., Waters, S., & Xing, X. (2020). Seaweed and seaweed bioactives for mitigation of enteric methane: Challenges and opportunities. *Animals*, 10(12), 1–28. <https://doi.org/10.3390/ani10122432>
- Abu El-Kassim, M., Abdou, S., Hassan, E., & Abdullah, M. (2021). Effect of macroalgae and yeast culture on body performance, blood metabolites, ruminal fermentation and digestibility coefficients of Ossimi lambs. *Archives of Agriculture Sciences Journal*, 4(1), 156–167. <https://doi.org/10.21608/aasj.2021.77678.1065>
- Altomonte, I., Salari, F., Licitra, R., & Martini, M. (2018). Use of microalgae in ruminant nutrition and implications on milk quality – A review. *Livestock Science*, 214(January), 25–35. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2018.05.006>
- Amador-Castro, F., García-Cayuela, T., Alper, H. S., Rodriguez-Martinez, V., & Carrillo-Nieves, D. (2021). Valorization of pelagic sargassum biomass into sustainable applications: Current trends and challenges. *Journal of Environmental Management*, 283(January). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112013>
- Angulo, C., Chavez-Infante, L., Reyes-Becerril, M., Angulo, M., Romero-Geraldo, R., Llinas-Cervantes, X., & Cepeda-Palacios, R. (2020). Immunostimulatory and

- antioxidant effects of supplemental feeding with macroalga *Sargassum* spp. on goat kids. *Tropical Animal Health and Production*, 52(4), 2023–2033. <https://doi.org/10.1007/s11250-020-02218-5>
- Antaya, N. T., Ghelichkhan, M., Pereira, A. B. D., Soder, K. J., & Brito, A. F. (2019). Production, milk iodine, and nutrient utilization in Jersey cows supplemented with the brown seaweed *Ascophyllum nodosum* (kelp meal) during the grazing season. *Journal of Dairy Science*, 102(9), 8040–8058. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-16478>
- Antaya, N. T., Soder, K. J., Kraft, J., Whitehouse, N. L., Guindon, N. E., Erickson, P. S., Conroy, A. B., & Brito, A. F. (2015). Incremental amounts of *Ascophyllum nodosum* meal do not improve animal performance but do increase milk iodine output in early lactation dairy cows fed high-forage diets¹. *Journal of Dairy Science*, 98(3), 1991–2004. <https://doi.org/10.3168/jds.2014-8851>
- AOAC. (1990). AOAC. In *Association of Official Analytical Chemists. 15th ed (1)*. Arlington, VA, USA. <https://doi.org/10.7591/cornell/9781501766534.003.0007>
- Barbosa, M., Lopes, G., Andrade, P. B., & Valentão, P. (2019). Bioprospecting of brown seaweeds for biotechnological applications: Phlorotannin actions in inflammation and allergy network. *Trends in Food Science and Technology*, 86(June 2018), 153–171. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.02.037>
- Belanche, A., Jones, E., Parveen, I., & Newbold, C. J. (2016). A metagenomics approach to evaluate the impact of dietary supplementation with *Ascophyllum nodosum* or *Laminaria digitata* on rumen function in Rusitec fermenters. *Frontiers in Microbiology*, 7(MAR), 1–14. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.00299>
- Belanche, A., Ramos-Morales, E., & Newbold, C. J. (2016). In vitro screening of natural feed additives from crustaceans, diatoms, seaweeds and plant extracts to manipulate rumen fermentation. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 96(9), 3069–3078. <https://doi.org/10.1002/jsfa.7481>
- Beuvink, J. M., & Kogut, J. (1993). Modeling gas production kinetics of grass silages incubated with buffered ruminal fluid. *Journal of Animal Science*, 71(4), 1041–1046. <https://doi.org/10.2527/1993.7141041x>

- Biancarosa, I., Belghit, I., Bruckner, C. G., Liland, N. S., Waagbø, R., Amlund, H., Heesch, S., & Lock, E. J. (2018). Chemical characterization of 21 species of marine macroalgae common in Norwegian waters: benefits of and limitations to their potential use in food and feed. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98(5), 2035–2042. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8798>
- Bikker, P., Stokvis, L., van Krimpen, M. M., van Wikselaar, P. G., & Cone, J. W. (2020). Evaluation of seaweeds from marine waters in Northwestern Europe for application in animal nutrition. *Animal Feed Science and Technology*, 263(February), 114460. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2020.114460>
- Bikker, P., van Krimpen, M. M., van Wikselaar, P., Houweling-Tan, B., Scaccia, N., van Hal, J. W., Huijgen, W. J. J., Cone, J. W., & López-Contreras, A. M. (2016). Biorefinery of the green seaweed *Ulva lactuca* to produce animal feed, chemicals and biofuels. *Journal of Applied Phycology*, 28(6), 3511–3525. <https://doi.org/10.1007/s10811-016-0842-3>
- Bolkenov, B., Duarte, T., Yang, L., Yang, F., Roque, B., Kebreab, E., & Yang, X. (2021). Effects of red macroalgae *Asparagopsis taxiformis* supplementation on the shelf life of fresh whole muscle beef. *Translational Animal Science*, 5(2), 1–9. <https://doi.org/10.1093/tas/txab056>
- Brooke, C. G., Roque, B. M., Shaw, C., Najafi, N., Gonzalez, M., Pfefferlen, A., De Anda, V., Ginsburg, D. W., Harden, M. C., Nuzhdin, S. V., Salwen, J. K., Kebreab, E., & Hess, M. (2020). Methane Reduction Potential of Two Pacific Coast Macroalgae During in vitro Ruminant Fermentation. *Frontiers in Marine Science*, 7(July), 1–7. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00561>
- Cabanillas-Teran, N., Hernandez-Arana, H. A., Ruiz-Zarate, M. A., Vega-Zepeda, A., & Sanchez-Gonzalez, A. (2019). Sargassum blooms in the Caribbean alter the trophic structure of the sea urchin *Diadema antillarum*. *PeerJ*, 2019(8), 1–32. <https://doi.org/10.7717/peerj.7589>
- Cabrita, A. R. J., Maia, M. R. G., Oliveira, H. M., Sousa-Pinto, I., Almeida, A. A., Pinto, E., & Fonseca, A. J. M. (2016). Tracing seaweeds as mineral sources for farm-animals. *Journal of Applied Phycology*, 28(5), 3135–3150. <https://doi.org/10.1007/s10811-016-0842-3>

- Campbell, M., Ortuño, J., Ford, L., Davies, D. R., Koidis, A., Walsh, P. J., & Theodoridou, K. (2020). The effect of ensiling on the nutritional composition and fermentation characteristics of brown seaweeds as a ruminant feed ingredient. *Animals*, *10*(6), 1–17. <https://doi.org/10.3390/ani10061019>
- Canul-Ku, L. A., Sanginés-García, J. R., Urquizo, E. A., Canul-Solís, J. R., Valdivieso-Pérez, I. A., Vargas-Bello-Pérez, E., Molina-Botero, I., Arango, J., & Piñeiro-Vázquez, Á. T. (2023). Effect of Pelagic Sargassum on In Vitro Dry Matter and Organic Matter Degradation, Gas Production, and Protozoa Population. *Animals*, *13*(11), 1–13. <https://doi.org/10.3390/ani13111858>
- Carrillo-Domínguez, S., Rodríguez-Martínez, R. E., Díaz-Martínez, M., Magaña-Gallegos, E., & Cuchillo-Hilario, M. (2023). Potential application of pelagic Sargassum spp. in animal feeding. *Journal of Applied Phycology*, *35*(1), 433–444. <https://doi.org/10.1007/s10811-022-02877-x>
- Chaves Lopez, C., Serio, A., Rossi, C., Mazzarrino, G., Marchetti, S., Castellani, F., Grotta, L., Fiorentino, F. P., Paparella, A., & Martino, G. (2016). Effect of diet supplementation with *Ascophyllum nodosum* on cow milk composition and microbiota. *Journal of Dairy Science*, *99*(8), 6285–6297. <https://doi.org/10.3168/jds.2015-10837>
- Chávez, V., Uribe-Martínez, A., Cuevas, E., Rodríguez-Martínez, R. E., van Tussenbroek, B. I., Francisco, V., Estévez, M., Celis, L. B., Monroy-Velázquez, L. V., Leal-Bautista, R., Álvarez-Filip, L., García-Sánchez, M., Masia, L., & Silva, R. (2020). Massive influx of pelagic sargassum spp. On the coasts of the mexican caribbean 2014–2020: Challenges and opportunities. *Water (Switzerland)*, *12*(10), 1–24. <https://doi.org/10.3390/w12102908>
- Cheong, K. L., Zhang, Y., Li, Z., Li, T., Ou, Y., Shen, J., Zhong, S., & Tan, K. (2023). Role of Polysaccharides from Marine Seaweed as Feed Additives for Methane Mitigation in Ruminants: A Critical Review. *Polymers*, *15*(15). <https://doi.org/10.3390/polym15153153>
- Cho, H. M., Doan, T. P., Quy Ha, T. K., Kim, H. W., Lee, B. W., Tung Pham, H. T., Cho, T. O., & Oh, W. K. (2019). Dereplication by High-Performance Liquid Chromatography

- (HPLC) with Quadrupole-Time-of-Flight Mass Spectroscopy (qTOF-MS) and Antiviral Activities of Phlorotannins from *Ecklonia cava*. *Marine Drugs*, 17(3), 1–18. <https://doi.org/10.3390/md17030149>
- Choi, Y., Lee, S. J., Kim, H. S., Eom, J. S., Jo, S. U., Guan, L. L., Seo, J., Kim, H., Lee, S. S., & Lee, S. S. (2021). Effects of seaweed extracts on in vitro rumen fermentation characteristics, methane production, and microbial abundance. *Scientific Reports*, 11(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-03356-y>
- Choi, Y. Y., Lee, S. J., Kim, H. S., Eom, J. S., Kim, D. H., & Lee, S. S. (2020). The potential nutritive value of *Sargassum fulvellum* as a feed ingredient for ruminants. *Algal Research*, 45(September 2019), 101761. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2019.101761>
- Choi, Y. Y., Lee, S. J., Lee, Y. J., Kim, H. S., Eom, J. S., Jo, S. U., & Lee, S. S. (2019). In vitro and in situ evaluation of *Undaria pinnatifida* as a feed ingredient for ruminants. *Journal of Applied Phycology*, 32(1), 729–739. <https://doi.org/10.1007/s10811-019-01910-w>
- Choi, Y. Y., Lee, S. J., Lee, Y. J., Kim, H. S., Eom, J. S., Kim, S. C., Kim, E. T., & Lee, S. S. (2020). New challenges for efficient usage of *Sargassum fusiforme* for ruminant production. *Scientific Reports*, 10(1), 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-76700-3>
- Choi, Y. Y., Shin, N. H., Lee, S. J., Lee, Y. J., Kim, H. S., Eom, J. S., Lee, S. S., Kim, E. T., & Lee, S. S. (2021). In vitro five brown algae extracts for efficiency of ruminal fermentation and methane yield. *Journal of Applied Phycology*, 33(2), 1253–1262. <https://doi.org/10.1007/s10811-020-02361-4>
- Circuncisão, A. R., Catarino, M. D., Cardoso, S. M., & Silva, A. M. S. (2018). Minerals from macroalgae origin: Health benefits and risks for consumers. *Marine Drugs*, 16(11). <https://doi.org/10.3390/md16110400>
- Costa, M., Cardoso, C., Afonso, C., Bandarra, N. M., & Prates, J. A. M. (2021). Current knowledge and future perspectives of the use of seaweeds for livestock production and meat quality: a systematic review. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, May 2020, 1–28. <https://doi.org/10.1111/jpn.13509>

- Davis, D., Simister, R., Campbell, S., Marston, M., Bose, S., McQueen-Mason, S. J., Gomez, L. D., Gallimore, W. A., & Tonon, T. (2021). Biomass composition of the golden tide pelagic seaweeds *Sargassum fluitans* and *S. natans* (morphotypes I and VIII) to inform valorisation pathways. *Science of the Total Environment*, 762(November). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143134>
- de la Moneda, A., Carro, M. D., Weisbjerg, M. R., Roleda, M. Y., Lind, V., Novoa-Garrido, M., & Molina-Alcaide, E. (2019). Variability and potential of seaweeds as ingredients of ruminant diets: An in vitro study. *Animals*, 9(10), 1–19. <https://doi.org/10.3390/ani9100851>
- de Lima, R. N., de Souza, J. B. F., Batista, N. V., de Andrade, A. K. S., Soares, E. C. A., dos Santos Filho, C. A., da Silva, L. A., Coelho, W. A. C., de Macedo Costa, L. L., & de Oliveira Lima, P. (2019). Mitigating heat stress in dairy goats with inclusion of seaweed *Gracilaria birdiae* in diet. *Small Ruminant Research*, 171, 87–91. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2018.11.008>
- Demarco, M., Oliveira de Moraes, J., Matos, Â. P., Derner, R. B., de Farias Neves, F., & Tribuzi, G. (2022). Digestibility, bioaccessibility and bioactivity of compounds from algae. *Trends in Food Science and Technology*, 121(October 2021), 114–128. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.02.004>
- Devault, D. A., Pierre, R., Marfaing, H., Dolique, F., & Lopez, P. J. (2021). *Sargassum* contamination and consequences for downstream uses: a review. *Journal of Applied Phycology*, 33(1), 567–602. <https://doi.org/10.1007/s10811-020-02250-w>
- Dijkstra, Jan Wilco; Rojas, K. D., & Roeck, Cato de; Vanagt, T. (2021). *Sustainability Analysis of Cultivated Seaweed Valorisation Concepts*.
- Ellamie, A. M., Fouda, W. A., Ibrahim, W. M., & Ramadan, G. (2020). Dietary supplementation of brown seaweed (*Sargassum latifolium*) alleviates the environmental heat stress-induced toxicity in male Barki sheep (*Ovis aries*). *Journal of Thermal Biology*, 89(February), 102561. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2020.102561>
- Espinosa, L. A., & Li Ng, J. J. (2020). El riesgo del sargazo para la economía y turismo de Quintana Roo y México. *BBVA Research*, 20(2), 1–35. issn: 2594-1704

- Evans, F. D., & Critchley, A. T. (2014). Seaweeds for animal production use. *Journal of Applied Phycology*, 26(2), 891–899. <https://doi.org/10.1007/s10811-013-0162-9>
- Fan, G. J., Shih, B. L., Lin, H. C., Lee, T. T., Lee, C. F., & Lin, Y. F. (2021). Effect of dietary supplementation of Sargassum meal on laying performance and egg quality of Leghorn layers. *Animal Bioscience*, 34(3), 449–456. <https://doi.org/10.5713/ajas.20.0256>
- Ford, L., Stratakis, A. C., Theodoridou, K., Dick, J. T. A., Sheldrake, G. N., Linton, M., Corcionivoschi, N., & Walsh, P. J. (2020). Polyphenols from Brown Seaweeds as a Potential Antimicrobial Agent in Animal Feeds. *ACS Omega*, 5(16). <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b03687>
- Frazzini, S., Scaglia, E., Dell’Anno, M., Reggi, S., Panseri, S., Giromini, C., Lanzoni, D., Sgoifo Rossi, C. A., & Rossi, L. (2022). Antioxidant and Antimicrobial Activity of Algal and Cyanobacterial Extracts: An In Vitro Study. *Antioxidants*, 11(5), 992. <https://doi.org/10.3390/antiox11050992>
- Gaillard, C., Bhatti, H. S., Novoa-Garrido, M., Lind, V., Roleda, M. Y., & Weisbjerg, M. R. (2018). Amino acid profiles of nine seaweed species and their in situ degradability in dairy cows. *Animal Feed Science and Technology*, 241(July), 210–222. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2018.05.003>
- García-Sánchez, M., Graham, C., Vera, E., Escalante-Mancera, E., Álvarez-Filip, L., & van Tussenbroek, B. I. (2020). Temporal changes in the composition and biomass of beached pelagic Sargassum species in the Mexican Caribbean. *Aquatic Botany*, 167. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2020.103275>
- García, E. (2004). *Modifications to the Köppen climate classification system* (5th ed.). Universidad Autónoma de México, México.
- Ghosh, D., Ghosh, A., & Bhadury, P. (2022). Arsenic through aquatic trophic levels: effects, transformations and biomagnification—a concise review. *Geoscience Letters*, 9(1). <https://doi.org/10.1186/s40562-022-00225-y>
- Glasson, C. R. K., Kinley, R. D., de Nys, R., King, N., Adams, S. L., Packer, M. A., Svenson, J., Eason, C. T., & Magnusson, M. (2022). Benefits and risks of including the bromoform containing seaweed *Asparagopsis* in feed for the reduction of methane

- production from ruminants. *Algal Research*, 64(March).
<https://doi.org/10.1016/j.algal.2022.102673>
- Hadrová, S. K. S. L. K. S. M. (2021). *Alternative and Unconventional Feeds in Dairy Diets and Their*. 1–33.
- Hadrová, S., Sedláková, K., Křížová, L., & Malyugina, S. (2021). Alternative and unconventional feeds in dairy diets and their effect on fatty acid profile and health properties of milk fat. *Animals*, 11(6), 1–32. <https://doi.org/10.3390/ani11061817>
- Hong, Z. S., Kim, E. J., Jin, Y. C., Lee, J. S., Choi, Y. J., & Lee, H. G. (2015). Effects of supplementing brown seaweed by-products in the diet of Holstein cows during transition on ruminal fermentation, growth performance and endocrine responses. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 28(9), 1296–1302. <https://doi.org/10.5713/ajas.15.0235>
- Huang, Q., Chen, Y., Wang, X., Wei, Y., Pan, M., & Zhao, G. (2023). Effects of Phlorotannins from Sargassum on In Vitro Rumen Fermentation, Microbiota and Fatty Acid Profile. *Animals*, 13(18), 2854. <https://doi.org/10.3390/ani13182854>
- Hwang, J. A., Islam, M. M., Ahmed, S. T., Mun, H. S., Kim, G. M., Kim, Y. J., & Yang, C. J. (2014). Seamustard (undaria pinnatifida) improves growth, immunity, fatty acid profile and reduces cholesterol in hanwoo steers. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 27(8), 1114–1123. <https://doi.org/10.5713/ajas.2014.14072>
- Ibrahim, N., Ellamie, A., Fouda, W., & Younis, F. (2020). Physiological and Behavioral Responses of Growing Barki Ram Lambs Exposed to Heat Stress and Fed Brown Seaweed as Additives under Semi-Arid Conditions. *Journal of Animal and Poultry Production*, 11(2), 55–65. <https://doi.org/10.21608/jappmu.2020.84566>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2014). *Norma para el aseguramiento de la calidad de la información estadística y geográfica del Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. INEGI, México.
- Johnson, M., Kanimozhi, S. A., Joy Jeba Malar, T. R., Shibila, T., Freitas, P. R., Tintino, S. R., Menezes, I. R. A., da Costa, J. G. M., & Coutinho, H. D. M. (2019). The antioxidative effects of bioactive products from Sargassum polycystum C. Agardh and

- Sargassum duplicatum J. Agardh against inflammation and other pathological issues. *Complementary Therapies in Medicine*, 46(April), 19–23. <https://doi.org/10.1016/j.ctim.2019.06.014>
- Kang, J., Jia, X., Wang, N., Xiao, M., Song, S., Wu, S., Li, Z., Wang, S., Cui, S. W., & Guo, Q. (2022). Insights into the structure-bioactivity relationships of marine sulfated polysaccharides: A review. *Food Hydrocolloids*, 123(July 2021), 107049. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107049>
- Kinley, R. D., De Nys, R., Vucko, M. J., MacHado, L., & Tomkins, N. W. (2016). The red macroalgae *Asparagopsis taxiformis* is a potent natural antimethanogenic that reduces methane production during in vitro fermentation with rumen fluid. *Animal Production Science*, 56(3), 282–289. <https://doi.org/10.1071/AN15576>
- Kinley, R. D., Martinez-Fernandez, G., Matthews, M. K., de Nys, R., Magnusson, M., & Tomkins, N. W. (2020). Mitigating the carbon footprint and improving productivity of ruminant livestock agriculture using a red seaweed. *Journal of Cleaner Production*, 259, 120836. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120836>
- Kinley, R. D., Tan, S., Turnbull, J., Askew, S., & Roque, B. M. (2021). Changing the Proportions of Grass and Grain in Feed Substrate Impacts the Efficacy of *Asparagopsis taxiformis* to Inhibit Methane Production in Vitro. *American Journal of Plant Sciences*, 12(12), 1835–1858. <https://doi.org/10.4236/ajps.2021.1212128>
- Lapointe, B. E., Burkholder, J. M., & Van Alstyne, K. L. (2018). Harmful Macroalgal Blooms in a Changing World: Causes, Impacts, and Management. *Harmful Algal Blooms*, 515–560. <https://doi.org/10.1002/9781118994672.ch15>
- Lee, J. S., Kang, S., Kim, M. J., Han, S. G., & Lee, H. G. (2020). Dietary supplementation with combined extracts from garlic (*Allium sativum*), brown seaweed (*Undaria pinnatifida*), and pinecone (*Pinus koraiensis*) improves milk production in Holstein cows under heat stress conditions. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 33(1), 111–119. <https://doi.org/10.5713/ajas.19.0536>
- Lee, S., Youn, K., Kim, D. H., Ahn, M. R., Yoon, E., Kim, O. Y., & Jun, M. (2019). Anti-neuroinflammatory property of phlorotannins from *Ecklonia cava* on A β 25-35-induced

- damage in PC12 cells. *Marine Drugs*, 17(1), 1–16. <https://doi.org/10.3390/md17010007>
- Li, X., Norman, H. C., Kinley, R. D., Laurence, M., Wilmot, M., Bender, H., De Nys, R., & Tomkins, N. (2018). *Asparagopsis taxiformis* decreases enteric methane production from sheep. *Animal Production Science*, 58(4), 681–688. <https://doi.org/10.1071/AN15883>
- Lind, V., Weisbjerg, M. R., Jørgensen, G. M., Fernandez-yepes, J. E., Arbes, L., & Molinalcaide, E. (2020). Ruminal Fermentation , Growth Rate and Methane. *Animal*, 1–14.
- Liranzo-Gómez, R. E., García-Cortés, D., & Jáuregui-Haza, U. (2021). Adaptation and Sustainable Management of Massive Influx of Sargassum in the Caribbean. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*, 8(2), 543–553.
- Liu, G., Yu, X., Li, S., Shao, W., & Zhang, N. (2020). Effects of dietary microalgae (*Schizochytrium* spp.) supplement on milk performance, blood parameters, and milk fatty acid composition in dairy cows. *Czech Journal of Animal Science*, 65(5), 162–171. <https://doi.org/10.17221/19/2020-CJASq>
- Liu, L., Heinrich, M., Myers, S., & Dworjanyn, S. A. (2012). Towards a better understanding of medicinal uses of the brown seaweed *Sargassum* in Traditional Chinese Medicine: A phytochemical and pharmacological review. *Journal of Ethnopharmacology*, 142(3), 591–619. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2012.05.046>
- Liu, Y., Ma, Y., Chen, Z., Li, D., Liu, W., Huang, L., Zou, C., Cao, M. J., Liu, G. M., & Wang, Y. (2020). Antibacterial activity of sulfated galactans from *Eucheuma serra* and *Gracilari verrucosa* against diarrheagenic *Escherichia coli* via the disruption of the cell membrane structure. *Marine Drugs*, 18(8). <https://doi.org/10.3390/MD18080397>
- Machado, L., Magnusson, M., Paul, N. A., De Nys, R., & Tomkins, N. (2014). Effects of marine and freshwater macroalgae on in vitro total gas and methane production. *PLoS ONE*, 9(1). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0085289>
- Machado, L., Magnusson, M., Paul, N. A., Kinley, R., de Nys, R., & Tomkins, N. (2015). Dose-response effects of *Asparagopsis taxiformis* and *Oedogonium* sp. on in vitro fermentation and methane production. *Journal of Applied Phycology*, 28(2), 1443–1452. <https://doi.org/10.1007/s10811-015-0639-9>

- Machado, L., Magnusson, M., Paul, N. A., Kinley, R., de Nys, R., & Tomkins, N. (2016a). Dose-response effects of *Asparagopsis taxiformis* and *Oedogonium* sp. on in vitro fermentation and methane production. *Journal of Applied Phycology*, 28(2), 1443–1452. <https://doi.org/10.1007/s10811-015-0639-9>
- Machado, L., Magnusson, M., Paul, N. A., Kinley, R., de Nys, R., & Tomkins, N. (2016b). Identification of bioactives from the red seaweed *Asparagopsis taxiformis* that promote antimethanogenic activity in vitro. *Journal of Applied Phycology*, 28(5), 3117–3126. <https://doi.org/10.1007/s10811-016-0830-7>
- Machado, L., Tomkins, N., Magnusson, M., Midgley, D. J., de Nys, R., & Rosewarne, C. P. (2018). In Vitro Response of Rumen Microbiota to the Antimethanogenic Red Macroalga *Asparagopsis taxiformis*. *Microbial Ecology*, 75(3), 811–818. <https://doi.org/10.1007/s00248-017-1086-8>
- Maheswari, M., Das, A., Datta, M., & Tyagi, A. K. (2021). Supplementation of tropical seaweed-based formulations improves antioxidant status, immunity and milk production in lactating Murrah buffaloes. *Journal of Applied Phycology*, 33(4), 2629–2643. <https://doi.org/10.1007/s10811-021-02473-5>
- Maia, M. R. G., Fonseca, A. J. M., Cortez, P. P., & Cabrita, A. R. J. (2019). In vitro evaluation of macroalgae as unconventional ingredients in ruminant animal feeds. *Algal Research*, 40(March), 101481. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2019.101481>
- Maia, M. R. G., Fonseca, A. J. M., Oliveira, H. M., Mendonça, C., & Cabrita, A. R. J. (2016). The potential role of seaweeds in the natural manipulation of rumen fermentation and methane production. *Scientific Reports*, 6(August), 1–10. <https://doi.org/10.1038/srep32321>
- Makkar, H. P. S., Tran, G., Heuzé, V., Giger-Reverdin, S., Lessire, M., Lebas, F., & Ankers, P. (2016). Seaweeds for livestock diets: A review. *Animal Feed Science and Technology*, 212(September), 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2015.09.018>
- Menaa, F., Wijesinghe, P. A. U. I., Thiripuranathar, G., Uzair, B., Iqbal, H., Khan, B. A., & Menaa, B. (2020). Ecological and Industrial Implications of Dynamic Seaweed-Associated Microbiota Interactions. *Marine Drugs*, 18(12), 1–25. <https://doi.org/10.3390/md18120641>

- Menke, K. H. and Steingass, H. (1988). Estimation of the energetic feed value obtained from chemical analysis and in vitro gas production using rumen fluid. *Anim. Res. Dev.*, 28, 7–55.
- Michalak, I., Tiwari, R., Dhawan, M., Alagawany, M., Farag, M. R., Sharun, K., Emran, T. Bin, & Dhama, K. (2022). Antioxidant effects of seaweeds and their active compounds on animal health and production—a review. *Veterinary Quarterly*, 42(1), 48–67. <https://doi.org/10.1080/01652176.2022.2061744>
- Michalak, M., Wojnarowski, K., Cholewińska, P., Szeligowska, N., Bawej, M., & Pacoń, J. (2021). Selected alternative feed additives used to manipulate the rumen microbiome. *Animals*, 11(6). <https://doi.org/10.3390/ani11061542>
- Milledge, J. J., & Harvey, P. J. (2016). Golden Tides: Problem or golden opportunity? The valorisation of Sargassum from beach inundations. *Journal of Marine Science and Engineering*, 4(3). <https://doi.org/10.3390/jmse4030060>
- Milledge, J. J., Maneein, S., López, E. A., & Bartlett, D. (2020). Sargassum inundations in Turks and Caicos: Methane potential and proximate, ultimate, lipid, amino acid, metal and metalloid analyses. *Energies*, 13(6). <https://doi.org/10.3390/en13061523>
- Min, B. R., Parker, D., Brauer, D., Waldrip, H., Lockard, C., Hales, K., Akbay, A., & Augyte, S. (2021). The role of seaweed as a potential dietary supplementation for enteric methane mitigation in ruminants: Challenges and opportunities. *Animal Nutrition*, 7(4), 1371–1387. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2021.10.003>
- Molina-Alcaide, E., Carro, M. D., Roleda, M. Y., Weisbjerg, M. R., Lind, V., & Novoa-Garrido, M. (2017). In vitro ruminal fermentation and methane production of different seaweed species. *Animal Feed Science and Technology*, 228, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2017.03.012>
- Muizelaar, W., Groot, M., van Duinkerken, G., Peters, R., & Dijkstra, J. (2021). Safety and transfer study: Transfer of bromoform present in asparagopsis taxiformis to milk and urine of lactating dairy cows. *Foods*, 10(3). <https://doi.org/10.3390/foods10030584>
- Munde, Vithal K; Das, Asit; Singh, Putan; Verma, Ashok K; Muwel, Nirmala; Mishra, Alok; Deb, Rajib; Raje, K. (2021). Influence of Kappaphycus Alvarezii and Gracilaria

- Salicornia Supplementation on in Vitro Fermentation Pattern , Total Gas and Methane Production of Mixed Substrates. *Research Square*, 1–19.
- Newton, E. E., Pétursdóttir, Á. H., Ríkharðsson, G., Beaumal, C., Desnica, N., Giannakopoulou, K., Juniper, D., Ray, P., & Stergiadis, S. (2021). Effect of dietary seaweed supplementation in cows on milk macrominerals, trace elements and heavy metal concentrations. *Foods*, 10(7). <https://doi.org/10.3390/foods10071526>
- NRC. (2007). *Nutrient requirements of small ruminants: sheep, goats, cervids, and New World camelids*. Washington, DC: National Academies Press.
- Núñez-Sánchez, N., Avilés Ramírez, C., Peña Blanco, F., Gómez-Cortés, P., de la Fuente, M. Á., Vioque Amor, M., Horcada Ibáñez, A., & Martínez Marín, A. L. (2021). Effects of algae meal supplementation in feedlot lambs with competent reticular groove reflex on growth performance, carcass traits and meat characteristics. *Foods*, 10(4). <https://doi.org/10.3390/foods10040857>
- Ogimoto, K. and Imai, S. (1981). *Atlas of Rumen Microbiology*. Japan Scientific Societies: Tokyo, Japan.
- Özkan Gülzari, Lind, V., Aasen, I. M., & Steinshamn, H. (2019). Effect of supplementing sheep diets with macroalgae species on in vivo nutrient digestibility, rumen fermentation and blood amino acid profile. *Animal*, 13(12), 2792–2801. <https://doi.org/10.1017/S1751731119001502>
- Park, K. Y., Jo, Y. H., Ghassemi Nejad, J., Lee, J. C., & Lee, H. G. (2022). Evaluation of nutritional value of *Ulva* sp. and *Sargassum horneri* as potential eco-friendly ruminants feed. *Algal Research*, 65(May 2021). <https://doi.org/10.1016/j.algal.2022.102706>
- Pérez-Larrán, P., Balboa, E. M., Torres, M. D., & Domínguez, H. (2018). Antioxidant and Antitumoral Properties of Aqueous Fractions from Frozen *Sargassum muticum*. *Waste and Biomass Valorization*, 11(4), 1261–1269. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0456-x>
- Pradhan, B., Nayak, R., Bhuyan, P. P., Patra, S., Behera, C., Sahoo, S., Ki, J., Quarta, A., Ragusa, A., & Jena, M. (2022). *Algal Phlorotannins as Novel Antibacterial Agents with Reference to the Antioxidant Modulation : Current Advances and Future Directions*.

- Prayitno, C. H., & Hidayat, N. (2021). *In Vitro Rumen Methanogenesis Inhibition Ability Of Brown Seaweed From Nusakambangan Coast , Cilacap , Indonesia*. 8(6), 2081–2089.
- Ramos-Morales, E., Arco-Pérez, A., Martín-García, A. I., Yáñez-Ruiz, D. R., Frutos, P., & Hervás, G. (2014). Use of stomach tubing as an alternative to rumen cannulation to study ruminal fermentation and microbiota in sheep and goats. *Animal Feed Science and Technology*, 198(September), 57–66. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2014.09.016>
- Resiere, D., Mehdaoui, H., Florentin, J., Gueye, P., Lebrun, T., Bateau, A., Viguiet, J., Valentino, R., Brouste, Y., Kallel, H., Megarbane, B., Cabie, A., Banydeen, R., & Nevier, R. (2020). Sargassum seaweed health menace in the Caribbean: clinical characteristics of a population exposed to hydrogen sulfide during the 2018 massive stranding. *Clinical Toxicology*, 0(0), 1–9. <https://doi.org/10.1080/15563650.2020.1789162>
- Rexliene, J. (2018). SARGASSUM – A RESOURCE OF NECESSITY. *Shanlax International Journal of Arts, Science and Humanities*, 5(4), 163–171.
- Rjiba-Ktita, S., Chermiti, A., Bodas, R., France, J., & López, S. (2017). Aquatic plants and macroalgae as potential feed ingredients in ruminant diets. *Journal of Applied Phycology*, 29(1), 449–458. <https://doi.org/10.1007/s10811-016-0936-y>
- Rjiba-Ktita, S., Chermiti, A., Valdés, C., & López, S. (2019). Digestibility, nitrogen balance and weight gain in sheep fed with diets supplemented with different seaweeds. *Journal of Applied Phycology*, 31(5), 3255–3263. <https://doi.org/10.1007/s10811-019-01789-7>
- Rocha, C. P., Pacheco, D., Cotas, J., Marques, J. C., Pereira, L., & Gonçalves, A. M. M. (2021). Seaweeds as valuable sources of essential fatty acids for human nutrition. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(9). <https://doi.org/10.3390/ijerph18094968>
- Rodríguez-Martínez, R. E., Medina-Valmaseda, A. E., Blanchon, P., Monroy-Velázquez, L. V., Almazán-Becerril, A., Delgado-Pech, B., Vásquez-Yeomans, L., Francisco, V., & García-Rivas, M. C. (2019). Faunal mortality associated with massive beaching and decomposition of pelagic Sargassum. *Marine Pollution Bulletin*, 146(October 2018), 201–205. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.06.015>

- Rodríguez-Martínez, R. E., Roy, P. D., Torrescano-Valle, N., Cabanillas-Terán, N., Carrillo-Domínguez, S., Collado-Vides, L., García-Sánchez, M., & van Tussenbroek, B. I. (2020). Element concentrations in pelagic Sargassum along the Mexican Caribbean coast in 2018-2019. *PeerJ*, 2020(2), 1–19. <https://doi.org/10.7717/peerj.8667>
- Rodríguez-Martínez, R. E., Torres-Conde, E. G., & Jordán-Dahlgren, E. (2023). Pelagic Sargassum cleanup cost in Mexico. *Ocean and Coastal Management*, 237(December 2022). <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2023.106542>
- Rodríguez-Martínez, R. E., Van Tussenbroek, B., Jordán-Dahlgren, E., Rosa Elisa Rodríguez Martínez, B. I. van T. E. J., Rodríguez-Martínez, R. E., Van Tussenbroek, B., Jordán-Dahlgren, E., Elisa, R., Tussenbroek, R. B. I. Van, Nacional, U., México, A. De, Morelos, P., & Roo, Q. (2016). The massive influx of pelagic Sargassum to the Caribbean coast of Mexico (2014-2015). *Florecimientos Algales Nocivos En México*, 352–365.
- Roque, B. M., Brooke, C. G., Ladau, J., Polley, T., Marsh, L. J., Najafi, N., Pandey, P., Singh, L., Kinley, R., Salwen, J. K., Eloie-Fadrosch, E., Kebreab, E., & Hess, M. (2019). Effect of the macroalgae *Asparagopsis taxiformis* on methane production and rumen microbiome assemblage. *Animal Microbiome*, 1(1), 1–14. <https://doi.org/10.1186/s42523-019-0004-4>
- Roque, B. M., Salwen, J. K., Kinley, R., & Kebreab, E. (2019). Inclusion of *Asparagopsis armata* in lactating dairy cows' diet reduces enteric methane emission by over 50 percent. *Journal of Cleaner Production*, 234, 132–138. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.193>
- Roque, B. M., Venegas, M., Kinley, R. D., De Nys, R., Duarte, T. L., Yang, X., & Kebreab, E. (2021). Red seaweed (*Asparagopsis taxiformis*) supplementation reduces enteric methane by over 80 percent in beef steers. *PLoS ONE*, 16(3 March). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0247820>
- Roskam, E., Kirwan, S. F., Kenny, D. A., Donnell, C. O., Flaherty, V. O., & Hayes, M. (2022). Effect of brown and green seaweeds on diet digestibility , ruminal fermentation patterns and enteric methane emissions using the rumen simulation technique. *Frontiers in Animal Science*, December, 1–13. <https://doi.org/10.3389/fanim.2022.1021631>

- Saldarriaga-Hernandez, S., Hernandez-Vargas, G., Iqbal, H. M. N., Barceló, D., & Parra-Saldívar, R. (2020). Bioremediation potential of *Sargassum* sp. biomass to tackle pollution in coastal ecosystems: Circular economy approach. *Science of the Total Environment*, 715. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136978>
- Saldarriaga-Hernandez, S., Melchor-Martínez, E. M., Carrillo-Nieves, D., Parra-Saldívar, R., & Iqbal, H. M. N. (2021). Seasonal characterization and quantification of biomolecules from *sargassum* collected from Mexican Caribbean coast – A preliminary study as a step forward to blue economy. *Journal of Environmental Management*, 298(August), 113507. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113507>
- SAS. (1999). *Statistical Analysis Systems* (SAS OnLine Doc. Version 8). Cary, NC: Statistical Analysis Systems Institute.
- Sathya, R., Kanaga, N., Sankar, P., & Jeeva, S. (2017). Antioxidant properties of phlorotannins from brown seaweed *Cystoseira trinodis* (Forsskål) C. Agardh. *Arabian Journal of Chemistry*, 10, S2608–S2614. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2013.09.039>
- Sellimi, S., Benslima, A., Barragan-Montero, V., Hajji, M., & Nasri, M. (2017). Polyphenolic-protein-polysaccharide ternary conjugates from *Cystoseira barbata* Tunisian seaweed as potential biopreservatives: Chemical, antioxidant and antimicrobial properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 105, 1375–1383. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.08.007>
- Sharma, A., & Datt, C. (2020). Supplementation effect of red seaweed powder on dry matter intake , body weight and feed conversion efficiency in crossbred cows. *Journal of Entomology and Zoology Studies*, 8(2), 1056–1059.
- Shrestha, S., Zhang, W., & Smid, S. D. (2021). Phlorotannins: A review on biosynthesis, chemistry and bioactivity. *Food Bioscience*, 39 (September 2020), 100832. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2020.100832>
- Singh, B. K., Chopra, R. C., Rai, S. N., Verma, M. P., & Mohanta, R. K. (2015). Nutritional Evaluation of Seaweed on Nutrient Digestibility, Nitrogen Balance, Milk Production and Composition in Sahiwal Cows. *Proceedings of the National Academy of Sciences India Section B - Biological Sciences*, 87(2), 437–443. <https://doi.org/10.1007/s40011-015-0616-8>

- Souza, R. B., Frota, A. F., Silva, J., Alves, C., Neugebauer, A. Z., Pinteus, S., Rodrigues, J. A. G., Cordeiro, E. M. S., de Almeida, R. R., Pedrosa, R., & Benevides, N. M. B. (2018). In vitro activities of kappa-carrageenan isolated from red marine alga *Hypnea musciformis*: Antimicrobial, anticancer and neuroprotective potential. *International Journal of Biological Macromolecules*, 112, 1248–1256. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.02.029>
- Tayyab, U., Novoa-Garrido, M., Roleda, M. Y., Lind, V., & Weisbjerg, M. R. (2016). Ruminal and intestinal protein degradability of various seaweed species measured in situ in dairy cows. *Animal Feed Science and Technology*, 213, 44–54. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2016.01.003>
- Theodorou, M. K., Williams, B. A., Dhanoa, M. S., McAllan, A. B., & France, J. (1994). A simple gas production method using a pressure transducer to determine the fermentation kinetics of ruminant feeds. *Animal Feed Science and Technology*, 48(3–4), 185–197. [https://doi.org/10.1016/0377-8401\(94\)90171-6](https://doi.org/10.1016/0377-8401(94)90171-6)
- Thompson, T. M., Young, B. R., & Baroutian, S. (2019). Advances in the pretreatment of brown macroalgae for biogas production. *Fuel Processing Technology*, 195(April), 106151. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.106151>
- Thompson, T. M., Young, B. R., & Baroutian, S. (2020). Pelagic Sargassum for energy and fertiliser production in the Caribbean: A case study on Barbados. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 118(April 2019), 109564. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109564>
- Tran, T. T. Van, Truong, H. B., Tran, N. H. V., Quach, T. M. T., Nguyen, T. N., Bui, M. L., Yuguchi, Y., & Thanh, T. T. T. (2018). Structure, conformation in aqueous solution and antimicrobial activity of ulvan extracted from green seaweed *Ulva reticulata*. *Natural Product Research*, 32(19), 2291–2296. <https://doi.org/10.1080/14786419.2017.1408098>
- Tsiplakou, E., Abdullah, M. A. M., Mavrommatis, A., Chatzikonstantinou, M., Skliros, D., Sotirakoglou, K., Flemetakis, E., Labrou, N. E., & Zervas, G. (2018). The effect of dietary *Chlorella vulgaris* inclusion on goat's milk chemical composition, fatty acids profile and enzymes activities related to oxidation. *Journal of Animal Physiology and*

Animal Nutrition, 102(1), 142–151. <https://doi.org/10.1111/jpn.12671>

- Van Soest, P. J., Robertson, J. B., & Lewis, B. A. (1991). Methods for Dietary Fiber, Neutral Detergent Fiber, and Nonstarch Polysaccharides in Relation to Animal Nutrition. *Journal of Dairy Science*, 74(10), 3583–3597. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(91\)78551-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(91)78551-2)
- van Tussenbroek, B. I., Hernández Arana, H. A., Rodríguez-Martínez, R. E., Espinoza-Avalos, J., Canizales-Flores, H. M., González-Godoy, C. E., Barba-Santos, M. G., Vega-Zepeda, A., & Collado-Vides, L. (2017). Severe impacts of brown tides caused by *Sargassum* spp. on near-shore Caribbean seagrass communities. *Marine Pollution Bulletin*, 122(1–2), 272–281. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.06.057>
- Vázquez-Delfín, E., Freile-Pelegrín, Y., Salazar-Garibay, A., Serviere-Zaragoza, E., Méndez-Rodríguez, L. C., & Robledo, D. (2021). Species composition and chemical characterization of *Sargassum* influx at six different locations along the Mexican Caribbean coast. *Science of the Total Environment*, 795. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148852>
- Vijay, K., Balasundari, S., Jeyashakila, R., Velayathum, P., & Masilan, K. (2017). Proximate and mineral composition of brown seaweed from Gulf of Mannar . *International Journal of Fisheries and Aquatic Studies*, 5(5), 106–112. <http://www.fisheriesjournal.com/archives/2017/vol5issue5/PartB/5-4-88-968.pdf>
- Wang, M., Hu, C., Barnes, B. B., Mitchum, G., Lapointe, B., & Montoya, J. P. (2019). The great Atlantic *Sargassum* belt. *Science*, 364(6448), 83–87. <https://doi.org/10.1126/science.aaw7912>
- Wang, S., Cao, B., Abomohra, A. E. F., Hu, Y., Wang, Q., He, Z., Xu, S., Feng, Y., Bernard, U. B., & Jiang, X. (2018). Comparative Study of Combustion Properties of Two Seaweeds in a Batch Fluidized Bed. *Combustion Science and Technology*, 190(5), 755–769. <https://doi.org/10.1080/00102202.2017.1407761>
- Wang, Y., Alexander, T. W., & Mcallister, T. A. (2009). In vitro effects of phlorotannins from *Ascophyllum nodosum* (brown seaweed) on rumen bacterial populations and fermentation. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 89(13), 2252–2260. <https://doi.org/10.1002/jsfa.3717>

- Widiawati, Y., & Hikmawan, D. (2021). Enteric methane mitigation by using seaweed *Eucheuma cottonii*. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 788(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/788/1/012152>
- Williams, A. G., Withers, S., & Sutherland, A. D. (2013). The potential of bacteria isolated from ruminal contents of seaweed-eating North Ronaldsay sheep to hydrolyse seaweed components and produce methane by anaerobic digestion in vitro. *Microbial Biotechnology*, 6(1), 45–52. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.12000>
- Zheng, Y., Xue, S., Zhao, Y., & Li, S. (2020). Effect of cassava residue substituting for crushed maize on in vitro ruminal fermentation characteristics of dairy cows at mid-lactation. *Animals*, 10(5). <https://doi.org/10.3390/ani10050893>
- Zhou, M., Hünerberg, M., Chen, Y., Reuter, T., McAllister, T. A., Evans, F., Critchley, A. T., & Guan, L. L. (2018). Air-Dried Brown Seaweed, *Ascophyllum nodosum*, Alters the Rumen Microbiome in a Manner That Changes Rumen Fermentation Profiles and Lowers the Prevalence of Foodborne Pathogens. *MSphere*, 3(1). <https://doi.org/10.1128/msphere.00017-18>

1.4. Hipótesis

El sargazo pelágico que arriba a las costas del Caribe Mexicano, por su contenido de compuestos bioactivos y de materia orgánica potencialmente degradable, puede ser utilizado en la alimentación de rumiantes como aditivo para reducir las emisiones de metano y modificar las características de la fermentación ruminal tanto *in vitro*, *in situ*, como *in vivo*.

1.5. Objetivos.

1.5.1. Objetivo general

- ❖ Evaluar el uso potencial del sargazo pelágico que arriba en las costas del Caribe Mexicano en la alimentación de rumiantes, con la finalidad de darle un aprovechamiento sustentable; así mismo, determinar su efecto sobre la cinética de degradabilidad *in situ*, los patrones de fermentación *in vitro* y los posibles cambios en la población de protozoarios.

1.5.2. Objetivos específicos

- ❖ Determinar la composición química proximal y el contenido de macro y micro minerales.
- ❖ Evaluar el efecto de la inclusión de sargazo en una gramínea tropical como sustrato base sobre las características de la fermentación *in vitro*.
- ❖ Determinar el efecto de la inclusión de sargazo en un sustrato basado en una gramínea tropical sobre la cinética de degradación *in situ* de los nutrientes.
- ❖ Evaluar el efecto de la inclusión de sargazo en un sustrato basado en una dieta integral sobre las características de la fermentación *in vitro*.

II. CAPÍTULO 2. Effect of Pelagic *sargassum* on *in vitro* dry matter and organic matter degradation, gas production, and protozoa population

Luis Alberto Canul-Ku ¹, José Roberto Sanginés-García ¹, Edgar Aguilar Urquizo ¹, Jorge Rodolfo Canul-Solís ², Ingrid Abril Valdivieso-Pérez ¹, Einar Vargas-Bello-Pérez ^{3,4,*}, Isabel Molina-Botero ⁵, Jacobo Arango ⁵ and Ángel Trinidad Piñeiro-Vázquez ^{1,*}.

First author: luisitc.canulku@gmail.com (L.A.C.-K.)

***Correspondence:** angel.pineiro@itconkal.edu.mx or angel.pv@conkal.tecnm.mx (Á.T.P.-V.); e.vargasbelloperez@reading.ac.uk (E.V.-B.-P.)

Scientific article published in the journal: **animals**

DOI: <https://doi.org/10.3390/ani13111858>

Abstract: This study determined the effect of pelagic *Sargassum* on *in vitro* dry matter and organic matter degradation, total gas production (TGP), and protozoa population. The treatments were different levels of *Sargassum* inclusion on a basal substrate (Stargrass hay; *Cynodon nlemfuensis*) as follows: T0 (control treatment based on Stargrass hay), T10 (90% Stargrass hay + 10% *Sargassum*), T20 (80% Stargrass hay + 20% *Sargassum*), and T30 (70% Stargrass hay + 30% *Sargassum*). Ruminal fermentation kinetics and protozoa population were determined during 72 h of *in vitro* incubations. Compared to control, dry matter degradability at 48 and 72 h and organic matter degradability at 24 and 48 h were higher in *Sargassum* treatments. TGP was lower with T20 at 48 h. The total population of protozoa and the concentration of *Entodinium* spp. were lower at T20 at 48 h and T30 at 72 h. Cl, S, Ca, K, and Zn (103, 5.97, 88.73, 285.70 g/kg, and 15,900 mg/kg) were high in *Sargassum*, reaching twice or even nine times higher than the contents in Stargrass (11.37, 1.60, 43.53, 87.73 g/kg, and 866.67 mg/kg). Overall, up to 30% pelagic *Sargassum* could be included in hay-based substrates from tropical grasses without negative effects on *in vitro* dry matter and organic matter degradability.

Keywords: brown algae; secondary metabolites; fermentation parameters; alternative ingredient; protozoa.

III. CAPITULO 3. Evaluation of degradability of pelagic sargassum under *in vitro* and *in situ* conditions for use in ruminant diets

Correo de tesista: luisitc.canulku@gmail.com

Correo de director de tesis: angel.pv@conkal.tecnm.mx

Abstract

Pelagic sargassum is a mixture of several species of brown macroalgae rich in minerals, polysaccharides, and bioactive compounds which reaches Caribbean coasts in large quantities. The objective of this study was to evaluate its potential as an ingredient in ruminant feed based on its *in situ* degradability and *in vitro* gas production. Different percentages of sargassum (0%, 10%, 20% and 30%) were added to a substrate (*Pennisetum purpureum* VC CT-115 hay). Two cows with rumen cannula were used for the *in situ* trial, while the Menke and Steingass methodology was used to evaluate *in vitro* gas production. The inoculum was an aliquot of ruminal fluid obtained through an esophageal probe in five hair sheep kept under grazing conditions. *In situ* DM degradability decreased linearly ($P < 0.0001$) as the concentration of sargassum in the substrate increased from 0% to 30% (48 h: from 684.91 to 607.75 g/kg DM; 72 h: from 722.10 to 634.68 g/kg DM); a similar response was observed for OM. The *in vitro* gas production curve was similar among the control group and 10% and 20% levels of inclusion; however, degradability of DM and OM, as well as the protozoa population were similar ($P > 0.0001$) for all treatments. We conclude that pelagic sargassum may be included at levels of 20% to 30% *in situ* and *in vitro*; however, its use under *in vivo* conditions must be further evaluated.

Key words: Brown macroalgae; Bioactive compounds; Fermentation parameters; ingredient.

IV. CAPITULO 4. *In vitro* fermentation characteristics of pelagic sargassum for inclusion in integral diets for ruminants.

Luis Alberto Canul-Ku^a, José Roberto Sanginés-García^a, Fernando Casanova-Lugo^b, Einar Vargas-Bello-Pérez^c, Edgar Aguilar Urquiza^a, Jorge Rodolfo Canul-Solís^d, Ingrid Abril Valdivieso-Pérez^a, Ángel Trinidad Piñeiro-Vázquez^a

First author: luisitc.canulku@gmail.com (L.A.C.-K.)

***Correspondence:** angel.pv@conkal.tecnm.mx (Á.T.P.-V.); luisitc.canulku@gmail.com (L.A.C.-K.)

Scientific article sent to the journal: **animals**

Abstract: Pelagic sargassum arriving to the Mexican Caribbean is a mixture of brown macroalgae containing polysaccharides, minerals and secondary metabolites with potential in ruminant diets. The objective of the present study was to evaluate the effect of the inclusion of sargassum in integral diets (ID) on *in vitro* fermentation characteristics. Different levels of sargassum (ICD: 0 %, ID10: 10 %, ID20: 20 % and ID30: 30 %) were added to a basal substrate (a mixture of *Pennisetum purpureum* Vc. CT-115 hay, corn, soybean and molasses). Rumen fluid was obtained from five male lambs with a body weight of 40 ± 3 kg. *In vitro* gas production (IVGP) as well as dry matter degradability (DMD) and organic matter degradability (DOM) increased linearly ($p < 0.0001$) as the proportion of sargassum increased at 24, 48 and 72 h. Rumen fluid pH decreased ($p < 0.05$) with 30 % inclusion at 48 h; while protozoan concentration was similar ($p > 0.05$) in all treatments with respect to the control at all evaluation times. These results indicate that the inclusion of pelagic sargassum up to 30% in integral concentrated diets improves fermentative parameters and its inclusion in diets for ruminants is feasible.

Key words: brown algae, secondary metabolites, ruminants, whole-grain diets, fermentation parameters.